

Karakterizacija zavarenog spoja austenitnog nehrđajućeg čelika

Jurlina, Ivan

Undergraduate thesis / Završni 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:235:470905>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-18**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Jurlina

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Ivan Jurlina

Zagreb, 2022. godina.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na strpljenju, pomoći i stručnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se tehničkom suradniku Ivanu Vovku i ostalim djelatnicima fakulteta na pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Najviše hvala mojim roditeljima Valeriji i Ivici, sestri Petri i djevojci Hani na pruženoj velikoj podršci, razumijevanju, strpljenju i odricanjima čime ste mi uvelike olakšali završetak ovog studija.

Ivan Jurlina



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Jurlina** JMBAG: **0035223323**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija zavarenog spoja austenitnog nehrđajućeg čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of the austenitic stainless steel welded joint**

Opis zadatka:

Austenitni nehrđajući čelici posjeduju izvrsna mehanička i korozivna svojstva, a u odnosu na druge nehrđajuće čelike imaju najšire temperaturno područje primjene. To je najbrojnija skupina nehrđajućih čelika po broju vrsta i po ukupno proizvedenoj i primijenjenoj količini. Zavarljivost i druga tehnološka svojstva austenitnih nehrđajućih čelika također su dobra. Sva navedena svojstva posljedica su precizno izbalansiranog kemijskog sastava i osobito mikrostrukture koja može biti potpuno austenitna ili austenitna s malim udjelom delta-ferita. Zbog velikog unosa topline tijekom zavarivanja u području zavarenog spoja narušava se osnovna mikrostruktura čelika, a osim navedenih mogu se izlučiti i neke druge mikrostrukturne faze koje uvijek štetno djeluju na mehanička i korozivna svojstva.

U završnom radu potrebno je opisati austenitne nehrđajuće čelike s posebnim naglaskom na mikrostrukturne promjene koje nastaju pri zavarivanju. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti karakterizaciju zavarenog spoja austenitnog nehrđajućeg čelika: analizirati makrostrukturu i mikrostrukturu te izmjeriti mikrotvrdoću u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara.

Dobivene rezultate potrebno je analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Rede

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Branko Bauer
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. NEHRĐAJUĆI ČELICI	2
2.1 Austenitni nehrđajući čelici	5
2.1.1 Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika.....	7
2.2 Martenzitni nehrđajući čelici	8
2.3 Feritni nehrđajući čelici	11
2.4 Dupleks čelici.....	13
3. EKSPERIMENTALNI DIO	16
3.1 Cilj rada i provođenje ispitivanja	16
3.2 Materijal za ispitivanje.....	16
3.3 Zavarivanje spoja	17
3.4 Priprema uzorka za analizu mikrostrukture	19
3.4.1 Izrezivanje uzorka	19
3.4.2 Zalijevanje uzorka polimernom masom	21
3.4.4 Poliranje	23
3.4.5 Nagrizanje.....	24
3.5 Analiza makrostrukture i mikrostrukture.....	26
3.5.1 Analiza makrostrukture.....	26
3.5.2 Analiza mikrostrukture.....	27
3.6 Mjerenje mikrotvrdoće uzorka.....	34
4. OSVRT NA REZULTATE	38
4.1 Osvrt na rezultate analize makrostrukture i mikrostrukture zavarenog spoja.....	38
4.2 Osvrt na rezultate mjerenja mikrotvrdoće HV0,2	38
5. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44

POPIS SLIKA

Slika 1.	Fazni dijagram Fe-Cr [4]	4
Slika 2.	Schaefflerov dijagram iz 1949. godine [5]	5
Slika 3.	Mikrostruktura dvaju austenitnih nehrđajućih čelika [1]	6
Slika 4.	Prikaz mikrostrukture meko žarenog čelika X20Cr13 [11]	9
Slika 5.	Mikrostruktura martenzitnog čelika s potpuno martenzitnom mikrostrukturom [11]	10
Slika 6.	Prikaz mikrostrukture duboko hlađenog i popuštenog martenzitnog čelika [11] .	11
Slika 7.	Mikrostrukutra feritnog nehrđajućeg čelika [3]	12
Slika 8.	Mikrostruktura dupleks čelika [12]	13
Slika 9.	Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % željeza [7]	15
Slika 10.	Zavareni spoj ploče i cijevi od austenitnog nehrđajućeg čelika	16
Slika 11.	Prikaz zavarenog spoja i redosljed prolaza	18
Slika 12.	Izrezani uzorak zavarenog spoja	19
Slika 13.	Izrezivanje uzorka (stijenka cijevi)	20
Slika 14.	Izrezivanje uzorka (ploča)	20
Slika 15.	Izrezani uzorak	21
Slika 16.	Pneumatska preša Buehler Pneumet Press	21
Slika 17.	Metalografski uzorak zavarenog spoja	22
Slika 18.	Uređaj za brušenje Presi Minitex 233	23
Slika 19.	Uređaj Struers DAP-V	24
Slika 20.	Nagriženi uzorak	25
Slika 21.	Makrostruktura zavarenog spoja čelika X1CrNiMoCuN20-18-7	26
Slika 22.	Svjetlosno mikroskop Olympus GX51	27
Slika 23.	Mikrostruktura gornjeg dijela ploče snimljena pri povećanju 200×	28
Slika 24.	Mikrostruktura srednjeg dijela ploče snimljena pri povećanju 200×	28
Slika 25.	Mikrostruktura donjeg dijela ploče snimljena pri povećanju 200×	29
Slika 26.	Mikrostruktura uz vanjski dio stijenke cijevi snimljena pri povećanju 200×	29
Slika 27.	Mikrostruktura u sredini presjeka cijevi snimljena pri povećanju 200×	30
Slika 28.	Mikrostruktura uz unutarnji dio stijenke cijevi snimljena pri povećanju 200×	30
Slika 29.	Zona utjecaja topline sa strane ploče snimljena pri povećanju 100×	31
Slika 30.	Zona utjecaja topline sa strane cijevi snimljena pri povećanju 100×	31
Slika 31.	Tjeme metala zavara snimljeno pri povećanju 100×	32
Slika 32.	Sredina metala zavara snimljena pri povećanju 100×	32
Slika 33.	Korijen metala zavara snimljen pri povećanju 50×	33
Slika 34.	Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće PMT-3	34
Slika 35.	Područja na kojima je mjerena mikrotvrdoća HV0,2	35
Slika 36.	Mikrotvrdoća HV0,2 osnovnog materijala ploče	39
Slika 37.	Mikrotvrdoća HV0,2 osnovnog materijala cijevi	39
Slika 38.	Mikrotvrdoća ZUT-a sa strane ploče	40
Slika 39.	Mikrotvrdoća ZUT-a sa strane cijevi	41
Slika 40.	Mikrotvrdoće metala zavara	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Alfageni i gamageni legirni elementi [1]	3
Tablica 2. Zajamčeni kemijski sastav čelika oznake X1CrNiMoCuN20-18-7	17
Tablica 3. Mehanička svojstva materijala cijevi zajamčena od proizvođača.....	17
Tablica 4. Parametri brušenja	22
Tablica 5. Parametri poliranja	24
Tablica 6. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu ploče.....	36
Tablica 7. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu cijevi	36
Tablica 8. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u ZUT-u sa strane ploče.....	36
Tablica 9. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u ZUT-u sa strane cijevi	36
Tablica 10. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u metalu zavara.....	37

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>A</i>	%	Istezljivost
<i>Cr_e</i>	/	Krom ekvivalent
<i>DS</i>	/	Djelotvorna suma
<i>HRB</i>	<i>HRB</i>	Tvrdoća po Rockwellu (kuglica od kaljenog čelika)
<i>HRC</i>	<i>HRC</i>	Tvrdoća po Rockwellu (dijamantni stožac)
<i>HV</i>	<i>HV</i>	Tvrdoća po Vickersu
<i>M_s</i>	/	Temperatura početka stvaranja martenzita
<i>M_f</i>	Jedinica	Temperatura završetka stvaranja martenzita
<i>Ni_e</i>	/	Nikal ekvivalent
<i>R_m</i>	<i>N/mm²</i>	Vlačna čvrstoća
<i>R_{p0,2}</i>	<i>N/mm²</i>	Konvencionalna granica razvlačenja
<i>T_t</i>	<i>K</i>	Temperatura tališta

SAŽETAK

Osnovni cilj ovog rada bila je karakterizacija zavarenog spoja između cijevi i ploče austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X1CrNiMoCuN20-18-7. U teorijskom dijelu rada navedene su vrste nehrđajućih čelika, njihova svojstva i karakteristike. Detaljnije je opisana zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je metalografska priprema uzorka kako bi se analizirala makrostruktura i mikrostruktura te provelo ispitivanje mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara.

Analizom makrostrukture utvrđen je nepotpuni provar i zavar nesimetričnog oblika, ali u dopuštenim granicama.

Analizom mikrostrukture utvrđeno je da osnovni materijal ploče i cijevi imaju tipičnu austenitnu mikrostrukturu s udjelom delta-ferita manjim od 6 %. Linija staljivanja sa strane ploče jasno je izražena, zona utjecaja topline je uska, a mikrostruktura je austenitna s nešto krupnijim zrnima. Linija staljivanja sa strane cijevi je isto izražena, ali mikrostruktura zone utjecaja topline nije jasno vidljiva. Mikrostruktura metala zavara je tipična ljevačka dendritna s jasno izraženim prolazima.

Najviše vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 izmjerene su u metalu zavara, nešto niže u zoni utjecaja topline, a najniže u osnovnom materijalu ploče. Izmjerena mikrotvrdoća u korijenu zavara viša je nego u sredini i tjemenu zavara.

Ključne riječi: austenitni nehrđajući čelici, zavareni spoj, karakterizacija

SUMMARY

The main goal of this bachelor thesis was to characterize the welded joint between the pipe and the plate of austenitic stainless steel graded X1CrNiMoCuN20-18-7. Classification of stainless steels as their properties and characteristics were described in the theoretical part of the thesis. The weldability of austenitic stainless steels was described in more detail.

In the experimental part of the paper, metallographic sample preparation was carried out in order to analyse the macrostructure and microstructure along with microhardness HV0.2 test in the base material, heat-affected zone, and weld metal.

The analysis of the macrostructure showed incomplete weld root and asymmetrical shape of weld within the allowed limits.

The microstructure analysis showed that the base materials of the plate and pipe have a typical austenitic microstructure with a delta-ferrite content of less than 6%. The fusion line on the side of the plate is clearly expressed, the heat-affected zone is narrow, and the microstructure is austenitic with slightly larger grains. The fusion line on the pipe side is also noticeable, but the microstructure of the heat-affected zone is not visible. The weld metal microstructure is a typical as-cast dendritic structure with clearly defined passages.

The highest values of microhardness HV0.2 were measured in the weld metal, slightly lower in the heat-affected zone and the lowest in the base material of the plate. The measured microhardness at the root of the weld is higher than in the middle and weld face.

Key words: Austenitic stainless steel, welded joint, characterization

1. UVOD

Korozijski postojani čelici razvijeni su početkom 20. stoljeća u tadašnjim svjetskim velesilama Njemačkoj, Francuskoj, Engleskoj i SAD-u. Prvo su razvijeni martenzitni (13 %Cr) i feritni (17 %Cr) nehrđajući čelici. U početku rezultati nisu bili zadovoljavajući i uglavnom zbog previsokog udjela ugljika čelici nisu postizali zadovoljavajuća mehanička svojstva. Godina 1912. najčešće se uzima kao godina u kojoj je razvijen prvi nehrđajući čelik, a razvili su ga u čeličani Friedrich Krupp u Essenu. U njihovom istraživanju naziva V2A proizvedena je željezna legura s 18 %Cr i 8 %Ni otporna na koroziju te postojana na toplinu i kiseline, uz zadovoljavajuća mehanička svojstva kao što su krutost, tvrdoća i žilavost. Od prvog nehrđajućeg čelika pa sve do danas, razvijeno je puno vrsta nehrđajućih čelika sa širokim rasponom svojstava. [1]

Od sveukupne proizvodnje čelika udio nehrđajućih je samo oko 2,5 %, međutim njihov gospodarski i tehnički značaj uvelike premašuje takav udio u proizvodnji. Zbog svojih odličnih svojstava primjenjuju se u nepovoljnim uvjetima, u kojima primjena običnih čelika ili nekih drugih materijala nije moguća.[1]

Mogu se pronaći u raznim industrijama od kojih su mnoge od izrazitog značaja za čovječanstvo kao što su na primjer petrokemijska, farmaceutska i prehrambena industrija. [1]

2. NEHRĐAJUĆI ČELICI

Nehrđajući čelici ili korozijski postojani čelici su specijalna skupina čelika čija je osnovna odlika visoka otpornost na kemijske i elektrokemijske procese korozije. Korozija dovodi do spontanog razaranja metala ili legura zbog djelovanja okolnog medija. Djelovanjem plinova, vrućeg i suhog zraka ili neelektrolita na samu površinu čelika dolazi do kemijske korozije. Prilikom kemijske korozije nastaju kemijske reakcije od kojih je najčešća oksidacija. Elektrokemijska korozija odvija se uz postojanje elektrolita prilikom čega se korodirani metal ponaša kao anoda te se otapa u obliku iona u otopinu. [2]

Osnovni korozijski oblici kod čelika su:

1. opća korozija
2. rupičasta korozija
3. interkristalna korozija
4. kontaktna korozija
5. napetosna korozija
6. korozija u procjepu. [1, 2]

Korozijska postojanost (pasivnost) temeljno je svojstvo nehrđajućih čelika, a to je sposobnost metala ili legura da se suprotstave štetnom djelovanju korozijskog medija tako da uspore ili potpuno onemoguće njegovo djelovanje. Kako bi čelik bio korozijski postojan moraju biti zadovoljena dva glavna uvjeta pasivnosti čelika. Prvi, a ujedno i nužan uvjet jest da minimalni udio kroma u kemijskom sastavu čelika mora biti 12%, s time da krom mora biti u cijelosti otopljen u metalnoj osnovi čelika. Antikoroziivnost čelika s 12 % kroma temelji se na formiranju tankog stabilnog sloja kromovih oksida (pasivni film) koji ima ulogu guste zaštitne prevlake koja sprečava kontakt između površine čelika i kisika iz zraka tj. koroziju u normalnim uvjetima. Drugi uvjet jest da mikrostruktura čelika mora biti homogena i monofazna bez karbida, oksida ili intermetalnih faza. Nehrđajući čelici s monofaznom mikrostrukturom izbjegli su opasnost nastanka područja s različitim elektropotencijalom od potencijala osnovne mase čelika tj. opasnost od nastanka galvanskih članaka koji u elektrolitima mogu uzrokovati koroziju materijala. Od drugog uvjeta se s vremenom odstupilo te su se razvili nehrđajući čelici s dvije faze kao što su dupleks čelici, koji se sastoje od ferita i austenita. S obzirom da nehrđajući čelici moraju biti legirani s minimalno 12% kroma svi su visokolegirani. Iako je samo prisustvo kroma s udjelom većim od 12 % dovoljno za korozijsku postojanost uz njega se po potrebi u nehrđajuće čelike dodaju i još neki legirni elementi kao što su: nikal, molibden, titanij, niobij, aluminij, bakar, volfram, vanadij, dušik i drugi. Svi korozijski postojani čelici

sadrže primjese mangan i silicij. Nažalost u njima se također javljaju i nepoželjne primjese poput kisika, sumpora, fosfora i dušika, iako dušik može biti i legirni element. Legirni elementi i nečistoće imaju značajan utjecaj na svojstva i karakteristike nehrđajućih čelika. [1]

Najjednostavnija podjela legirnih elemenata je na gamagene i alfagene legirne elemente. Gamageni legirni elementi ili austenotvorci promiču ili stabiliziraju austenitnu fazu odnosno proširuju austenitno područje. Alfageni legirni elementi ili feritotvorci promiču ili stabiliziraju ferit odnosno proširuju feritno područje. [1-3]

Podjela alfagenih i gamagenih legirnih elemenata prikazana je u tablici 1.

Tablica 1. Alfageni i gamageni legirni elementi [1]

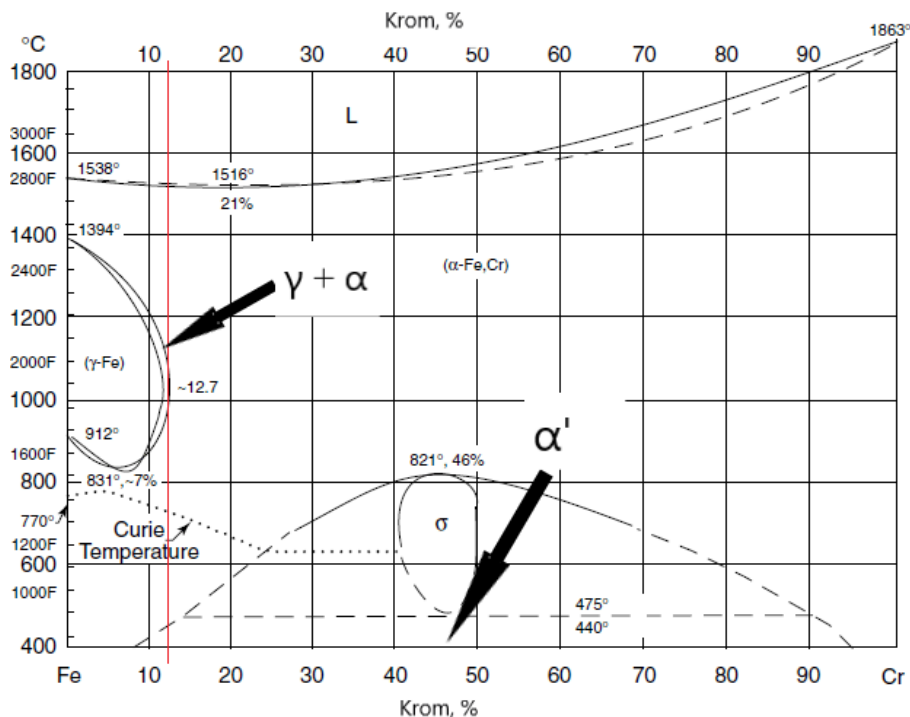
Alfageni legirni elementi	Gamageni legirni elementi
krom	nikal
silicij	mangan
aluminij	dušik
molibden	bakar
niobij	ugljik
volfram	kobalt
vanadij	/

Prema mikrostrukturi nehrđajući čelici dijele se na:

1. austenitne
2. feritne
3. martenzitne
4. dupleks
5. precipitacijski očvrnuti čelici. [1]

Mikrostruktura nehrđajućih čelika ovisi o kemijskom sastavu, režimu toplinske obrade i stupnju hladne deformacije. Za predviđanje mikrostrukturnog stanja nehrđajućeg čelika pomoću njegova kemijskog sastava koriste se različiti dijagrami među kojima se najviše primjenjuju ravnotežni fazni dijagrami te Schaefflerov dijagram. [1]

Za nehrđajuće čelike najpoznatiji fazni dijagram je binarni dijagram stanja Fe-Cr koji je prikazan na slici 1. U njemu se može vidjeti mikrostrukutra čelika s određenim udjelom kroma pri određenoj temperaturi. [1]



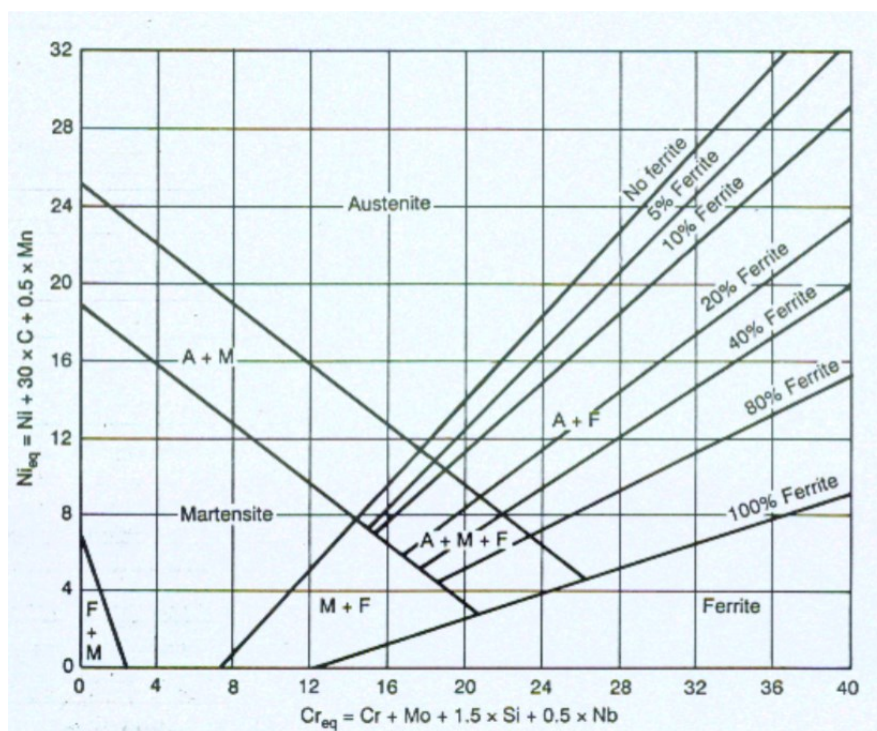
Slika 1. Fazni dijagram Fe-Cr [4]

Na dijagramu se može uočiti da sve legure koje imaju manje od približno 12,7 % kroma hlađenjem prekrystaliziraju iz ferita u austenit (iz prostorno centrirane kubične BCC kristalne strukture u plošno centriranu kubičnu FCC), a nastavkom hlađenja ponovno se vraćaju u ferit. Područje austenita u ovom dijagramu je poznato pod nazivom gama-petlja te je ono od velikog značaja za martenzitne nehrđajuće čelike jer je nastanak martenzita moguć jedino iz austenita. Kada je udio kroma viši od 12,7 % hlađenjem iz taline nastaje ferit koji se zadržava do sobnih temperatura. Kod ovih legura moguće je stvaranje određenih nepoželjnih faza poput sigma-faze i alfa-prim-faze, ako se legura zadržava dulje vrijeme u području kritičnih temperatura. Sigma-faza se javlja kod legura koje imaju približno oko 20 % kroma na temperaturi nižoj od 822 °C. Alfa-prim-faza se javlja kod legura koje sadrže više od 14 % kroma u području od 400 °C do 540 °C. Pojava alfa-prim-faze uzrokuje pojavu *krhkost* 475 °C. [1]

Vrlo često je u primjeni i Schaefflerov dijagram, prikazan na slici 2, koji se koristi za gašeno stanje, na apscisi se nalazi Cr-ekvivalent (Cr_e) dok se na ordinati nalazi Ni-ekvivalent (Ni_e). Vrijednosti krom i nikal ekvivalenta računaju se prema izrazima [1]:

$$Cr_e = \%Cr + 2(\%Si) + 1,5(\%Mo) + 5(\%V) + 5,5(\%Al) + 1,75(\%Nb) + 1,5(\%Ti) + 0,75(\%W) \quad (1)$$

$$Ni_e = \%Ni + \%Co + 30(\%C) + 25(\%N) + 0,5(\%Mn) + 0,3(\%Cu) \quad (2)$$



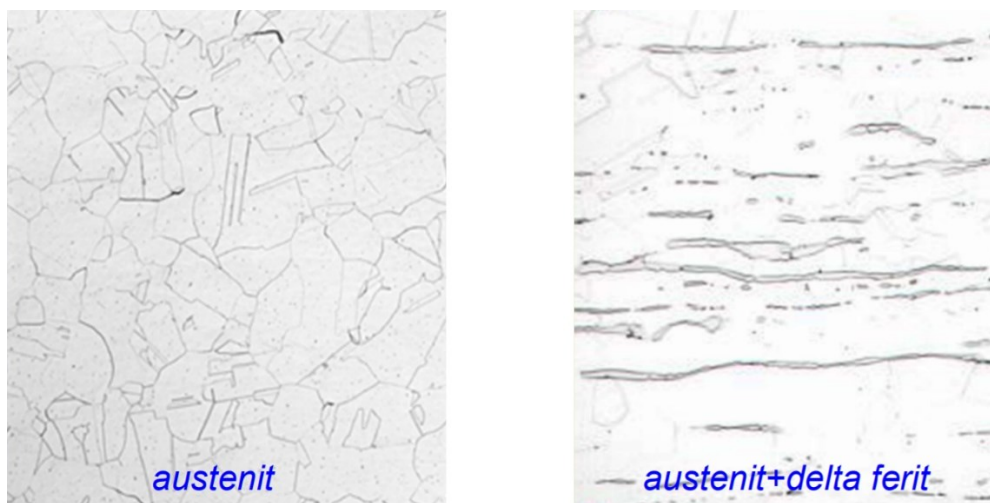
Slika 2. Schaefflerov dijagram iz 1949. godine [5]

2.1 Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici su najbrojnija i najprimjenjivija grupa od svih osnovnih grupa nehrđajućih čelika. Korozijski su postojani u većini okolišnih medija, međutim njihova upotreba nije preporučljiva u okolišima poput morske vode i ostalih medija koji sadrže kloride zbog visoke osjetljivosti na napetosnu koroziju. [6].

Osnovni legirni elementi ove skupine korozijski postojanih čelika su krom i nikal. Udio kroma u njima je od 16 % do 26 %, nikla od 8 % do 20 %, a mangana do 2 % u slučaju da je prisutan kao primjesa. Ako je mangan prisutan kao legirni element njegov udio može biti od 4 % do 15,5 %, a uloga mu je da u kombinaciji s do 0,4 % dušika smanji udio skupog nikla. Kao dodatni legirni elementi upotrebljavaju se molibden, aluminij, titanij, tantal, selenij, dušik, bakar, niobij i sumpor, a razlog njihovog dodavanja jest poboljšanje otpornosti na neku od vrsta korozije, mehaničkih svojstava (dušik) te obradivosti (selenij i sumpor). Udio ugljika u ovim čelicima kreće se u rasponu od 0,02 % do 0,08 %. [1]

Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika može biti potpuno monofazna ili može uz austenit sadržavati do 10% delta-ferita u obliku trakastih nakupina usmjerenih paralelno sa smjerom valjanja. Obje mikrostrukture prikazane su na slici 3. [1]



Slika 3. Mikrostruktura dvaju austenitnih nehrđajućih čelika [1]

Delta-ferita nastaje zbog segregacije alfa-fagenih legiranih elemenata tijekom kristalizacije i termomehaničke obrade. Delta-ferit povećava otpornost prema pojavi toplih pukotina, a ne smije ga biti više od 10 % jer bi radi toga porasla sklonost prema nastanku štetnih sekundarnih faza poput sigma-faze. Delta-ferit otežava toplu preradu, smanjuje sklonost nastanku korozije u procjepu i rupičaste korozije, smanjuje istežljivost i žilavost te pogoduje izlučivanju karbida po granicama zrna, ako je umrežen. [1, 3]

Za što bolju korozijsku postojanost važno je da udio ugljika bude manji od 0,03% kako bi se spriječila senzibilizacija tj. povezivanje ugljika s kromom u karbid Cr_{23}C_6 i njegova precipitacija po granicama zrna. Zbog senzibilizacije dolazi do pada korozijske postojanosti jer se uslijed formiranja karbida Cr_{23}C_6 smanjuje udio kroma prvenstveno u području oko granice zrna što može dovesti do interkristalne korozije ukoliko se udio kroma smanji ispod 12 %. Senzibilizacija se može spriječiti i dodavanjem stabilizatora poput titanija, niobija i tantala koji su jači karbidotvorci od kroma. Senzibilizacijom se smanjuje otpornost i na druge oblike korozije poput rupičaste, napetosne i korozije u procjepu. Do senzibilizacije dolazi duljim zadržavanjem na temperaturama između 425 °C i 870 °C, a količina izlučenog karbida ovisi o temperaturi i vremenu. Senzibilizirani čelik moguće je vratiti u početno stanje kratkotrajnim žarenjem na visokim temperaturama s naglim hlađenjem ili dugotrajnim žarenjem na nižim temperaturama. [1]

Dode li do duljeg zadržavanja austenitnog čelika između 540 °C i 900 °C doći će do nastanka nepoželjne sigma-faze s tetragonalnom kristalnom strukturom koja će uzrokovati pad otpornosti na koroziju u procjepu i rupičastu koroziju, pad lomne žilavosti i istežljivosti te

porast tvrdoće. Sigma-faza se inicijalno stvara na granici austenita i ferita te se dalje širi u ferit, a ukoliko dođe do njene pojave moguće ju je rastvoriti žarenjem iznad 1050 °C. Na nastanak sigma-faze značajno utječe udio delta-ferita. U austenitnim čelicima koji u mikrostrukturi nemaju delta-ferita teško može nastati sigma-faza pa čak i ako se čelik dulje vremena zadržava u temperaturnom rasponu od 600 °C do 900 °C, dok u onima s delta-feritom sigma-faze nastaje u vrlo kratkom vremenu. Nastankom sigma-faze udio delta-ferita se smanjuje, a raste udio austenita i same sigma-faze. [1, 7]

Tvrdoća austenitnih nehrđajućih čelika je do 260 HV. Granica razvlačenja je od 205 do 275 N/mm², a za čelike s povećanim udjelima mangana i nikla je od 345 do 480 N/mm². Istezljivost je od 40-60 %, a vlačna čvrstoća je od 520 do 760 N/mm² dok je za hladno vučenu žicu veća i od 1200 N/mm². Specifično svojstvo austenitnih čelika naspram ostalih nehrđajućih čelika je njihova nemagnetičnost ukoliko je njihova mikrostruktura potpuno austenitna, a ako imaju određen udio delta-ferita njihova magnetičnost blago raste. Očvršnuće austenitnih čelika moguće je hladnom deformacijom, a nije moguće faznom transformacijom. Izuzetak su specijalne vrste austenitnih čelika s visokim udjelom nikla te dodatkom titanija koje očvršćuju formiranjem precipitata gama-prim-faze. Kod austenitnih nehrđajućih čelika koji imaju udio mangana do 2 % i više od 7 % nikla moguća je martenzitna pretvorba te se ona može dogoditi u slučaju hlađenja čelika na vrlo niske temperature ili tijekom hladne deformacije s vrlo visokim stupnjem ugnječenja. Udio martenzita ovisi o temperaturi, stupnju hladne deformacije i o vrsti čelika. [1, 7]

2.1.1 Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika

Austenitni nehrđajući čelici posjeduju izrazito dobru zavarljivost osim onih koji radi lakše obradivosti sadrže veći udio sumpora, fosfora i selenija što ukazuje na to da zavarljivost ovisi o kemijskom sastavu čelika. Tijekom zavarivanja unosi se velika količina topline te zbog toga dolazi do promjene mikrostrukture osnovnog materijala u zoni utjecaja topline što može dovesti do pada svojstava zavarenog spoja. U mikrostrukturi može doći do izlučivanja karbida po granicama zrna tj. do senzibilizacije. Mogu se izlučiti i druge štetne faze poput sigma-faze što sve može dovesti do interkristalne korozije. [7, 8]

Prilikom zavarivanja austenitnih čelika povećana je sklonost deformacijama zbog visokog koeficijenta toplinske istežljivosti i niskog koeficijenta toplinske vodljivosti. Zbog povećane sklonosti deformacijama i postojanja određenih nečistoća skloni su i pojavi toplih pukotina. [9]

2.2 Martenzitni nehrđajući čelici

Osnovna karakteristika ove skupine nehrđajućih čelika je nešto lošija korozivna postojanost i bolja mehanička svojstva u odnosu na druge skupine zbog relativno niskog udjela kroma te visokog udjela ugljika. Iz navedenih razloga primjenjuju se kad su zahtijevana svojstva visoka čvrstoća i tvrdoća uz blaži zahtjev korozivne postojanosti. Zbog nižeg udjela legiranih elemenata cjenovno su prihvatljiviji od ostalih skupina nehrđajućih čelika. [1, 7]

Kaljenjem u ulju ili na zraku te naknadnim popuštanjem postiže se optimalna kombinacija mehaničkih svojstava i korozivne postojanosti. Zbog male toplinske vodljivosti nužno ih je polako ugrijavati na temperaturu austenitizacije. Temperatura austenitizacije ovisi o udjelu ugljika i kroma i tim je viša što je viši udio ugljika i kroma kako bi se što više ugljika i kroma otopilo u austenitu. [1, 7]

Konstruktivski martenzitni nehrđajući čelici sadrže do 0,3 % ugljika i imaju monofaznu martenzitnu mikrostrukturu jer je kod njih bitnija korozivna postojanost od visoke tvrdoće. Alatni martenzitni nehrđajući čelici sadrže veći udio ugljika kako bi im se u većini slučajeva mikrostruktura mogla sastojati od martenzita i karbida s ciljem povećanja tvrdoće odnosno otpornosti na abrazivno trošenje. [1, 2]

Osnovni legirani element ove skupine korozivno postojanih čelika je krom. Udio kroma u njima je od 12 % do 18 %, a udio ugljika je od 0,15 % do 1,2 %. Osim kroma mogu sadržavati i druge legirane elemente, a najčešće su to vanadij i molibden kako bi se povisila tvrdoća i postojanost svojstava na visokoj temperaturi. Ako se ovi legirani elementi otope u austenitu prije gašenja, snižavaju temperaturu martenzitne pretvorbe. [1]

U usporedbi s feritnim i austenitnim nehrđajućim čelicima imaju višu čvrstoću i tvrdoću te veću otpornost na trošenje. Karakterizira ih širok raspon vrijednosti čvrstoće i granice razvlačenja te tako granica razvlačenja može biti od 275 N/mm² u žarenom stanju do 1900 N/mm² u gašenom i popuštenom stanju. [1]

Maksimalna temperatura primjene je na 650 °C jer na višim temperaturama dolazi do pada mehaničkih svojstava i korozivne postojanosti. Za neke martenzitne čelike moguća je kratkotrajna primjena iznad 650 °C. Za razliku od austenitnih, svi martenzitni nehrđajući čelici su feromagnetični. Odlikuje ih i dobra otpornost na toplinski i mehanički umor. Od svih skupina korozivno postojanih čelika imaju lošiju zavarljivost jer pri hlađenju nakon zavarivanja u mikrostrukturi ostaje nepopušteni martenzit. [1, 2, 7]

Ako se udio ugljika smanji ispod 0,1 % dobit će se niskougljični martenzitni nehrđajući čelici koji se još popularno nazivaju supermartenzitni ili mekomartenzitni. Kod njih se legiranjem

niklom i molibdenom nastoji nadomjestiti smanjenje mehaničkih svojstava izazvano manjim udjelom ugljika. Odlikuje ih bolja zavarljivost, žilavost i korozijska postojanost u odnosu na druge martenzitne nehrđajuće čelike. [1, 2]

Uobičajeni slijed toplinske obrade kod martenzitnih nehrđajućih čelika je sljedeći:

1. meko žarenje (sferoidizacija)
2. austenitizacija
3. gašenje
4. duboko hlađenje (po potrebi)
5. popuštanje (po potrebi višestruko).[1]

Sferoidizacijskim ili mekim žarenjem preoblikuju se lamelarni ili mrežasti karbidi u kuglasti oblik. Provodi se dužim držanjem oko temperature A_1 ili osciliranjem oko te temperature. Postignutom mikrostrukturu ferita s kuglastim karbidima tijekom mekog žarenja smanjuje se tvrdoća, poboljšava oblikovljivost u hladnom stanju i obradivost odvajanjem čestica. Povećanjem temperature žarenja postiže se niža tvrdoća, bolja oblikovljivost, ali i veća opasnost od rasta zrna. [1, 10]

Na slici 4 vidi se mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 u meko žarenom stanju.



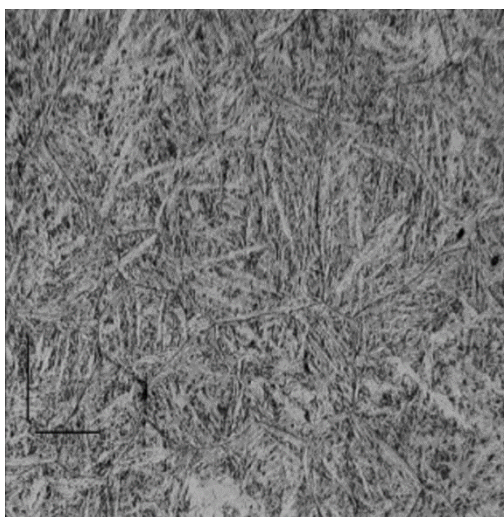
Slika 4. Prikaz mikrostrukture meko žarenog čelika X20Cr13 [11]

Cilj austenitizacije je postizanje austenitne mikrostrukture s potpuno ili djelomično otopljenim karbidima. Za postizanje željenih svojstava čelika ključni su parametri austenitizacije, a to su temperatura i trajanje austenitizacije. Višom temperaturom austenitizacije sve je više otopljenih karbida, a preostali karbidi bivaju sve krupniji. Također rastu austenitna zrna što je nepovoljno.

Preostali neotopljeni karbidi utječu na otpornost trošenju te na veličinu i rast austenitnog zrna jer se pozicioniraju po granicama zrna pa tako sprječavaju njihov rast.

Legirni elementi koji se otope u austenitu utječu na vrijednost temperature početka (M_s) i završetka (M_f) pretvorbe austenita u martenzit, na udio zaostalog austenita te na tvrdoću nakon kaljenja i popuštanja. [1]

Gašenje je nadkritično hlađenje i ono slijedi nakon austenitizacije. Iako je većina martenzitnih nehrđajućih čelika kaljiva na zraku gašenje se uglavnom provodi u ulju kako bi se osigurao potpuni prijelaz austenita u martenzit. Sporijim hlađenjem povećava se opasnost od nastanka precipitata i dolazi do nepotpune tvrdoće, a bržim hlađenjem se javlja opasnost od nastanka deformacija i pukotina. Nakon gašenja čelik je tvrd, izrazito krhak, pun zaostalih naprezanja, a ponekad se javlja i zaostali austenit. Cilj gašenja je da se postigne martenzitna ili martenzitno karbidna mikrostruktura. Ako se nakon gašenja u mikrostrukturi nalazi zaostali austenit čelik će imati nižu tvrdoću i nižu žilavost nakon popuštanja. Zaostali austenit može se izbjeći dubokim hlađenjem kod kojega sav zaostali austenit prelazi u martenzit ili višestrukim popuštanjem. Brzina dubokog hlađenja ne smije biti veća od $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ kako bi se spriječio toplinski šok. [1, 7]

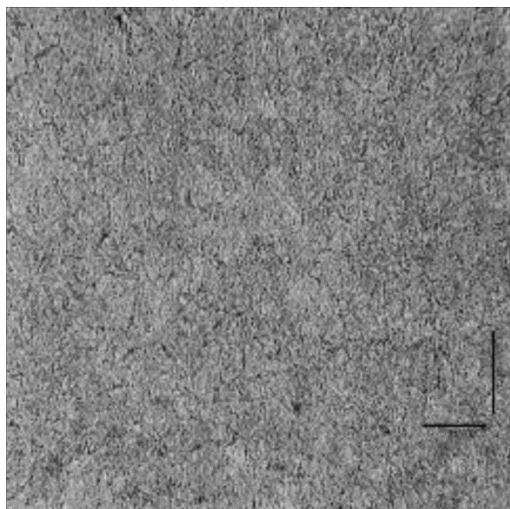


Slika 5. Mikrostruktura martenzitnog čelika s potpuno martenzitnom mikrostrukturuom [11]

Popuštanje je postupak ugrijavanja kaljenog čelika na neku temperaturu ispod temperature A_1 s ciljem povišenja žilavosti martenzita postignutog kaljenjem, smanjenja zaostalih naprezanja u martenzitu te postizanja dimenzijske stabilnosti pretvorbom zaostalog austenita u martenzit i karbid popuštanja. U većini slučajeva kod martenzitnih nehrđajućih čelika popuštanje je

visokotemperaturno ($400\text{ °C} < \vartheta_p < A_1$). Bitno je izbjeći temperature popuštanja oko 475 °C zbog pojave pada žilavosti poznate pod nazivom *krhkost 475 °C*. [1, 10]

Mikrostruktura popuštenog martenzitnog čelika prikazana je na slici 6.



Slika 6. Prikaz mikrostrukture duboko hlađenog i popuštenog martenzitnog čelika [11]

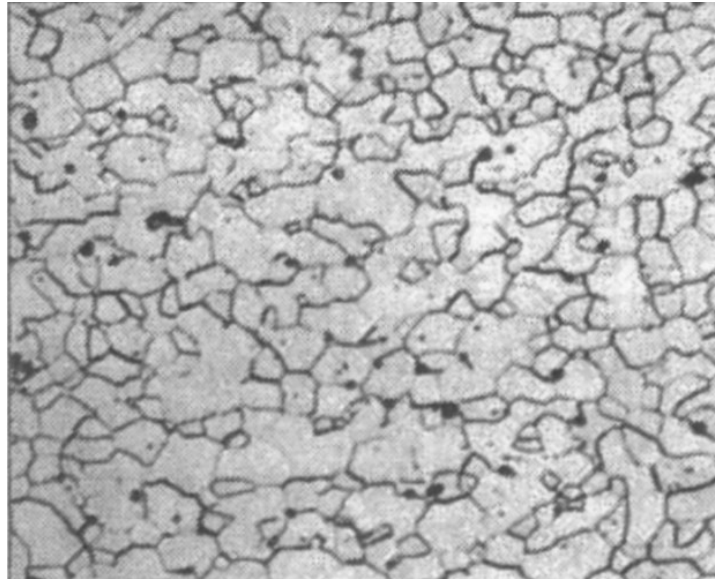
2.3 Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici temelje se na istom ternarnom sustavu Fe-Cr-C kao i martenzitni. Posjeduju dobru otpornost na napetosnu, rupičastu i koroziju u procjepu pogotovo u kloridnim medijima. Primjenjuju se kada je otpornost koroziji bitnija od mehaničkih svojstava poput čvrstoće, žilavosti i duktilnosti. Tijekom povijesti i danas feritni nehrđajući čelici su prvi izbor za primjenu ako nema potrebe za zavarivanjem. Zbog malog udjela dodatnih legiranih elemenata jeftiniji su od drugih skupina nehrđajućih čelika. Moguće ih je u potpunosti reciklirati, a udio recikliranog materijala u novim čelicima iznosi oko 60 %. [1, 6]

Osnovni legirni element feritnih nehrđajućih čelika je krom kojeg u ovim čelicima ima od 10,5 % do 30 %, ovisno o vrsti. Karakteristično je da sadrže manje od 0,1 % ugljika. Uz krom i ugljik mogu sadržavati i manju količinu molibdena, titanija, niobija i drugih. Ako nije potrebno izbjegava se dodavanje gamagenih legiranih elemenata. [1]

Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika može biti potpuno feritna, feritna s karbidima i feritno-martenzitna. [1, 3]

Na slici 7 prikazana je mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika.



Slika 7. Mikrostrukutra feritnog nehrđajućeg čelika [3]

Feritni nehrđajući čelici se mogu podijeliti prema sadržaju kroma na [1]:

- vrste s nižim udjelom kroma (10,5% Cr do 14% Cr) čija je karakteristika da imaju bolju korozijsku postojanost od ugljičnih čelika
- vrste sa srednjim udjelom kroma (14 %Cr do 18 %Cr) koje se primjenjuju u uvjetima jačeg korozijskog djelovanja
- vrste s visokim udjelom kroma (18 %Cr do 30 %Cr) čije su karakteristike da imaju bolju korozijsku postojanost čak i od austenitnih i martenzitnih nehrđajućih čelika, ali su relativno skupi i teže se obrađuju te su posebno osjetljivi na krhkost 475 °C.

Feritni nehrđajući čelici su feromagnetični. [1]

Ne primjenjuju se iznad 400 °C zbog pada žilavosti. Na višim temperaturama u mikrostrukтури feritnih čelika s udjelom kroma većim od 15 % može se izlučiti alfa-prim-faza koja se najjače izlučuje na temperaturi oko 475 °C (*krhkost 475 °C*). Moguće ju je ukloniti kratkotrajnim žarenjem na temperaturi između 550 °C i 600 °C. [1]

Osim navedene faze na još višim temperaturama (između 500 i 800 °C) kod čelika s udjelom kroma većim od 20 %, može se izlučiti sigma-faza koja također loše utječe na žilavost čelika. Uklanjanje sigma-faze moguće je kratkotrajnim žarenjem na temperaturi iznad 800 °C. [1]

Pri zavarivanju feritnih nehrđajućih čelika u području zavarenog spoja mogu se također izlučiti neke nepoželjne faze koje isto dovode do pada žilavosti (visoko-temperaturna krhkost). Čelici koji imaju nizak udio kroma i stabilizirani čelici nisu osjetljivi na pojavu ovakve krhkosti. [1]

Sve navedene faze djeluju loše i na korozijsku postojanost.[1]

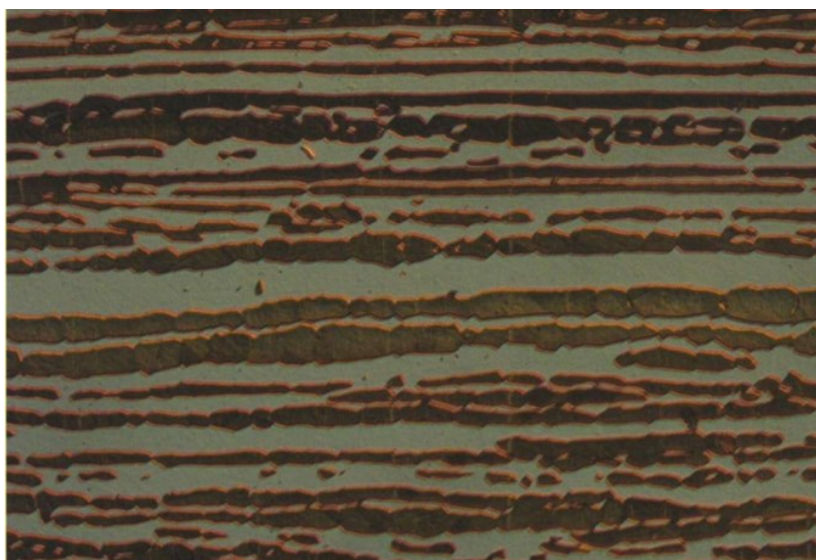
Jedna od novijih podskupina feritnih nehrđajućih čelika jesu superferitni nehrđajući čelici koji imaju povišenu otpornost na napetosnu, rupičastu i interkristalnu koroziju. Posjeduju povišenu žilavost na niskim temperaturama i povišenu granicu razvlačenja kao rezultat:

- povećane čistoće tj. zbroj udjela ugljika i dušika je manji od 0,02 %
- povišenog udjela kroma i nikla
- stabilizacije dodatkom titanija i niobija. [1]

2.4 Dupleks čelici

Dupleks čelici su svoj naziv dobili zbog vlastite dvofazne mikrostrukture koja je sastavljena od ferita s prostorno centriranom kubičnom BCC kristalnom strukturom i od austenita s plošno centriranom kubičnom FCC kristalnom strukturom. Omjer ferita i austenita u mikrostrukтури ovisi o kemijskom sastavu i toplinskoj obradi, a težnja je da bude jednak tj. 50:50. U praksi taj omjer varira od 40 % do 60 %. Među nehrđajućim čelicima proizvodnja dupleks čelika ima najveći trend rasta. Njihova glavna prednost pred ostalim skupinama nehrđajućih čelika je posjedovanje izvanredne korozijske postojanosti u kombinaciji s dobrim mehaničkim svojstvima. [1, 7]

Na slici 8 prikazana je tipična mikrostruktura nehrđajućeg dupleks čelika.



Slika 8. Mikrostruktura dupleks čelika [12]

Osnovni legirni elementi dupleks čelika su krom i nikal, a još se legiraju s dušikom, molibdenom, bakrom, silicijem i volframom. Elementi koji stabiliziraju ferit su balansirani s elementima koji stabiliziraju austenit. Udio kroma je između 21 % i 33 %, a udio nikla je između

4 % i 9 %. Povećanjem udjela kroma povećava se sklonost izlučivanju nepoželjnih faza, a povećanjem udjela nikla smanjuje se opasnost od izlučivanja nepoželjnih faza. [7]

Dupleks čelici su puno skuplji od austenitnih zbog visokog udjela legirnih elemenata i zahtjevne termomehaničke obrade. [1, 7]

Odlikuje ih viša granica razvlačenja, vlačna čvrstoća i tvrdoća od austenitnih nehrđajućih čelika, a žilavost im je između feritnih i austenitnih. Imaju sličnu korozijsku otpornost kao austenitni. Primjenjuju se isključivo ispod 315 °C jer postoji opasnost od pojave nepoželjnih mikrostrukturnih tvorevina, a donja granica primjene je -40 °C. Najopasnije nepoželjne strukturne tvorevine u dupleks čelicima su sigma-faza, chi-faza, kromovi nitridi i alfa-prim-faza. [7]

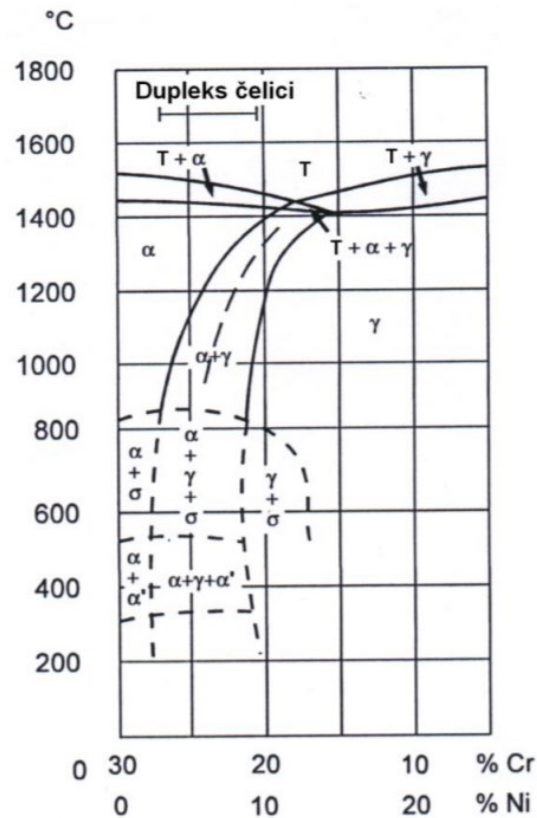
Podjela dupleks čelika napravljena je prema njihovoj korozijskoj postojanosti na rupičastu koroziju tj. prema vrijednosti njihove djelotvorne sume - DS (eng. PREN-pitting resistance equivalent number):

1. Fe-23Cr-4Ni-0,1N → dupleks čelici bez molibdena
2. Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-0,15N → dupleks čelici s 22 % kroma
3. Fe-25Cr-5Ni-2,5Mo-0,17N-Cu → dupleks čelici s 25 % kroma kod kojih je vrijednost djelotvorne sume manja od 40
4. Fe-25Cr-7Ni-3,5Mo-0,25N-W-Cu → super dupleks čelici kod kojih je vrijednost djelotvorne sume između 40 i 45
5. Fe-32Cr-7Ni-4Mo-0,5N-Cu → hiper dupleks čelici kod kojih je vrijednost djelotvorne sume veća od 45 [7]

Preko vrijednosti djelotvorne sume može se s velikom preciznošću procijeniti otpornost dupleks nehrđajućeg čelika prema rupičastoj koroziji. Određuje se prema izrazu [1]:

$$DS = \%Cr + 3,3 \cdot \%Mo + 16 \cdot \%N \quad (3)$$

Iz pseudobinarnog dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % željeza prikazanog na slici 9 može se vidjeti da svi dupleks čelici primarno kristaliziraju kao potpuni ferit. [7]



Slika 9. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % željeza [7]

Nakon primarne kristalizacije u ferit daljnjim hlađenjem počinje prekrystalizacija ferita u austenit koja se odvija prvo po granicama zrna, a onda i po određenim ravninama unutar feritnog zrna. Tijekom prekrystalizacije gamageni legirni elementi difundiraju u austenit, a alfa-geni legirni elementi difundiraju u ferit. Brzina ohlađivanja za određeni kemijski sastav podešava se tako da u temperaturnom rasponu između 1050 i 1150 °C u mikrostrukturi bude prisutno 50 % ferita i 50 % austenita. Nakon postizanja jednakog udjela ferita i austenita, daljnje hlađenje odvija se gašenjem u vodi kako bi se postignuta mikrostruktura zadržala i na sobnoj temperaturi. Gašenjem se sprečava formiranje nepoželjnih faza koje se mogu izlučiti na temperaturama ispod 1000 °C. [7]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1 Cilj rada i provođenje ispitivanja

Cilj ovog rada je karakterizacija zavarenog spoja između ploče i cijevi od austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X1CrNiMoCuN20-18-7. Zavarivanje je izvedeno postupkom elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (engl. Tungsten Inert Gas – TIG), a kao dodatni materijal korištena je niklova legura oznake NiCr22Mo9Nb.

U okviru planiranog ispitivanja provedeno je sljedeće:

- izrezivanje i priprema reprezentativnog metalografskog uzorka
- analiza makrostrukture i mikrostrukture
- mjerenje mikrotvrdoće HV0,2.

Mikrostruktura i mikrotvrdoća analizirane su u osnovnom metalu, metalu zavaru te u zoni utjecaja topline (ZUT-u).

3.2 Materijal za ispitivanje



Slika 10. Zavareni spoj ploče i cijevi od austenitnog nehrđajućeg čelika

Za istraživanje je korišten zavareni spoj između cijevi i ploče od istog austenitnog nehrđajućeg čelika, prikazan na slici 10. Debljina ploče iznosila je 15 mm, vanjski promjer cijevi bio je 219,1 mm, a debljina stijenke cijevi iznosila je 3,76 mm.

Zajamčeni kemijski sastav od strane proizvođača za cijev i ploču prikazan je u tablici 2. Proizvođač jamči i mehanička svojstva materijala od kojeg je izrađena cijev, tablica 3.

Tablica 2. Zajamčeni kemijski sastav čelika oznake X1CrNiMoCuN20-18-7

Maseni udio elemenata, %										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Cu	Mo	Fe
0,013	0,42	0,18	0,022	<0,010	20,3	17,8	17,8	0,80	6,1	ostatak

Tablica 3. Mehanička svojstva materijala cijevi zajamčena od proizvođača

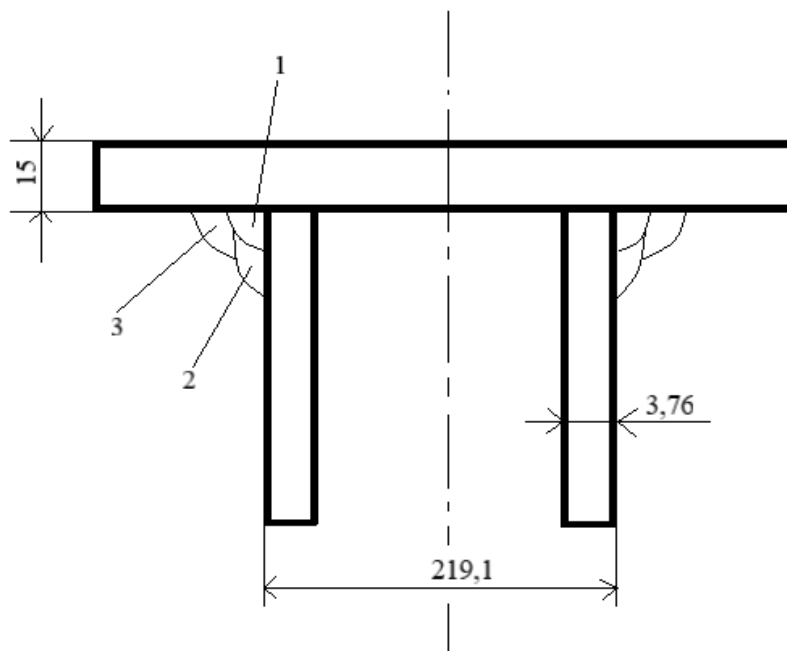
Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m N/mm ²	Istezljivost A %	Tvrdoća HRB
> 310	> 690	> 35	< 96

3.3 Zavarivanje spoja

Zavarivanje je provedeno TIG postupkom zavarivanja označenim oznakom 141 prema normi HRN EN ISO 4063:2012 [13]. Kod ovog postupka zavarivanja korištena je netaljiva volframova elektroda, a samo zavarivanje provedeno je u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Kao dodatni materijal korištena je puna žica promjera 2,4 mm od niklove legure oznake NiCr22Mo9Nb.

Prema normi HRN EN ISO 17659:2007 [14] vrsta zavarenog spoja je jednostrano zavaren kutni spoj.

Zavarivanje je provedeno u vodoravno-nadglavnom položaju oznake PD, u 3 prolaza, slika 11.



Slika 11. Prikaz zavarenog spoja i redosljed prolaza

3.4 Priprema uzorka za analizu mikrostrukture

Priprema uzorka za analizu mikrostrukture zavarenog spoja sastojala se od 5 koraka:

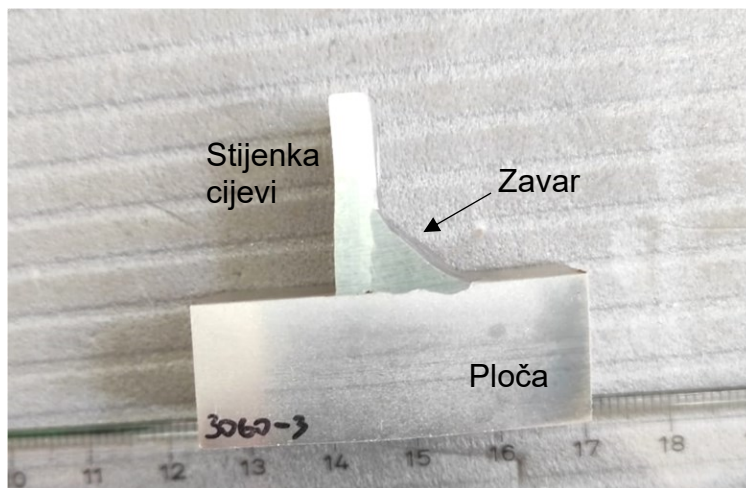
1. Izrezivanje reprezentativnog uzorka
2. Zalijevanje uzorka u polimernu masu
3. Brušenje
4. Poliranje
5. Nagrizanje

3.4.1 Izrezivanje uzorka

Za pripremu uzorka prvo je bilo potrebno izrezati uzorak iz početnog spoja. Izrezivanje uzorka provedeno je na tračnoj pili u Laboratoriju za zavarivanje na Zavodu za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Kako se zbog utjecaja topline prilikom rezanja ne bi promijenila mikrostruktura korišteno je sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje.

Na slici 12 prikazan je izrezani uzorak zavarenog spoja.

Postupak izrezivanja uzorka prikazan je na slikama 13 i 14.



Slika 12. Izrezani uzorak zavarenog spoja

Kako su dimenzije uzorka prikazanog na slici 12 bile prevelike za metalografski kalup, uzorak za analizu mikrostrukture naknadno je izrezan na konačne dimenzije, slika 15. Pritom se pazilo da ostane dovoljno materijala za analizu karakterističnih područja:

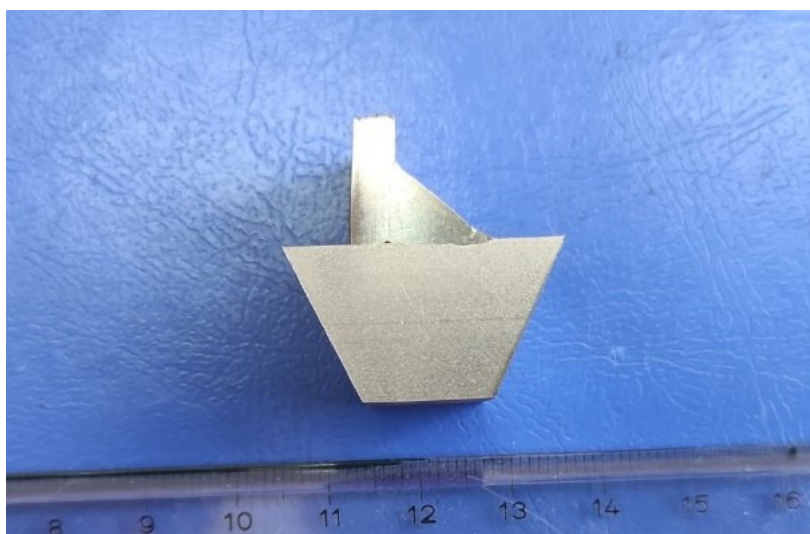
- osnovnog materijala ploče i cijevi
- zone utjecaja topline sa strane cijevi i ploče
- metala zavara.



Slika 13. Izrezivanje uzorka (stijenka cijevi)



Slika 14. Izrezivanje uzorka (ploča)



Slika 15. Izrezani uzorak

3.4.2 Zalijevanje uzorka polimernom masom

Zalijevanje uzorka polimernom masom se provodi radi zaštite uzorka, lakšeg rukovanja, stvaranja uniformnog oblika te kako bi se omogućilo pravilno brušenje i poliranje uzorka. Zalijevanje uzorka provedeno je u kalupu pneumatske preše naziva Buehler Pneumet Press, prikazanoj na slici 16. Uzorak je stavljen u kalup skupa s polimernim prahom koji se zbog visoke temperature i tlaka pretvorio u uniformnu polimernu masu pogodnog oblika za daljnju pripremu uzorka. Zalijevanje, brušenje te poliranje uzorka provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



Slika 16. Pneumatska preša Buehler Pneumet Press

Na slici 17 prikazan je metalografski uzorak nakon vađenja iz pneumatske preše.



Slika 17. Metalografski uzorak zavarenog spoja

3.4.3 Brušenje

Brušenje je postupak obrade odvajanjem čestica koji se provodi kako bi se postigla ravna i glatka površina uzorka uklanjanjem slojeva prljavštine, adsorbiranih plinova i plastično deformiranog sloja. Brušenje uzorka je provedeno na uređaju Presi Mitech 233. Korišteno je 5 brusnih papira, od najgrublje prema najfinijoj kvaliteti. Abrazivna zrna brusnih papira su od silicijevog karbida. Brzina okretaja brusne ploče iznosila je 300 okretaja u minuti. Tijekom cijelog procesa brušenja abradirana površina se hladi i podmazuje vodom. Uzorak se rotira za 90° između izmjena brusnih papira.

Parametri brušenja prikazani su u tablici 4, a uređaj za brušenje prikazan je na slici 17.

Tablica 4. Parametri brušenja

Korak brušenja	1.	2.	3.	4.	5.
Oznaka brusnog papira	P320	P600	P1200	P2400	P4000
Sila pritiska	ručna	ručna	ručna	ručna	ručna
Brzina vrtnje, o/min	300	300	300	300	300
Sredstvo za hlađenje	voda	voda	voda	voda	voda



Slika 18. Uređaj za brušenje Presi Minitex 233

3.4.4 Poliranje

Poliranje, kao i brušenje je postupak strojne obrade koji se koristi za uklanjanje brazda od brušenja kako bi se dobila glatka i reflektirajuća površina pogodna za analizu mikrostrukture. Za poliranje se umjesto brusnog papira koristi fina tkanina koja se stavlja na rotirajući dio uređaja. Poliranje je provedeno u dva koraka, u prvom koraku abrazivna zrna veličine $3\ \mu\text{m}$ nalaze se u dijamantnoj pasti koja se nanosi na tkaninu, a za podmazivanje i hlađenje se koristi lubrikant umjesto vode. Nakon toga slijedi drugi korak u kojem se koristi suspenzija koloidnog silicijevog dioksida koja ima funkciju poliranja, hlađenja i podmazivanja. Veličina abrazivnih zrna u suspenziji iznosi $0,03\ \mu\text{m}$.

U oba koraka brzina vrtnje bila je 150 okretaja u minuti.

Parametri poliranja prikazani su u tablici 5.

Poliranje je provedeno na uređaju Struers DAP-V prikazanom na slici 19.

Tablica 5. Parametri poliranja

Korak poliranja	1.	2.
Materijal abrazivnog zrna	Dijamant	Silicijev dioksid
Veličina abrazivnog zrna	3 μm	0,03 μm
Sila pritiska, N	30	30
Brzina vrtnje, o/min	150	150



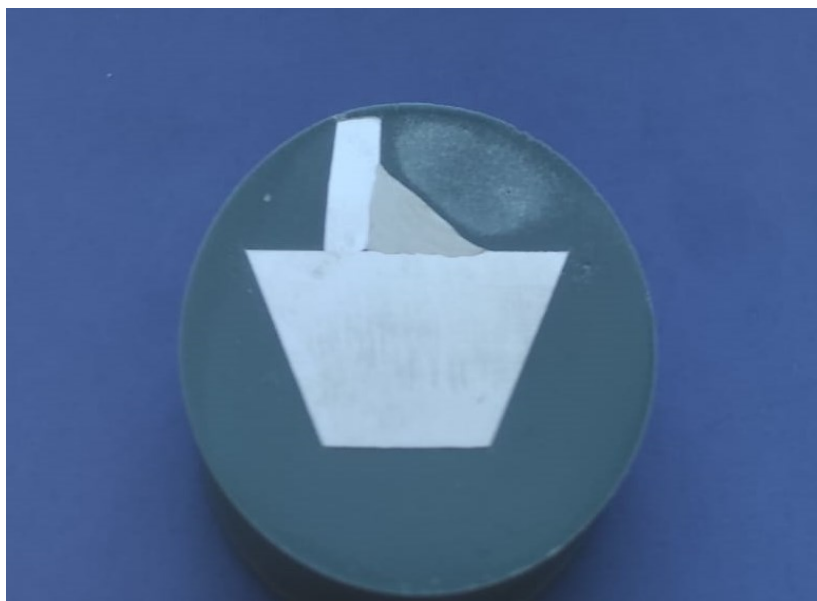
Slika 19. Uređaj Struers DAP-V

3.4.5 Nagrizanje

Nakon poliranja površina uzorka je glatka i ravna te je spremna za analizu u poliranom stanju. Kod zavarenih spojeva u poliranom stanju moguće je vidjeti eventualne šupljine, pukotine, nakupine troske i druge nepravilnosti u zavarenom spoju. Nakon toga površina uzorka nagrižena je u 10 %-tnoj otopini oksalne kiseline kako bi se mikrostruktura osnovnog materijala

(ploče i cijevi) i metala zavara učinila vidljivom. Zbog toga što se radi o nehrđajućem čeliku bilo je potrebno provesti elektrokemijsko nagrivanje. Nagrivanje se provelo uz jakost električne struje od 12 A i napon od 10 V. Uzorak se nagrivoao 1 minutu. Nagrivanje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala na Zavodu za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Nagriveni uzorak prikazan je na slici 20.



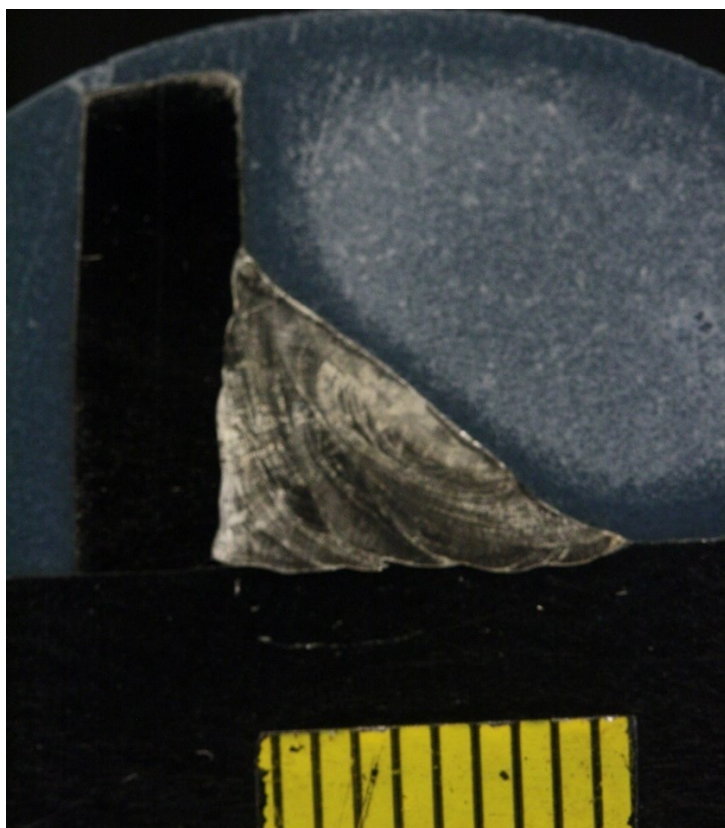
Slika 20. Nagriveni uzorak

3.5 Analiza makrostrukture i mikrostrukture

Analiza makrostrukture i mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Analiza je provedena u poliranom i u nagriženom stanju.

3.5.1 Analiza makrostrukture

U poliranom stanju na uzorku zavarenog spoja nisu uočene nikakve nepravilnosti osim malog neprovarenog dijela u korijenu zavora. Makrostruktura zavarenog spoja u nagriženom stanju fotografirana fotoaparatom Canon 1000D prikazana je na slici 21. Na slici se jasno vidi geometrijski oblik zavora koji nije u potpunosti simetričan odnosno položena stranica zavora je duža od okomite, ali je u granicama dopuštenog odstupanja. Jasno se vide i pojedini prolazi. I u nagriženom stanju vidi se mali neprovareni dio korijena zavora. Do ove pogreške moglo je doći zbog nepravilne pripreme spoja, neispravnih parametara zavarivanja ili nepravilne tehnike rada. Moguće da se radilo o premaloj struji zavarivanja, prevelikoj debljini elektrode ili lošem njihanju zavarivača. [15]



Slika 21. Makrostruktura zavarenog spoja čelika X1CrNiMoCuN20-18-7

3.5.2 Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51, prikazanom na slici 22.



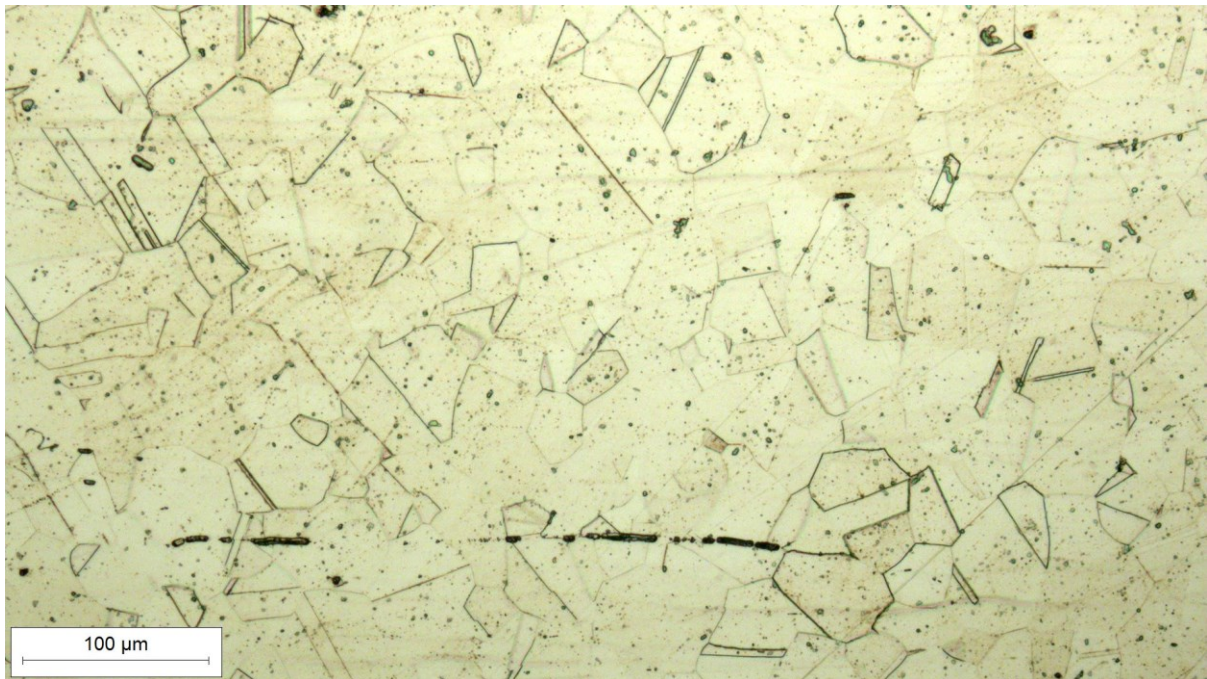
Slika 22. Svjetlosno mikroskop Olympus GX51

Kod analize mikrostrukture zavarenog spoja osobita pozornost posvećuje se zoni utjecaja topline (ZUT-u), metalu zavora i osnovnom materijalu, u korijenu, tjemenu i sredini zavora.

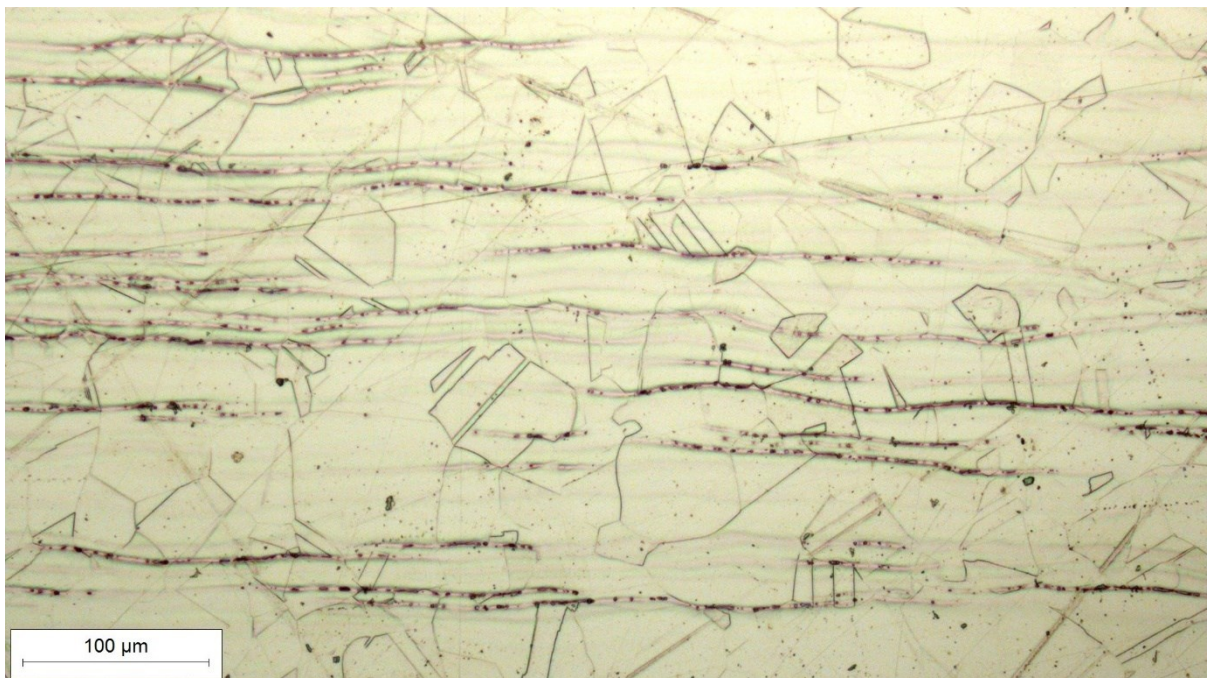
U poliranom stanju nisu uočene nikakve nepravilnosti ni u jednom od ova tri dijela.

Na slikama 23, 24 i 25 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala ploče i to njezinog gornjeg, srednjeg i donjeg dijela u nagriženom stanju.

Mikrostruktura se sastoji od austenita i malog udjela delta-ferita. Na slikama se jasno vide austenitni kristali blizanci te trakaste nakupine delta-ferita koji je usmjeren zbog ugnječenja ploče. Trakice delta-ferita nisu homogeno raspoređene po poprečnom presjeku ploče. U središnjem dijelu presjeka (oko 6 %) ima ih puno više nego na rubovima (1-2 %).



Slika 23. Mikrostruktura gornjeg dijela ploče snimljena pri povećanju 200×

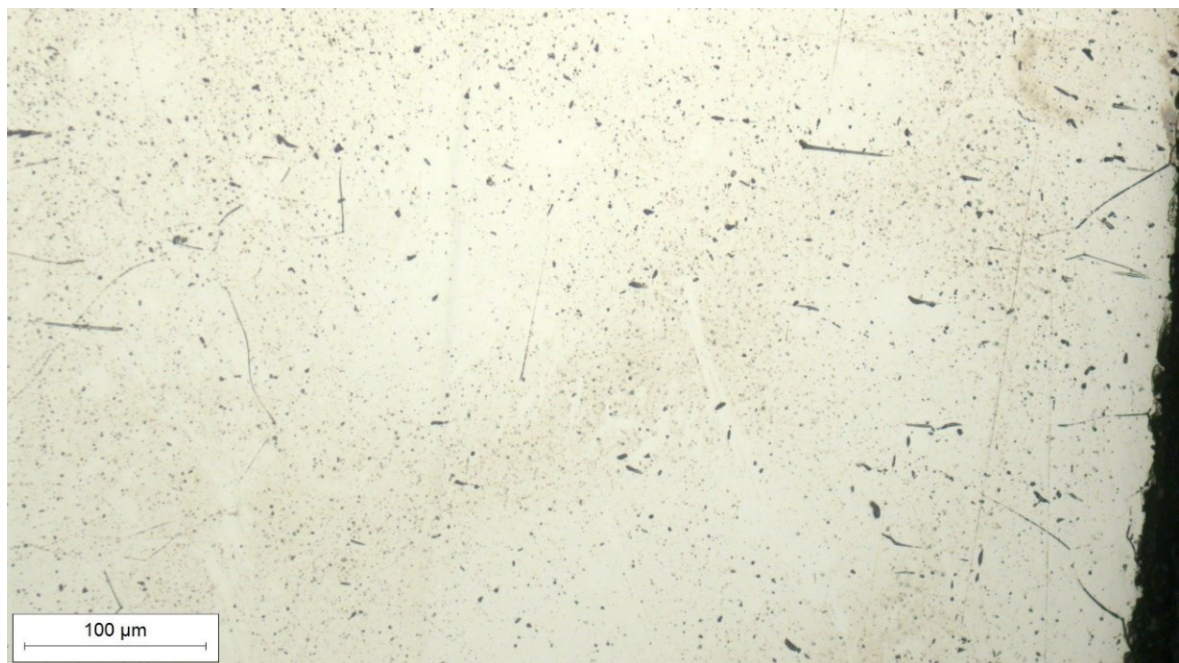


Slika 24. Mikrostruktura srednjeg dijela ploče snimljena pri povećanju 200×

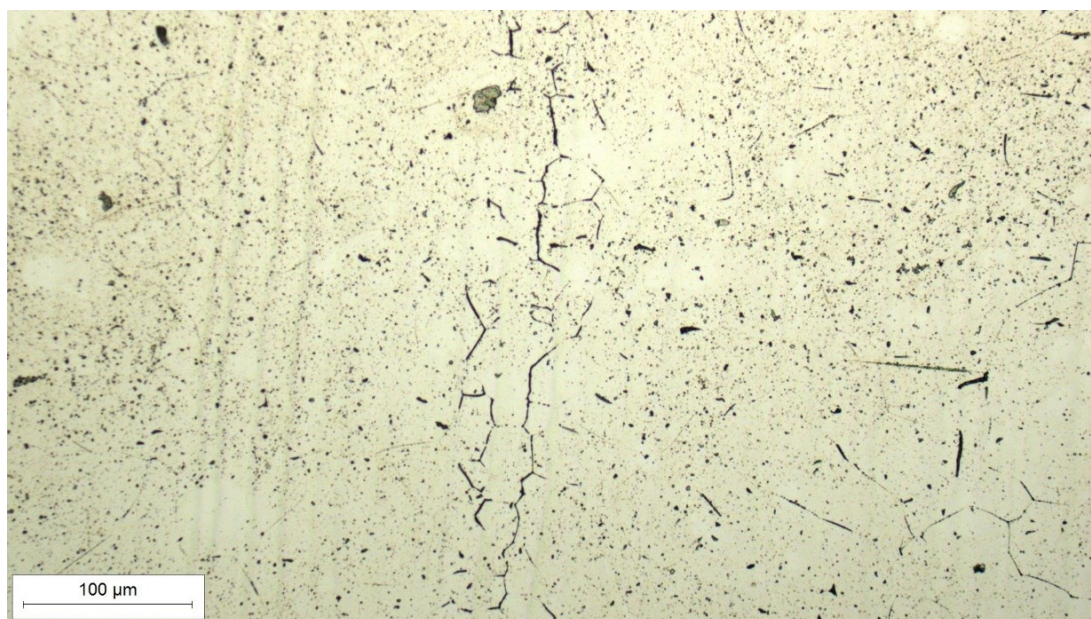


Slika 25. Mikrostruktura donjeg dijela ploče snimljena pri povećanju 200×

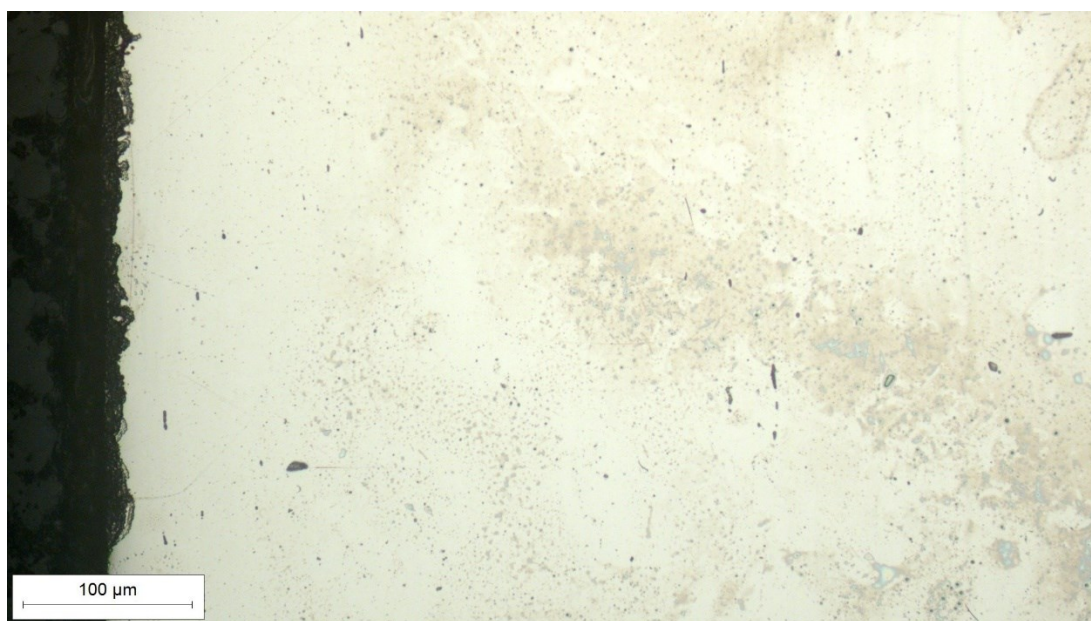
Na slikama 26, 27 i 28 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala cijevi, odnosno mikrostruktura uz vanjski dio stijenke, u sredini presjeka i uz unutarnji dio stijenke cijevi. Mikrostruktura nije dovoljno nagrižena i samo se u sredini presjeka stijenke cijevi vide granice austenitnih zrna. Vidi se dosta točkastih nakupina te mjestimice izdužena zrna delta-ferita.



Slika 26. Mikrostruktura uz vanjski dio stijenke cijevi snimljena pri povećanju 200×



Slika 27. Mikrostruktura u sredini presjeka cijevi snimljena pri povećanju 200×



Slika 28. Mikrostruktura uz unutarnji dio stijenke cijevi snimljena pri povećanju 200×

Na slici 29 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline sa strane ploče od čelika oznake X1CrNiMoCuN20-18-7, u tjemenu zavora. Linija staljivanja je jasno izražena, zona utjecaja topline je uska, a austenitna zrna su malo krupnija nego u osnovnom materijalu dalje od zavarenog spoja.

Na slici 30 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline sa strane cijevi. Mikrostruktura se ne vidi jasno zbog nedovoljnog nagrivanja. Sredstvo za nagrivanje je puno intenzivnije nagrivalo metal zavara nego osnovni materijal. Da je nagrivanje trajalo dulje zona utjecaja topline bi se bolje vidjela, ali se ni bi vidjela mikrostruktura metala zavara.



Slika 29. Zona utjecaja topline sa strane ploče snimljena pri povećanju 100×



Slika 30. Zona utjecaja topline sa strane cijevi snimljena pri povećanju 100×

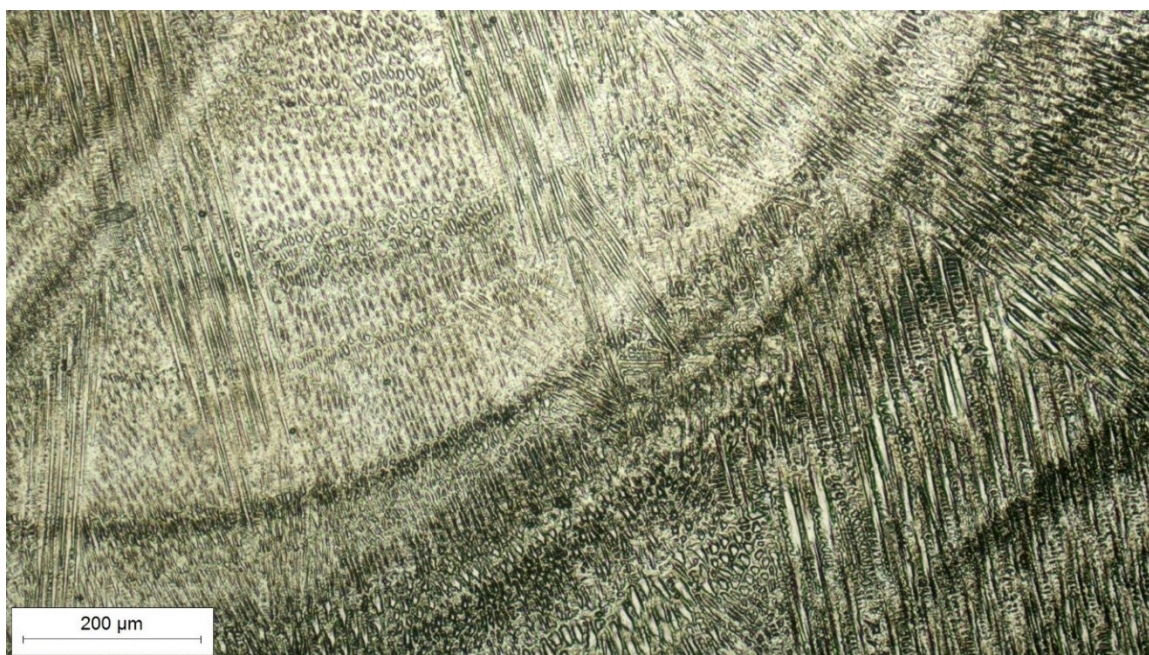
Na slikama 31,32 i 33 prikazana je mikrostruktura metala zavara u tjemenu, sredini i korijenu zavarenog spoja.

U svim trima područja vidi se tipična ljevačka dendritna mikrostruktura koja je karakteristična za metal zavara. U sredini se mjestimice jasno vide pojedini prolazi.

U korijenu zavara na slici 33 detaljnije se vidi nepotpuni provar.



Slika 31. Tjeme metala zavara snimljeno pri povećanju 100×



Slika 32. Sredina metala zavara snimljena pri povećanju 100×



Slika 33. Korijen metala zavara snimljen pri povećanju 50×

3.6 Mjerenje mikrotvrdoće uzorka

Ispitivanje mikrotvrdoće provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje na uređaju za mjerenje mikrotvrdoće PMT-3, prikazanom na slici 34. Mjerenje je provedeno metodom po Vickersu kod koje je utiskivač dijamantna četverostrana piramida s kutom između stranica od 136° . Dobivena vrijednost tvrdoće ovisi o veličini otiska. [16]

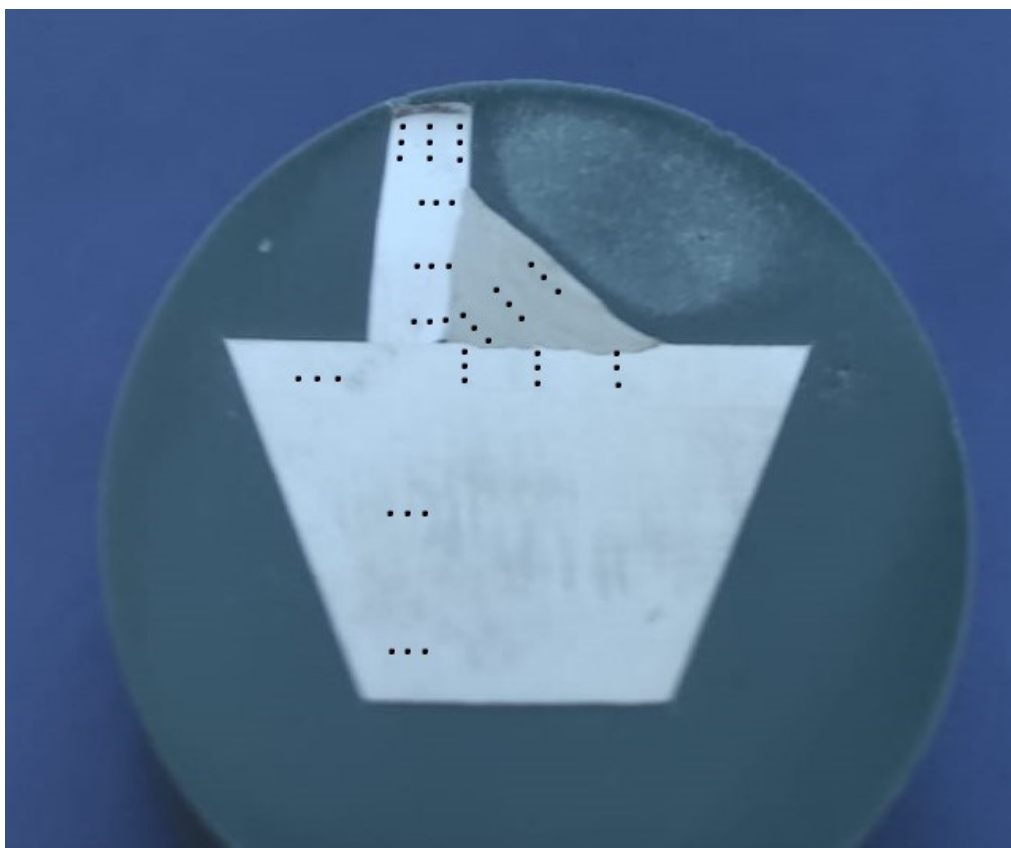
Za mjerenje mikrotvrdoće korišten je uteg mase 200 grama odnosno izmjerene su vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2. Uzorak se učvrsti na podlogu uređaja, zatim se pomoću mikroskopa odredi mjesto na kojem se utiskuje piramida nakon čega se podloga zarotira tako da određeno mjesto bude točno ispod utiskivača. Pomicanjem polugice piramida se spušta na uzorak i opterećuje ga zbog mase utega silom od 1,96 N te se u tom položaju drži 15 sekundi nakon čega slijedi rasterećenje i ponovna rotacija podloge u početni položaj, kako bi se očitale vrijednosti u lijevom i desnom vrhu otiska baze odnosno dobila duljina dijagonale otiska. Iz poznate duljine dijagonale moguće je izračunati vrijednost tvrdoće.



Slika 34. Uređaj za mjerenje mikrotvrdoće PMT-3

Mikrotvrdoća je mjerena u zoni utjecaja topline sa strane ploče i sa strane cijevi, u metalu zavara te osnovnim materijalima ploče i cijevi. U zoni utjecaja topline mjerenje je provedeno je s obje strane zavara u tjemenu, korijenu i sredini zavara. U metalu zavara mjerenje je provedeno u tjemenu, sredini i korijenu. Na osnovnom materijalu ploče mjerenje je provedeno u blizini donjeg i gornjeg ruba te u sredini poprečnog presjeka. U osnovnom materijalu cijevi tvrdoća je izmjerena uz unutarnji i vanjski rub stijenke cijevi te u sredini presjeka stijenke.

Područja mjerenja prikazana su na slici 35.



Slika 35. Područja na kojima je mjerena mikrotvrdoća HV0,2

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće u osnovnom materijalu ploče prikazani su u tablici 6, a rezultati mjerenja mikrotvrdoće u osnovnom materijalu cijevi prikazani su u tablici 7.

Vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene u zoni utjecaja topline sa strane ploče prikazani su u tablici 8, a sa strane cijevi u tablici 9.

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće u metalu zavara prikazani su u tablici 10.

Tablica 6. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu ploče

	gornji rub	sredina	donji rub
1.	184	167	161
2.	176	163	169
3.	181	172	167
srednja vrijednost	180	167	166

Tablica 7. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu cijevi

	unutarnja dio stijenke	sredina	vanjski dio stijenke
1.	200	221	211
2.	202	224	205
3.	194	227	197
srednja vrijednost	199	224	204

Tablica 8. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u ZUT-u sa strane ploče

	korijen	sredina	tjeme
1.	231	181	214
2.	234	174	217
3.	224	184	211
srednja vrijednost	230	180	214

Tablica 9. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u ZUT-u sa strane cijevi

	korijen	sredina	tjeme
1.	231	257	211
2.	293	245	200
3.	249	257	211
srednja vrijednost	258	253	210

Tablica 10. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u metalu zavara

	korijen	sredina	tjeme
1.	303	202	245
2.	293	208	241
3.	278	200	217
srednja vrijednost	291	203	234

4. OSVRT NA REZULTATE

4.1 Osvrt na rezultate analize makrostrukture i mikrostrukture zavarenog spoja

Analiziranjem makrostrukture uzorka uočen je nesimetričan oblik zavarenog spoja koji je u granicama dopuštenog odstupanja. Duljina katete kutnog zavara sa strane cijevi kraća je od duljine katete sa strane ploče. Jasno se vide pojedini prolazi i nepotpuno provareni dio u korijenu zavara.

Prilikom analize mikrostrukture osnovnog materijala ploče i cijevi koji su od istog čelika oznake X1CrNiMoCuN20-18-7 uočeno je da postoji velika razlika u izgledu njihove mikrostrukture. U osnovnom materijalu ploče jasno se vide austenitna zrna i trakaste nakupine delta-ferita. Volumni udio delta-ferita u središnjem dijelu poprečnog presjeka ploče iznosi oko 6 %, a na rubovima oko 1 %. U mikrostrukturi osnovnog materijala cijevi, zbog nedovoljne nagriženosti, samo se u sredini presjeka stijenke cijevi djelomično vide granice austenitnih zrna. Uočene su i točkaste nakupine te mjestimično izdužena zrna delta-ferita.

U zoni utjecaja topline sa strane ploče jasno je izražena linija staljivanja, zona utjecaja topline je uska, a austenitna zrna su krupnija nego u osnovnom materijalu ploče. Linija staljivanja sa strane cijevi također je jasno izražena, ali zona utjecaja topline nije jasno vidljiva zbog nedovoljne nagriženosti. Ako bi se vrijeme nagrizanja produljilo i mikrostruktura ZUT-a učinila vidljivom, metal zavara bi bio previše nagrižen

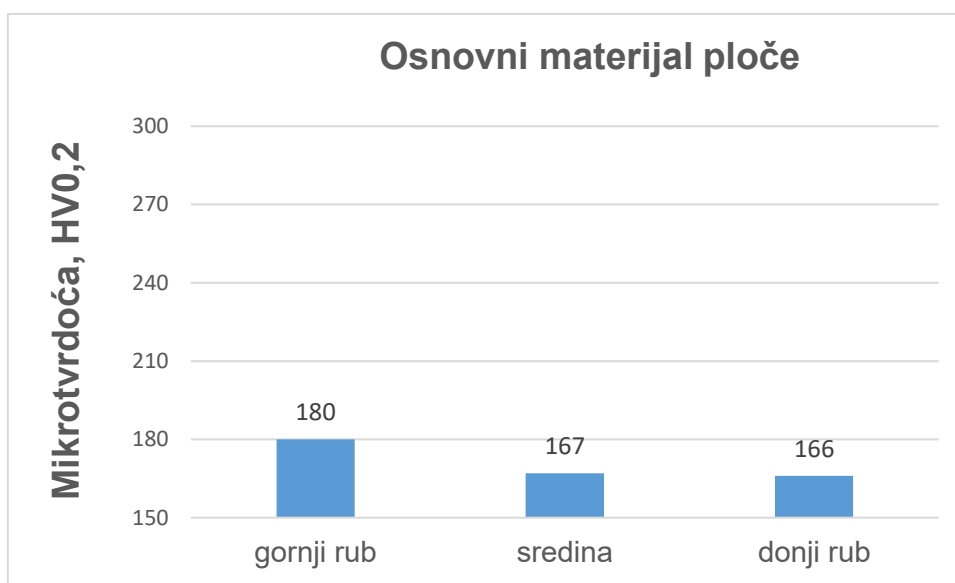
Mikrostruktura metala zavara je tipična ljevačka dendritna mikrostruktura bez uočenih nepravilnosti. U sredini i korijenu metala zavara vide se pojedini prolazi.

4.2 Osvrt na rezultate mjerenja mikrotvrdoće HV0,2

Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2 pokazalo je, iako su ploča i cijev od istoga materijala, da se njihove vrijednosti mikrotvrdoće razlikuju. Također se razlikuju vrijednosti mikrotvrdoće na rubovima i sredini poprečnog presjeka, kako ploče tako i stijenke cijevi.

Mikrotvrdoća osnovnog materijala na poprečnom presjeku ploče iznosi između 166 HV0,2 i 180 HV0,2. Najviše vrijednosti izmjerene su na gornjem rubu poprečnog presjeka, a sredina i donji rub imaju podjednake vrijednosti.

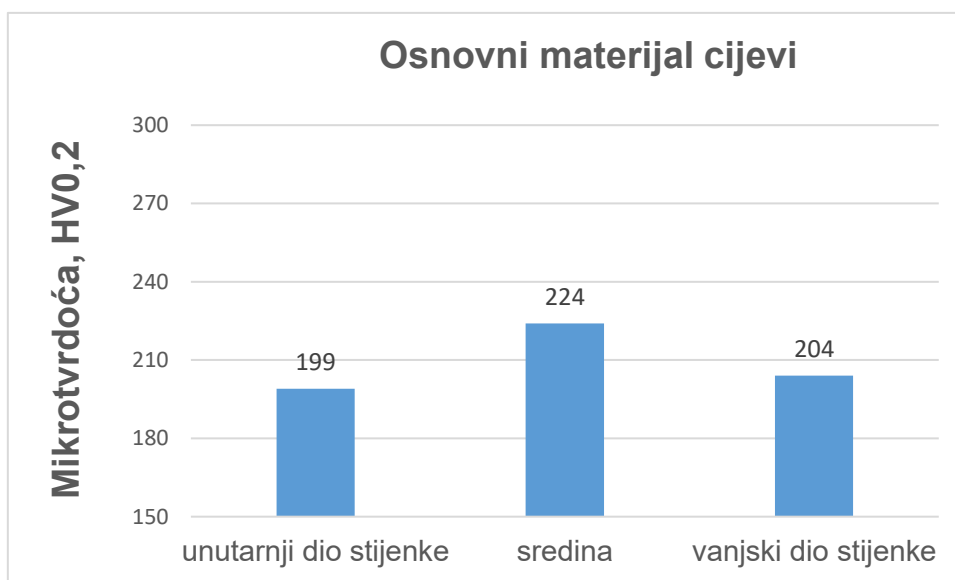
Na slici 36 prikazan je dijagram u kome se vide vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 osnovnog materijala ploče.



Slika 36. Mikrotvrdoća HV0,2 osnovnog materijala ploče

Mikrotvrdoća osnovnog materijala na poprečnom presjeku stijenke cijevi iznosi od 199 HV0,2 do 224 HV0,2. Najviše vrijednosti izmjerene su u sredini poprečnog presjeka stijenke, a na unutarnjem i vanjskom dijelu presjeka vrijednosti su podjednake.

Na slici 37 prikazan je dijagram u kojem se vide vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 osnovnog materijala cijevi.

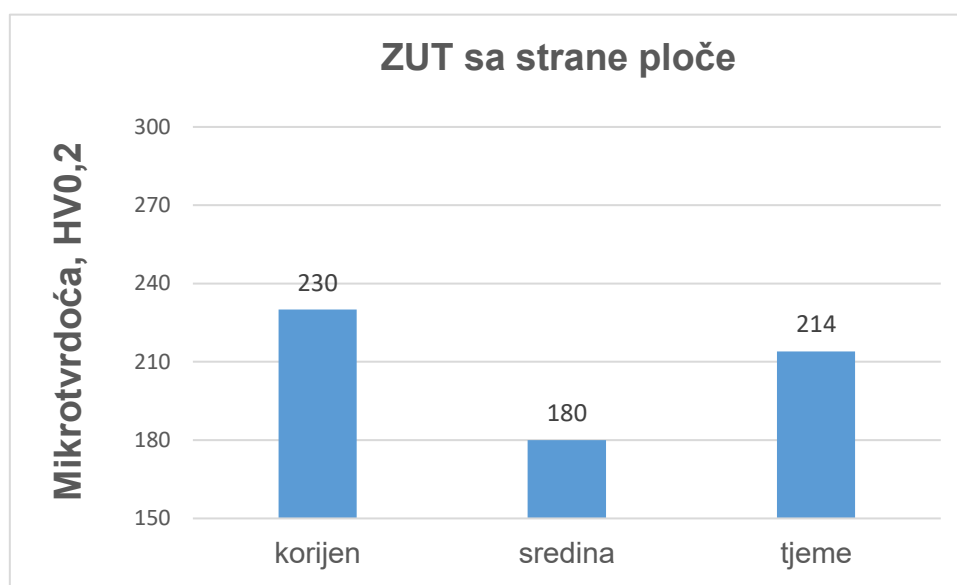


Slika 37. Mikrotvrdoća HV0,2 osnovnog materijala cijevi

Obzirom na veliku količinu unošenja topline prilikom zavarivanja vrijednosti mikrotvrdoće u zonama utjecaja topline značajno su više od vrijednosti mikrotvrdoće u osnovnom materijalu ploče i cijevi.

Sa strane ploče vrijednosti mikrotvrdoće veće su za 13-50 HV0,2 u usporedbi sa vrijednostima dobivenim na ploči te iznose između 180 HV0,2 i 230 HV0,2. Najveće vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u korijenu, a najmanje u sredini zavarenog spoja.

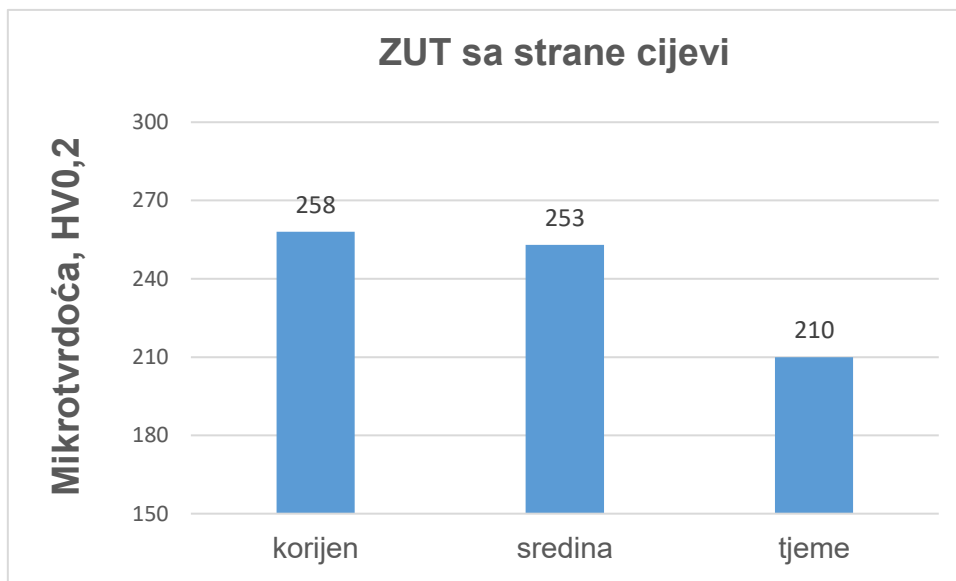
Na slici 38 prikazan je dijagram u kojem se vide vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 zone utjecaja topline sa strane ploče.



Slika 38. Mikrotvrdoća ZUT-a sa strane ploče

U zoni utjecaja topline sa strane cijevi izmjerene su više vrijednosti mikrotvrdoće nego sa strane ploče. Vrijednosti mikrotvrdoće nalaze se u rasponu od 210 HV0,2 do 258 HV0,2. Najveće vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u korijenu, a najmanje u tjemenu zavarenog spoja.

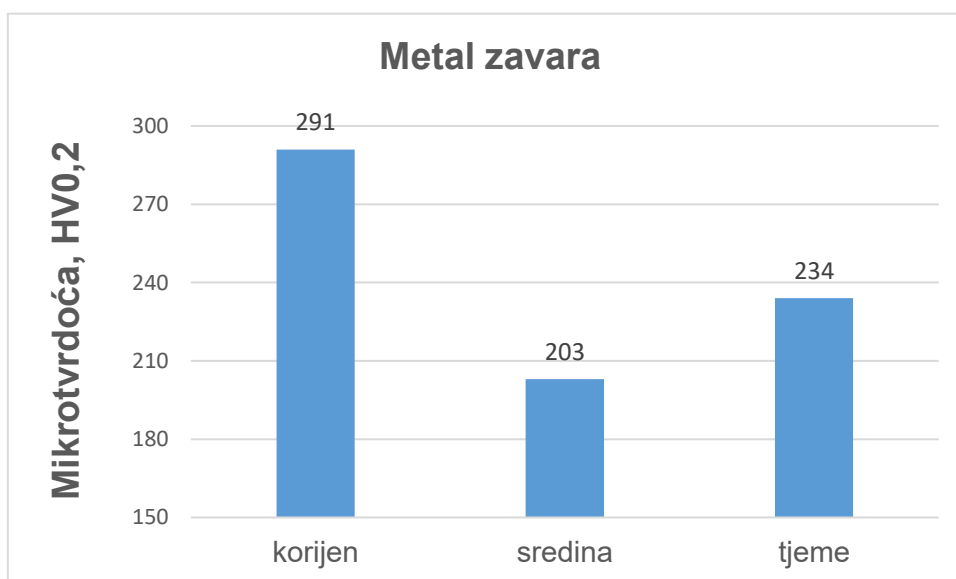
Na slici 39 prikazan je dijagram u kojem se vide vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 zone utjecaja topline sa strane cijevi.



Slika 39. Mikrotvrdoća ZUT-a sa strane cijevi

Najveće vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 izmjerene su u metalu zavara i nalaze se u rasponu od 203 HV0,2 do 291 HV0,2. Najviša vrijednost izmjerena je u korijenu, a najmanja u sredini metala zavara.

Na slici 40 prikazan je dijagram u kojem se vide vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 metala zavara.



Slika 40. Mikrotvrdoće metala zavara

Ako se promatra cijeli zavareni spoj vrijednosti mikrotvrdoće kreću se u rasponu od 166 HV_{0,2} do 291 HV_{0,2}.

Zanimljivo je uočiti da se najveće izmjerene srednje vrijednosti mikrotvrdoće zavarenog spoja nalaze u korijenu i zonama utjecaja topline kod korijena.

Rasipanja vrijednosti mikrotvrdoće najveća su u zoni utjecaja topline sa strane cijevi.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je karakterizacija kutnog zavarenog spoja između cijevi i ploče austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X1CrNiMoCuN20-18-7.

Na temelju rezultata provedenih analiza i ispitivanja moguće je zaključiti sljedeće:

- Analizom makrostrukture utvrđeno je da zavar ima nesimetričan oblik koji je ipak u granicama dopuštenog te da korijen zavara nije potpuno provaren. U metalu zavara mogu se razlučiti pojedini prolazi.
- Osnovni materijal ploče ima tipičnu austenitnu mikrostrukturu s manjim udjelom usmjerenog delta-ferita (< 6 %).
- Mikrostruktura osnovnog materijala stijenke cijevi također je sastavljena od austenita i manjeg udjela delta-ferita. Uočeno je i dosta točkastih nakupina koje nije bilo moguće identificirati na svjetlosnom mikroskopu.
- Područje ZUT-a sa strane ploče je usko s jasno izraženom linijom staljivanja. Mikrostruktura je austenitna s nešto krupnijim zrnima nego što su u osnovnom materijalu ploče. Linija staljivanja sa strane cijevi jasno je izražena, a mikrostruktura ZUT-a nije vidljiva zbog nedovoljnog nagrizanja.
- Metal zavara ima tipičnu ljevačku dendritnu mikrostrukturu s jasno vidljivim pojedinim prolazima.
- Najviše vrijednosti mikrotvrdoće u zavarenom spoju izmjerene su u metalu zavara, nešto niže u zoni utjecaja topline, a najniže vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u osnovnom materijalu ploče što znači da je unesena toplina utjecala na povećanje mikrotvrdoće. Mikrotvrdoća u korijenu zavara viša je nego u sredini i tjemenu zavara.

LITERATURA

- [1] V. Rede: Korozijski postojani čelici, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.
- [2] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [3] S. Kožuh: Specijalni čelici – skripta, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [4] https://www.researchgate.net/figure/Binary-iron-chromium-equilibrium-phase-diagram-15-18_fig2_315655489, 20.02.2022.
- [5] Schaeffler: Constitution diagram for stainless steel, Metal Progress, vol. 56, no. 11, 1949.
- [6] John C. Lippold, Damian J. Kotecki: Welding metallurgy and weldability of stainless steels, Hoboken, New Jersey, 2005.
- [7] V. Rede: Nehrdajući čelici, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [8] Z. Lukačević: Zavarivanje, Slavonski Brod, 1998.
- [9] I. Juraga, V. Šimunović, I. Stojanović: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje, Pula, 2007.
- [10] M. Stupnišek, F. Cajner, Osnove toplinske obradbe metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [11] Barlow: The effect of austenitising and tempering parameters on the microstructure and hardness of martensitic stainless steel AISI 420, Dissertation (MSc), University of Pretoria, 2010.
- [12] V. Rede: Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2004.
- [13] HRN EN ISO 4063:2012
- [14] HRN EN ISO 17659:2007
- [15] I. Juraga, K. Ljubić, M. Živčić, I. Garašić: Pogreške u zavarenim spojevima, Zagreb, 2015.
- [16] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček, L. Čurković: Materijali 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.