

Mikrostrukturne promjene pri izradi cijevi iz lima od austenitnog nehrđajućeg čelika

Petek, Martin

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:235:677865>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Martin Petek

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Martin Petek

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na ukazanom povjerenju i stručnoj pomoći tokom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem laborantu Ivanu Vovku na pomoći prilikom provođenja svih ispitivanja.

Zahvaljujem se poduzeću Oprema d.d. na uzorcima, dokumentaciji i općoj podršci u izradi ovog rada.

Na kraju se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci tokom studija.

Martin Petek



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:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARTIN PETEK** Mat. br.: **0035196568**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mikrostrukturne promjene pri izradi cijevi iz lima od austenitnog nehrđajućeg čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Microstructural changes during fabrication of pipe from austenitic stainless steel sheet**

Opis zadatka:

Austenitni nehrđajući čelici pripadaju skupini specijalnih konstrukcijskih čelika, a njihovo osnovno obilježje je velika korozivna postojanost u nizu agresivnih medija zbog čega se primjenjuju više od svih drugih nehrđajućih čelika. U određenim uvjetima kod ovih čelika može se pojaviti interkristalna korozija, a da bi se ova mogućnost svela na najmanju moguću mjeru, razvijeni su austenitni nehrđajući čelici sa sniženim udjelom ugljika. Oni se primjenjuju u vrlo zahtjevnim uvjetima u prehrambenoj, kemijskoj, farmaceutskoj i drugim granama industrije. U diplomskom radu potrebno je analizirati sve mikrostrukturne promjene koje nastaju u austenitnom nehrđajućem čeliku oznake X2CrNi18-9 pri izradi cijevi unutarnjeg promjera 8 mm i debljine stijenke 0,5 mm. Cijevi se izrađuju od lima koji se reže na potrebne dimenzije, postupno se oblikuje u cijev, a nakon toga zavaruje postupkom plazma zavarivanja. Zavarene cijevi se kalibriraju i na kraju žare na 1050 °C. Cijevi se primjenjuju u prehrambenoj industriji. Posebnu pozornost treba posvetiti mikrostrukturnim promjenama u području zavarenog spoja.

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

Zadatak zadan:
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
11. srpnja 2018.
12. srpnja 2018.
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:
Rede
prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:
Runje
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. NEHRĐAJUĆI ČELICI	2
2.1. Feritni nehrđajući čelici	4
2.2. Austenitni nehrđajući čelici	5
2.3. Martenzitni nehrđajući čelici	10
2.3.1. Toplinska obrada martenzitnih nehrđajućih čelika [3]	11
2.3.2. Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika [2, 8, 3].....	12
2.4. Dupleks nehrđajući čelici.....	15
3. ZAVARLJIVOST NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	18
3.1. Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika [2,9]	21
3.2. Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika [2,9].....	22
3.3. Zavarljivost martenzitnih nehrđajućih čelika [2,9]	23
3.4. Zavarljivost dupleks nehrđajućih čelika [2].....	24
4. EKSPERIMENTALNI DIO	25
4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja	25
4.2. Materijal za ispitivanje.....	25
4.3. Proces proizvodnje šavne cijevi.....	26
4.4. Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture	33
4.5. Analiza mikrostrukture polaznog lima.....	38
4.6. Analiza mikrostrukture cijevi nakon savijanja.....	40
4.7. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja.....	41
4.8. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja i osnovnog materijala nakon provlačenja..	46
4.9. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja i osnovnog materijala nakon rastvornog žarenja	50

4.10. Kvantitativna analiza mikrostrukture – mikrotvrdoća HV 0,1	55
5. ZAKLJUČAK.....	59
LITERATURA.....	60
PRILOZI.....	61

POPIS SLIKA

Slika 1. Korodirani zupčanici (lijevo) i zupčanici od nehrđajućeg čelika (desno)	2
Slika 2. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [4].....	4
Slika 3. Prikaz monofazne austenitne i austenitno-feritne mikrostrukture [3].....	6
Slika 4. Prikaz senzibiliziranog čelika i interkristalne korozije [3]	7
Slika 5. Shematski prikaz senzibiliziranog čelika, čelika sa smanjenim udjelom ugljika i stabiliziranog čelika [3]	7
Slika 6. Dijagram ovisnosti vremena do formiranja karbida o udjelu ugljika [3].....	8
Slika 7. Martenzit pri različitim temperaturama popuštanja [7]	11
Slika 8. Mikrostruktura sferoidizacijski žarenog čelika na optičkom mikroskopu (lijevo) i pretražnom elektronskom mikroskopu (desno) [3]	11
Slika 9. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70% Fe [3].....	15
Slika 10. Mikrostruktura dupleks čelika [3].....	16
Slika 11. Prikaz korozijskih oštećenja nastalih uslijed različitih nehomogenosti površine [2]	19
Slika 12. Schaefflerov dijagram dopunjen DeLongom i M. C. T. Bystramom s prikazom područja strukturne osjetljivosti te šrafiranim područjem prihvatljive zavarljivosti [10]	20
Slika 13. Ispravne toplinske operacije pri zavarivanju martenzitnih nehrđajućih čelika [9].	24
Slika 14. Odmatanje lima s koluta (a) i čišćenje lima acetonom (b).....	26
Slika 15. Sustav valjaka za profiliranje lima	26
Slika 16. Komora za zavarivanje	27
Slika 17. Zavar s unutarnje strane cijevi.....	28
Slika 18. Otvorena komora za zavarivanje (a) i pogled kroz kontrolni prozor (b).....	28
Slika 19. Izlazak cijevi iz komore za zavarivanje (a) i namatanje cijevi na kolut (b)	29
Slika 20. Postrojenje za provlačenje	30
Slika 21. Držači matrica i sustav za podmazivanje	30
Slika 22. Odmašćivanje cijevi	31
Slika 23. Ulaz cijevi u peć za toplinsku obradu (a) i izlaz cijevi iz peći za toplinsku obradu (b)	32
Slika 24. Sustav za namatanje gotovih cijevi	32
Slika 25. Uzorci za analizu mikrostrukture	33
Slika 26. Uzorci postavljeni na platformu (a) i uzorci zaliveni u masu (b).....	34

Slika 27.	Brušenje uzoraka	35
Slika 28.	Poliranje uzoraka	36
Slika 29.	Nagrivanje uzoraka	36
Slika 30.	Optički mikroskop OLYMPUS GX51	37
Slika 31.	Mikrotvrdomer PMT3	37
Slika 32.	Površina poprečnog presjeka lima u poliranom stanju	38
Slika 33.	Mikrostruktura poprečnog presjeka lima u nagriženom stanju	38
Slika 34.	Austenitna mikrostruktura u poprečnom presjeku	39
Slika 35.	Površina uzdužnog presjeka lima u poliranom stanju	39
Slika 36.	Mikrostruktura nagriženog uzorka uzdužnog presjeka lima	40
Slika 37.	Nagrižena mikrostruktura osnovnog materijala uzorka cijevi nakon zavarivanja, povećanje 200x	40
Slika 38.	Površina zavarenog spoja u poliranom stanju	41
Slika 39.	Mikrostruktura zavarenog spoja u nagriženom stanju	42
Slika 40.	Mikrostruktura metala zavara i ZUT-a	42
Slika 41.	Mikrostruktura metala zavara u nagriženom stanju	44
Slika 42.	Mikrostruktura ZUT-a korijena zavara	45
Slika 43.	Mikrostruktura ZUT-a tjemena zavara	45
Slika 44.	Površina zavarenog spoja u poliranom stanju nakon provlačenja	46
Slika 45.	Mikrostruktura zavarenog spoja nakon provlačenja u nagriženom stanju	47
Slika 46.	Mikrostruktura metala zavara i ZUT-a nakon provlačenja	47
Slika 47.	Mikrostruktura metala zavara nakon provlačenja	48
Slika 48.	Mikrostruktura ZUT-a korijena zavara nakon provlačenja	49
Slika 49.	Mikrostruktura ZUT-a tjemena zavara nakon provlačenja	49
Slika 50.	Mikrostruktura osnovnog materijala cijevi nakon provlačenja	50
Slika 51.	Površina zavarenog spoja u poliranom stanju nakon toplinske obrade	51
Slika 52.	Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja	52
Slika 53.	Mikrostruktura metala zavara i ZUT-a nakon rastvornog žarenja	52
Slika 54.	Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja	53
Slika 55.	Mikrostruktura ZUT-a korijena nakon rastvornog žarenja	54
Slika 56.	Mikrostruktura ZUT-a tjemena nakon rastvornog žarenja	54
Slika 57.	Mikrostruktura osnovnog materijala cijevi nakon rastvornog žarenja	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela najčešćih legirnih elemenata na alfa-gene i gama-gene [3]	3
Tablica 2. Mehanička svojstva i primjena feritnih nehrđajućih čelika [4]	5
Tablica 3. Austenitni nehrđajući čelici s manje od 10% δ -ferita u mikrostrukturi [4]	9
Tablica 4. Austenitni nehrđajući čelici bez δ -ferita u mikrostrukturi [4]	10
Tablica 5. Mehanička svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika [3]	13
Tablica 6. Martenzitni nehrđajući čelici i njihova svojstva [4]	14
Tablica 7. Usporedba određenih svojstava ugljičnih i nehrđajućih čelika [11]	21
Tablica 8. Kemijski sastav čelika X2CrNi18-9	25
Tablica 9. Mehanička svojstva čelika X2CrNi18-9	25
Tablica 10. Parametri zavarivanja plazma postupkom	27
Tablica 11. Parametri toplinske obrade	31
Tablica 12. Parametri brušenja	34
Tablica 13. Parametri poliranja	35
Tablica 14. Izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće	56

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm^2	konvencionalna granica razvlačenja
A	%	istežljivost
KV	J	udarni rad loma

SAŽETAK

Ovaj rad je napravljen s ciljem određivanja mikrostrukturnih promjena koje nastaju tijekom izrade šavnih cijevi iz lima od austenitnog nehrđajućeg čelika X2CrNi18-9, debljine 0,5 mm.

U teorijskom dijelu rada navedena je podjela nehrđajućih čelika, opisana su njihova mehanička svojstva, korozijska postojanost i područja primjene za svaku skupinu. Posebna pozornost je posvećena ponašanju navedenih čelika pri zavarivanju.

U eksperimentalnom dijelu rada opisan je proces proizvodnje šavne cijevi iz lima, koji se kroz faze savijanja, zavarivanja, provlačenja i toplinske obrade dovodi u oblik cijevi vanjskog promjera 8 mm i debljine stijenke 0,5 mm. Nakon svake faze, na pripremljenim metalografskim uzorcima provedena je kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture.

Mikrostruktura polaznog materijala lima u potpunosti je austenitna, s nešto višom mikrotvrdoćom u poprečnom nego u uzdužnom presjeku. Nakon savijanja lima u oblik cijevi, mikrostruktura nije promijenjena. Metalografskom analizom utvrđena je zadovoljavajuća kvaliteta zavarenog spoja. Oblik zavara je pravilan, linija staljivanja je jasno izražena, a u tipičnoj ljevačkoj mikrostrukturi metala zavara nisu uočene nepravilnosti. U ZUT-u su mjestimice izlučene nepoželjne faze po granicama austenitnih zrna. Unesena toplina pri zavarivanju smanjila je mikrotvrdoću osnovnog materijala, a mikrotvrdoća zavarenog spoja je viša od mikrotvrdoće polaznog lima. Nakon provlačenja u svrhu postizanja traženog oblika i dimenzija cijevi, austenitna mikrostruktura osnovnog materijala je dosta ugnječena, a deformacije je pretrpio i zavareni spoj. Sve to utjecalo je na povišenje mikrotvrdoće. Rastvornim žarenjem na 1050 °C homogenizira se mikrostruktura u zoni utjecaja topline, zaostala naprezanja nastala tijekom zavarivanja i provlačenja se smanjuju, što je rezultiralo smanjenjem mikrotvrdoće materijala.

Ključne riječi: austenitni nehrđajući čelici, šavna cijev, zavarivanje, mikrostruktura

SUMMARY

The goal of this paper was to determine microstructural changes which occur during the production of a seam pipe from sheet metal 0.5 mm thick, made of austenitic stainless steel grade X2CrNi18-9.

First part of the paper contains the classification of stainless steels, their mechanical properties, chemical properties and areas of application. Behavior of various stainless steels during welding was discussed in detail.

Second part of the paper describes the production process of a seam pipe, which is made by forming sheet metal into a tube, welding, pulling and heat treating. The final product is a pipe with the outside diameter of 8 mm and pipe wall thickness of 0.5 mm. Qualitative and quantitative analysis of the microstructure was conducted on metallographic samples after each phase of production.

The microstructure of starting material is completely austenitic. Microhardness is a bit lower in the rolling direction than in the perpendicular direction. After the sheet metal is formed into a pipe, no microstructural changes were observed. The metallographic analysis determined that the quality of the welded joint is adequate. The weld shape is correct and the solidification line is clearly visible. Typical cast microstructure of the weld metal does not contain any anomalies. The heat affected zone contains a small quantity of unwanted phases which precipitated along the austenitic grain boundaries. Heat ingress during welding lowered the base material microhardness. Microhardness of the welded joint is higher than the starting material. Pulling is done to achieve the desired pipe shape and dimensions of the pipe. Squashing of the base material and deformation of the welded joint were observed after pulling. This caused the microhardness to rise. Annealing at 1050 °C caused the heat affected zone microstructure to become homogenous and it reduced all residual stresses, which resulted in reduction of microhardness.

Key words: austenitic stainless steels, seam pipe, welding, microstructure

1. UVOD

Nehrđajući čelici su relativno nova skupina čelika, razvijena u prvoj polovici 20. stoljeća. Kao što im i samo ime sugerira, vrlo su otporni na različite oblike korozije, a za to je primarno zaslužan legirni element krom. On stvara tanak samoobnovljivi pasivni sloj oksida na površini čelika koji efektivno štiti čelik od atmosferilija. Mnogobrojne vrste nehrđajućih čelika podijeljene su u skupine s obzirom na njihovu mikrostrukturu.

Tehnologija zavarivanja nehrđajućih čelika je od izrazite važnosti za funkcioniranje modernog društva. Industrije poput farmaceutske, prehrambene, kemijske i petrokemijske stvaraju temelj modernog standarda života, a značajno se oslanjaju na svojstva nehrđajućih čelika. Njihova svojstva uparena s tehnologijom zavarivanja omogućuju izradu visokotlačnih spremnika, posuda, cjevovoda, konstrukcija i ostalih ključnih elemenata potrebnih u proizvodnim procesima s nepovoljnim atmosferskim uvjetima ili visokim higijenskim zahtjevima.

Proizvodnja cijevi od nehrđajućeg čelika za prehrambenu industriju odvija se u više koraka. Polazni lim se prvo savija u profil cijevi, nakon čega slijedi zavarivanje. Vanjski promjer zavarene cijevi se tada kalibrira provlačenjem, te se na posljjetku provodi rastvorno žarenje. Pri navedenim postupcima materijal se izlaže visokim temperaturama i visokom stupnju deformacije, što može znatno utjecati na mikrostrukturu koja je nositelj mehaničkih i antikorozivnih svojstava.

U nastavku ovog rada napravljena je metalografska analiza uzoraka iz različitih faza proizvodnje cijevi od austenitnog nehrđajućeg čelika, kako bi se steklo potpunije razumijevanje o mikrostrukturnim promjenama i njihovim utjecajem na svojstva čelika.

2. NEHRĐAJUĆI ČELICI

Nehrđajući čelici su posebna skupina čelika čije je osnovno svojstvo korozijska postojanost u nizu agresivnih medija. U ukupnoj masi proizvedenog čelika ima ih svega oko 2%, ali njihova tehnička i ekonomska važnost značajno nadilazi ovaj mali postotak. Korozija se može definirati kao spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija uslijed kemijskih ili elektrokemijskih procesa. Osnovni pojavni oblici korozije su [1]:

1. opća korozija,
2. jamičasta (eng. *pitting*) korozija,
3. kontaktna korozija,
4. interkristalna korozija,
5. napetosna korozija,
6. korozija u procjepu.

Korozija, u bilo kojem svom pojavnom obliku, može razarati materijal u kombinaciji s tribološkim mehanizmima. U tom slučaju, njihovo kombinirano i istodobno djelovanje naziva se tribokorozija.

Osnovni uvjet korozijske postojanosti čelika je minimalan udio od 12 %Cr u čvrstoj otopini [1]. Čelici koji zadovoljavaju taj uvjet spadaju u skupinu nehrđajućih čelika. Na površini nehrđajućih čelika nalazi se samoobnovljivi pasivni film oksida bogatog kromom, debljine 1 do 5 nm, koji je zaslužan za korozijsku postojanost čelika [2]. Na slici 1 prikazani su korodirani zupčanci i zupčanici od nehrđajućeg čelika.



Slika 1. Korodirani zupčanci (lijevo) i zupčanici od nehrđajućeg čelika (desno)

S obzirom na visoki udio kroma, svi nehrđajući čelici su visokolegirani sustavi. Osim kroma, mogu sadržavati i druge legirne elemente u visokim udjelima. Svi legirni elementi dijele se na alifagene legirne elemente koji promiču ili stabiliziraju ferit i gamagene legirne elemente koji promiču ili stabiliziraju austenit.

U tablici 1 prikazani su najčešći legirni elementi u nehrđajućim čelicima.

Na konačnu mikrostrukturu nehrđajućih čelika utječu kemijski sastav, režim toplinske obrade te stupanj hladne deformacije [3].

Tablica 1. Podjela najčešćih legirnih elemenata na alifagene i gamagene [3]

Aflageni legirni elementi	Gamageni legirni elementi
Cr	Ni
Mo	Mn
Si	C
Nb	N
Al	Cu
V	Co
W	

Monofazna mikrostruktura je drugi uvjet koji treba biti ispunjen kod nehrđajućih čelika. Većina nehrđajućih čelika i jest monofazna, ali postoje i vrste s ciljano postignutom dvojnomo mikrostrukturuom. Kod njih je važno da razlika potencijala između faza nije takva da u agresivnom mediju dođe do korozije.

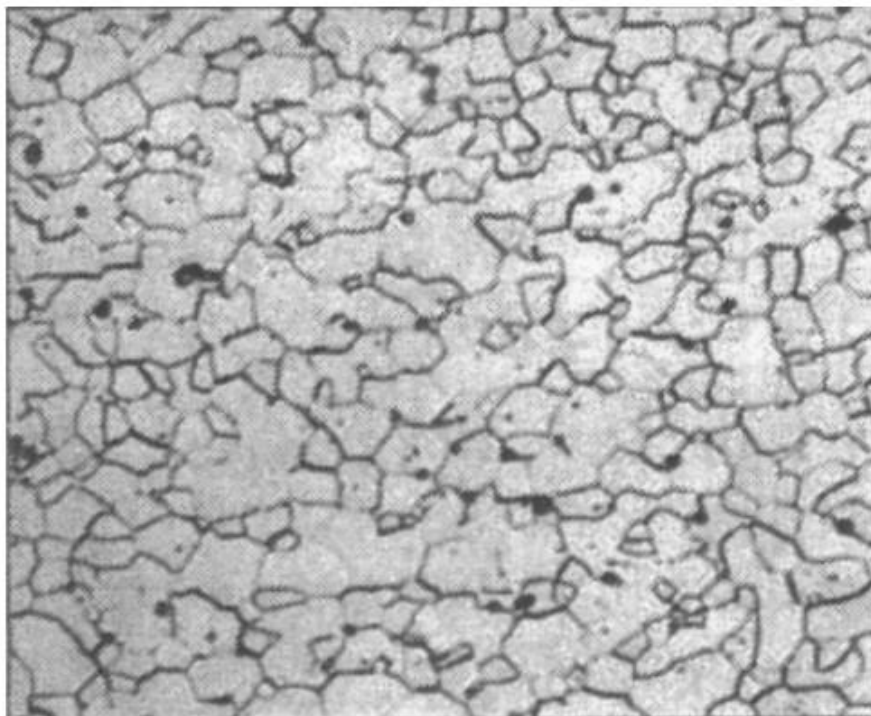
Nehrđajući čelici se najčešće dijele na osnovi njihove mikrostrukture na četiri skupine [2]:

1. feritni nehrđajući čelici,
2. austenitni nehrđajući čelici,
3. martenzitni nehrđajući čelici,
4. dupleks nehrđajući čelici.

Ukoliko se uzme u obzir i mogućnost očvršćivanja, podjela se može proširiti za još jednu skupinu – precipitacijski očvrstivi čelici. [2].

2.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici sadrže 13 do 17 %Cr i manje od 0,1 %C uz dodatak drugih legiranih elemenata poput Mo, Si, Al, Ti, Nb. Udio gamagenih elemenata je vrlo mali. Feritni nehrđajući čelici imaju feritnu mikrostrukturu, prikazanu na slici 2. Feromagnetični su i nije ih moguće toplinski očvrnuti zbog nedostatka fazne pretvorbe [4].



Slika 2. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [4]

Njihova prostorno centrirana kubična rešetka određuje njihova osnovna svojstva i karakteristike. Osnovna karakteristika feritnih nehrđajućih čelika je dobra otpornost na napetosnu, rupičastu i koroziju u procjepu, osobito u medijima koji sadrže kloride [3].

Feritni nehrđajući čelici su otporni na djelovanje dušične kiseline i njenih vodenih otopina, amonijevoj salitri te smjesi dušične, fosforne i solne kiseline. Nisu otporni na djelovanje rastaljenih metala, amonijevog bifluorida, barijevog klorida, broma i octene kiseline [4].

Primjena feritnih nehrđajućih čelika je ograničena na temperature do 400 °C zbog pojave *krhkosti 475* prilikom koje nastaju krhke faze. Kod dužeg zadržavanja u temperaturnom rasponu od 520 °C do 850 °C dolazi do stvaranja krhke σ -faze. Na temperaturama višim od 900 °C (npr. kod zavarivanja) dolazi do pogrubljenja zrna te izlučivanja karbida i nitrida što također dovodi do krhkosti ovih čelika [3].

Tvrdoća feritnih nehrđajućih čelika se kreće od ~200 HV za normalizirani čelik do ~300 HV za hladno valjani čelik, a modul elastičnosti iznosi oko 200 GPa [5]. U tablici 2 navedeni su neke vrste feritnih nehrđajućih čelika te njihova mehanička svojstva i primjena.

Znatna poboljšanja svojstava feritnih nehrđajućih čelik mogu se postići smanjenjem udjela nečistoća i primjesa korištenjem suvremenih metoda rafiniranja poput indukcijskih vakuumskih peći. Takvi čelici nazivaju se superferitni (eng. *ELA - Extra Low Additions*) i ciljano su razvijeni za točno određene namjene.

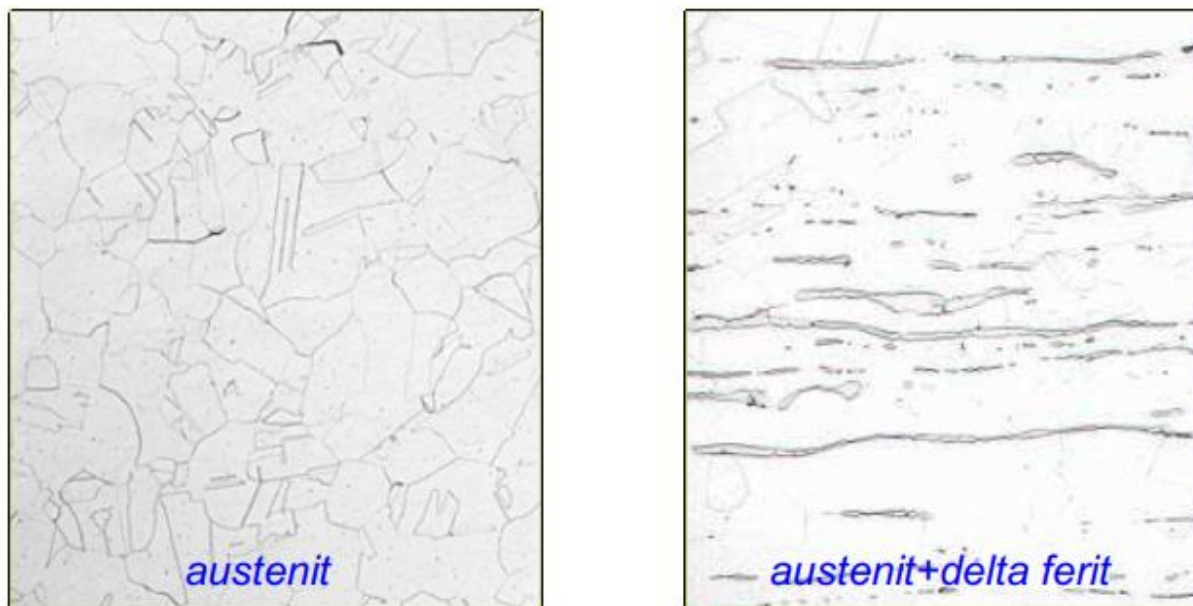
Tablica 2. Mehanička svojstva i primjena feritnih nehrđajućih čelika [4]

Oznaka čelika VDEh	Sastav, "ostalo", %	Mehanička svojstva			Posebna otpornost i primjeri primjene
		R _m , N/mm ²	R _{p0.2} , N/mm ²	A ₅ , %	
X6 Cr 17		450-600	270	20	Korozijski postojani pribor za jelo (osim oštrice noža), dijelovi kućanskih aparata, dijelovi uređaja u proizvodnji dušične kiseline i sapuna te u petrokemijskoj industriji.
X6 CrMo 17	1,1Mo	450-650	270	20	Posebno otporan na slanu vodu i organske kiseline, za auto-dijelove, okvire prozora, prevlake hladnjaka, kvake, okvire retrovizora.
X8 CrTi 17	0,7 Ti	450-600	270	20	Kao X6Cr17, otporniji na rast zrna, za zavarene dijelove kućanskih aparata, za sita i okvire.
X8 CrNb 17	0,9Nb	450-600	270	20	Dijelovi uređaja u mljekarama, pivovarama, proizvodnji boja i sapuna (ponajprije za zavarene dijelove).
X8CrMoTi 17	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	550	12	Za otopine s visokim udjelom slobodnog klora.
X12CrMoS17	0,25Mo 0,20S	700-850	450	12	Za obradbu odvajanjem čestica na automatima: vijke, zakovice, matice, male zupčanike, male osovine.

2.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici uglavnom sadrže 16 do 26 %Cr, 8 do 20 %Ni i manje od 2 %Mn. Nikal je gamageni legirni element koji proširuje austenitno područje te omogućuje stabilnu austenitnu mikrostrukturu čak i kod niskih temperatura. Ukoliko se udio mangana poveća na 4 do 15,5 % te se doda do 0,4 %N, moguće je smanjiti udio nikla. Dodatni legirni elementi mogu biti: Mo, N, Al, Cu, Ti, Nb, Ta, Se, S. Udio ugljika treba biti što niži kako bi se spriječila precipitacija karbida po granicama zrna (senzibilizacija) [3].

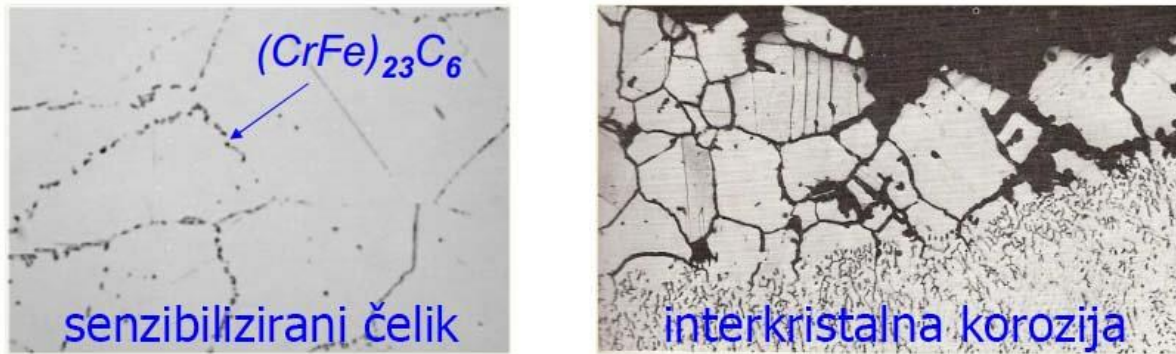
Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika može biti monofazna austenitna ili austenitno-feritna s 5 do 10% δ -ferita (slika 3) [4]. Delta ferit negativno djeluje na ponašanje čelika pri toploj obradi, smanjuje otpornost na rupičastu i koroziju u procjepu, smanjuje istezljivost i žilavost, povećava opasnost od nastanka σ -faze na povišenim temperaturama te pogoduje senzibilizaciji ako je „umrežen“. U nekim slučajevima ipak je poželjan jer otežava pojavu toplih pukotina [3, 4].



Slika 3. Prikaz monofazne austenitne i austenitno-feritne mikrostrukture [3]

Duljim zadržavanjem austenitnih nehrđajućih čelika na temperaturama između 425 i 870°C dolazi do formiranja karbida tipa $M_{23}C_6$, prilikom čega se smanjuje udio kroma u područjima oko granica zrna. Ova pojava je poznata pod nazivom senzibilizacija čelika. Ukoliko udio kroma padne ispod 12%, može doći do interkristalne korozije, ako se čelik nađe u vodljivom mediju. Senzibilizacija također smanjuje otpornost na rupičastu, napetosnu i koroziju u procjepu, a može dovesti i do pada mehaničkih svojstava.

Na slici 4 je prikazana mikrostruktura senzibiliziranog čelika i čelika napadnutog interkristalnom korozijom [3].

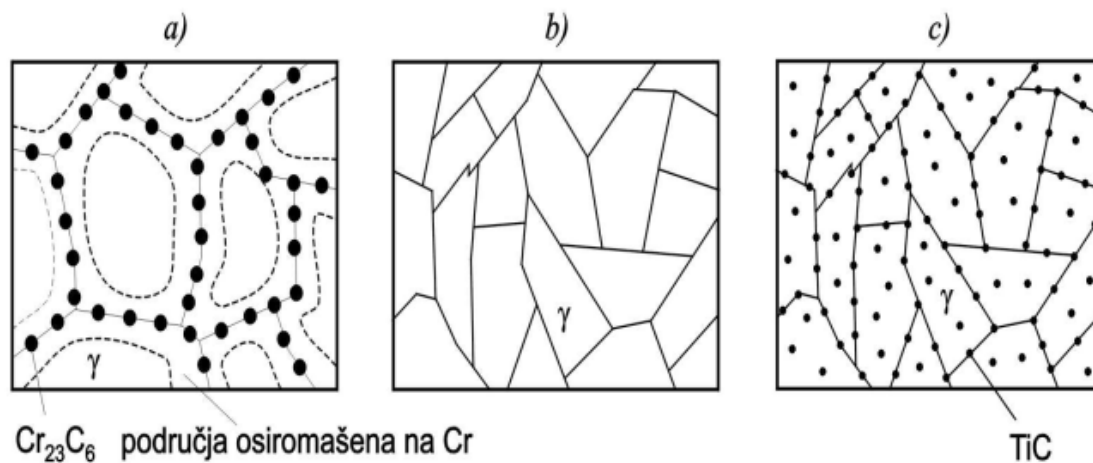


Slika 4. Prikaz senzibiliziranog čelika i interkristalne korozije [3]

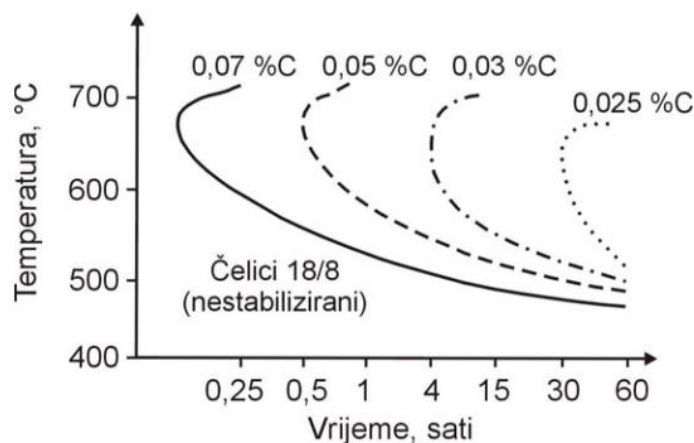
Senzibilizacija se može spriječiti smanjenjem količine ugljika ispod 0,3% ili dodavanjem stabilizatora Ti i/ili Nb.

Na slici 5 su shematski prikazani senzibilizirani čelik (a), čelik sa smanjenim udjelom ugljika (b) i čelik stabiliziran titanom (c) [3].

Na slici 6 prikazan je utjecaj masenog udjela ugljika na kinetiku nastanka kromovih karbida (senzibilizaciju).



Slika 5. Shematski prikaz senzibiliziranog čelika, čelika sa smanjenim udjelom ugljika i stabiliziranog čelika [3]



Slika 6. Dijagram ovisnosti vremena do formiranja karbida o udjelu ugljika [3]

Senzibilizirani čelik je moguće vratiti u prvobitno stanje kratkotrajnim žarenjem na visokim temperaturama (iznad 1050°C) i naglim hlađenjem. Isto se može postići i dugotrajnim žarenjem na nižim temperaturama (850 do 950°C) [3, 4].

Duljim zadržavanjem austenitnih nehrđajućih čelika na temperaturama između 540 i 900°C nastaje σ -faza koja smanjuje otpornost na rupičastu i koroziju u procjepu te uzrokuje porast tvrdoće i pad lomne žilavosti te istežljivosti. σ -faza se inicijalno formira na granici austenitnog zrna, a može se rastvoriti žarenjem iznad 1050°C [3].

Kod austenitnih nehrđajućih čelika s manje od 2 %Mn i više od 7 %Ni prilikom hladne deformacije dolazi do martenzitne pretvorbe. Udio martenzita ovisi o temperaturi, stupnju hladne deformacije i vrsti čelika [3].

Maksimalna tvrdoća austenitnih nehrđajućih čelika je 260 HV, dok se modul elastičnosti kreće od 190 do 205 GPa [3, 6].

U tablici 3 prikazane su vrste austenitnih nehrđajućih čelika s manje od 10% δ -ferita u mikrostrukтури, s njihovim mehaničkim svojstvima, posebnostima i područjima primjene.

Tablica 3. Austenitni nehrđajući čelici s manje od 10% δ -ferita u mikrostrukturi [4]

Oznaka čelika		Sastav "ostalo", %	Mehanička svojstva pri 20°C					Posebna otpornost i primjeri primjene
Oznaka čelika prema VDEh	M _s M _d		R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	HB	A ₅ , %	KV, J	
X12 CrNi 18 8	M _s = -58 °C M _d = +25 °C	-	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. Otporan na različite organske i anorganske kiseline - industrija masnih kiselina, papira, tekstila, umjetnih vlakana, aparata za pranje. Primjenjiv do 300°C.
X5 CrNi 18 9	M _s = -32 °C M _d =+37 °C	-	700	185	180	50	85	
X10 CrNiTi 18 9	M _s = -72 °C M _d = +14 °C	0,5 Ti	750	205	190	40	85	Otporan na IKK i bez topl. obradbe nakon zavarivanja, -mljekarstvo, industrija namirnica, te masnih kiselina, sapuna, kože, šećera, industrija filmova. Primjenjiv za tlačne spremnike do 450°C.
X5 CrNiNb 18 9		0,7 Nb	740	205	190	40	103	Otporan na dušičnu kiselinu. Otporan prema neoksidirajućim kiselinama i prema točkastoj koroziji uslijed halogenih medija, otporan na IKK i bez topl. obradbe. -industrija celuloze, boja, ulja, sapuna, tekstila, mljekarstva i pivovare Posebno otporan na neoksidirajuće kiseline i medije s halogenidima, topl. obradba nakon zavarivanja nepotrebna. -industrija tekstila, sulfita, celuloze, masnih kiselina, gume, boja, uređaja za medicinu, fotografiju i plast. mase
X5 CrNiMo 18 10	M _s =-166 °C M _d =-25 °C	2,25 Mo	700	205	180	45	85	
X10 CrNiMoTi 18 10	M _s =-206 °C M _d =-48 °C	2,25 Mo 0,5 Ti	750	225	190	40	85	

M_s – temperatura početka stvaranja martenzita pri "dubokom" hlađenju,
M_d – temperatura početka stvaranja martenzita pri hladnom deformiranju
IKK – interkristalna korozija

U tablici 4 prikazane su vrste austenitnih nehrđajućih čelika bez δ -ferita u mikrostrukturi s njihovim mehaničkim svojstvima, posebnostima i područjima primjene.

Tablica 4. Austenitni nehrđajući čelici bez δ -ferita u mikrostrukturi [4]

Oznaka čelika prema VDEh	Sastav, "ostalo" %	Mehanička svojstva					Posebna postojanost i primjeri primjene
		R _m , N/mm ²	R _{p0,2} , N/mm ²	HB	A ₅ , %	KV, J	
X5 NiCrMoCuNb 20 18	2,25 Mo 2 Cu 0,4 Nb	740	225	190	40	82	Posebno povišena postojanost prema sumpornoj i fosfornoj kiselini - industrija boja, umjetnih vlakana, zavarljiv bez naknadne toplinske obradbe
X5 CrNiMoTi 25 25	2,25 Mo 0,25 Ti	740	225	190	40	69	Industrija tekstila, celuloze, boja, fotopribora i kemikalija, plast. masa, gume, zavarljiv bez naknadne toplinske obradbe
X5 NiCrMoCuNb 22 18	3,25 Mo 0,4 Nb 1,25 Cu	740	275	190	30	105	Industrija boja, plastike i nafte

Najčešće korišteni austenitni nehrđajući čelici su X5CrNi18-9 i X5CrNiMo17-12-2 te njihove niskougljične varijante X2CrNi18-9 i X2CrNiMo17-12-2. Što je udio ugljika u austenitnom nehrđajućem čeliku niži, to je manja opasnost da pri zavarivanju dođe do senzibilizacije.

2.3. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici sadrže od 0,2 do 1 %C, između 13 i 18 %Cr te mogu sadržavati do 1,3 %Mo i 2,5 %Ni. Tražena mikrostruktura, mehanička svojstva i korozijska postojanost martenzitnih nehrđajućih čelika se postižu kaljenjem na zraku ili u ulju te naknadnim popuštanjem. Martenzitne nehrđajuće čelike je moguće podijeliti na konstrukcijske i alatne. Konstrukcijski martenzitni nehrđajući čelici sadrže manje ugljika (do 0,25 %), te nakon toplinske obrade imaju monofaznu martenzitnu mikrostrukturu koja daje dobru korozijsku postojanost. S druge strane, alatni martenzitni nehrđajući čelici sadrže više ugljika, nakon kaljenja i popuštanja imaju dvofaznu mikrostrukturu sastavljenu od martenzita i karbida. Takva dvojna mikrostruktura smanjuje korozijsku postojanost, ali povećava tvrdoću i otpornost na abrazijsko trošenje [4].

Na slici 7 prikazane su mikrostrukture martenzita nakon gašenja, niskotemperaturnog popuštanja i visokotemperaturno popuštanja. S povećanjem temperature popuštanja gubi se karakteristična igličasta mikrostruktura martenzita dobivena gašenjem.

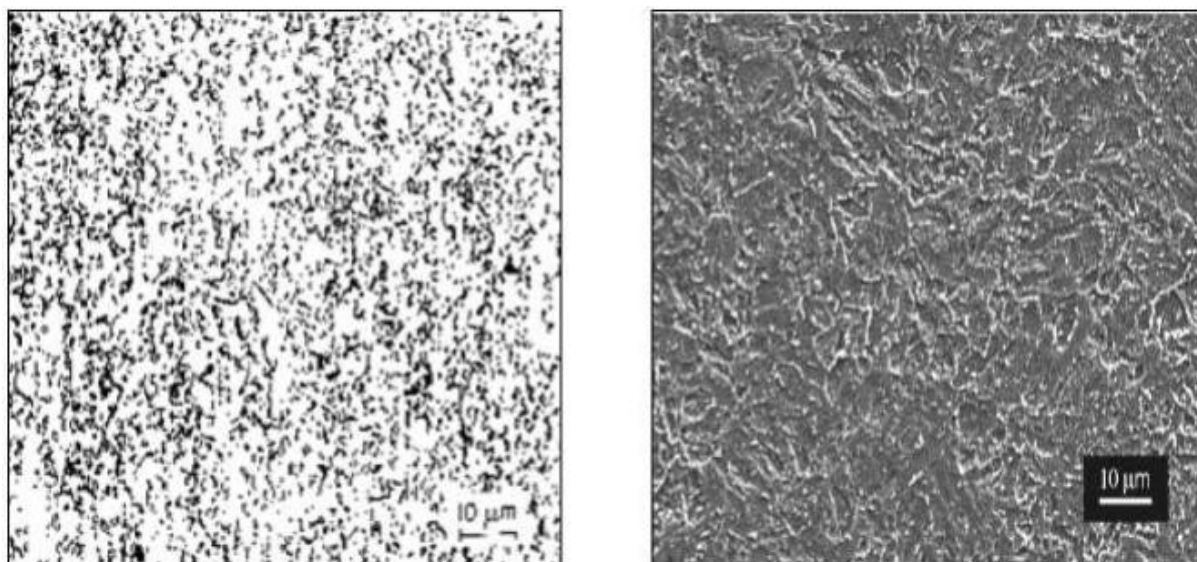


Slika 7. Martenzit pri različitim temperaturama popuštanja [7]

2.3.1. Toplinska obrada martenzitnih nehrđajućih čelika [3]

1. Žarenje

Martenzitni nehrđajući čelici isporučuju se u sferoidizacijski žarenom stanju zbog lakšeg oblikovanja. Žarenje rezultira smanjenjem tvrdoće te poboljšanjem hladne oblikovljivosti i obradivosti odvajanjem čestica. Na slici 8 je prikazana mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 sferoidizacijski žarenog pri 750 °C u trajanju od 2 sata. Mikrostruktura čelika sastoji se od karbida u feritnoj matrici, a tvrdoća mu iznosi 284 HV.



Slika 8. Mikrostruktura sferoidizacijski žarenog čelika na optičkom mikroskopu (lijevo) i pretražnom elektronskom mikroskopu (desno) [3]

2. Austenitizacija

Cilj austenitizacije je postići austenitnu mikrostrukturu s potpuno ili djelomično otopljenim karbidima. Povišenjem temperature austenitizacije dolazi do:

- rasta zrna austenita
- povećanju udjela zaostalog austenita nakon gašenja,
- veće količine otopljenih karbida i okrupnjivanja karbida

Udio i veličina neotopljenih karbida utječu na otpornost na trošenje te rast i veličinu austenitnog zrna.

3. Gašenje

Gašenje većine martenzitnih nehrđajućih čelika moguće je provesti na zraku, ali u praksi se većinom provodi u ulju kako bi se osigurao potpuni prijelaz austenita u martenzit. Sporijim hlađenjem nastaju precipitati te se ne postiže maksimalna tvrdoća. Bržim hlađenjem se povećava rizik od nastanka pukotina i deformacija. Zaostali austenit snizuje tvrdoću i smanjuje žilavost te ga je stoga poželjno izbjeći provođenjem dubokog hlađenja. Nakon gašenja čelik je tvrd i krhak.

4. Duboko hlađenje

Duboko hlađenje se provodi kod martenzitnih čelika kojima je temperatura M_F ispod sobne temperature. Cilj je provesti sav zaostali austenit u martenzit. Kao medij za hlađenje se koriste suhi led ili tekući dušik. Kako bi se spriječio toplinski šok brzina hlađenja mora biti manja od $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, a vrijeme hlađenja iznosi 24 do 36 sati.

5. Visokotemperaturno popuštanje

Popuštanje se provodi s ciljem:

- povišenja žilavosti martenzita,
- sniženja zaostalih naprezanja,
- postizanja dimenzijske stabilnosti pretvorbom A_z u M i K_P

2.3.2. Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika [2, 8, 3]

Opća svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika:

- feromagnetičnost,
- osjetljivost na vodikovu krhkost, osobito u sulfidnim atmosferama,

- loša otpornost na udarni lom pri sniženim temperaturama,
- veća tvrdoća i čvrstoća od feritnih i austenitnih nehrđajućih čelika,
- modul elastičnosti ~200 GPa,
- tvrdoća do 580 HV,
- dobra otpornost na toplinski i mehanički umor,
- izvrsna otpornost na trošenje,
- jeftiniji od drugih nehrđajućih čelika,
- primjena do 650 °C.

U tablici 5 prikazani su vlačna čvrstoća, konvencionalna granica razvlačenje te istezljivost za neke martenzitne nehrđajuće čelike u žarenom, srednjetemperaturno popuštenom i visokotemperaturno popuštenom stanju.

Tablica 5. Mehanička svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika [3]

Čelik	Stanje	R _m [N/mm ²]	R _{p0,2} [N/mm ²]	Istezljivost [%]
X12Cr13	žareno	485	275	20
	srednjetemperaturno popušteno	690	550	15
	visokotemperaturno popušteno	825	620	12
X15Cr13	žareno	485	275	20
	srednjetemperaturno popušteno	690	550	15
	visokotemperaturno popušteno	825	620	12
X30Cr13	žareno	690	-	15
	srednjetemperaturno popušteno	1720	1480	8

X55CrMo14	žareno	760	-	-
	srednjetemperaturno popušteno	795	620	15
	visokotemperaturno popušteno	1210	930	13
X40CrMoVN16-2	žareno	760	450	14

U tablici 6 prikazane su vrste martenzitnih nehrđajućih čelika, njihove posebnosti i područja primjene.

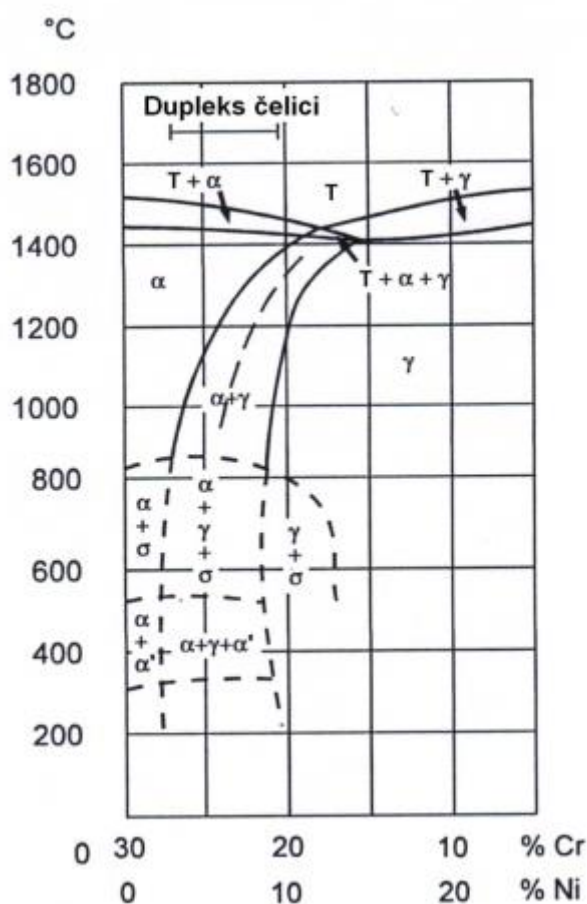
Tablica 6. Martenzitni nehrđajući čelici i njihova svojstva [4]

Čelik	Posebno postojan	Primjeri primjene
X20 Cr 13	- na vodu i vodenu paru, na organske kiseline: octenu, mliječnu, voćnu	- kirurški instrumenti (kliješta, pincete) - pribor za jelo: vilice, žlice - strojni dijelovi: osovine, stapajice, ventilni stošci, sapničke igle, turbinske lopatice, "holandski" noževi (za papir)
X20 CrMo 13	- povišena postojanost u odnosu na X20 Cr 13 (posebno toplinska)	- kao X20 Cr 13 ali za radne temperature i do 500 °C, za toplinski napregnute opruge
X22 CrNi 17	- na organske kiseline koje se javljaju u industriji namirnica, octene kiseline i sapuna, na oksidirajuću razrijeđenu HNO ₃ , postojan na morsku vodu	- osovine, ventili, dijelovi pumpa, dijelovi uređaja u mljekarama, u industriji papira, u proizvodnji kvasca i škroba, za dijelove kompresora
X30 Cr 13	- na vodu i paru (samo u kaljenom stanju)	- opruge, vijci (za rad u agresivnoj atmosferi), škare, mjerni alat
X36 CrMo 17 (alatni)	- u atmosferi aminokiselina, octene kiseline, pa i solne kiseline (PVC)	- dijelovi kalupa za preradbu polimera, kirurški rezni alat, zubarski alat
X42 Cr 13 (alatni)	- kao X36 CrMo 17	- kao X36 CrMo 17, posebno za aminoplaste
X45 CrMoV 15	- otporan do 500 °C	- različiti rezni alati, kirurški skalpeli
X90 CrMoV 18	- istovremeno vrlo otporan na trošenje i koroziju	- noževi za meso, skalpeli, korozijski postojani kotrljajući ležajevi, sapnice, pribor za jelo otporan na abrazijske praške za čišćenje, britve, žileti

2.4. Dupleks nehrđajući čelici

Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika je dvofazna te se sastoji od podjednakih udjela ferita i austenita. Da bi se to postiglo, kemijski sastav ovih čelika mora biti jako dobro izbalansiran, a osim kemijskog sastava, važnu ulogu u formiranju mikrostrukture ima i toplinska obrada. Osnovni legirni elementi kod dupleks čelika su krom i nikal, a važnu ulogu imaju i drugi legirni elementi. Dodatak Mo, Si, Ti i Nb djeluje kao porast udjela Cr, a dodatak Mn, Cu, N i C djeluje kao porast udjela Ni [4].

Na slici 9 prikazan je pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70% Fe.



Slika 9. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70% Fe [3]

Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika karakteristična je po uzdužnim, naizmjeničnim zrnima ferita i austenita, prikazanim na slici 10.



Slika 10. Mikrostruktura dupleks čelika [3]

Svojstva dupleks nehrđajućih čelika [2, 3, 4]:

- austenitno-feritna mikrostruktura,
- povećana otpornost napetosnoj koroziji,
- povećana otpornost utjecaju klorida,
- bolja otpornost na opću i rupičastu koroziju od austenitnih nehrđajućih čelika,
- veća čvrstoća od austenitnih nehrđajućih čelika,
- žilavost je između feritnih i austenitnih nehrđajućih čelika,
- tvrdoća od 250 do 350 HV,
- $R_m = 700 - 1100 \text{ N/mm}^2$,
- $R_{p0,2} = 500 - 800 \text{ N/mm}^2$,
- udarni rad loma do 170 J,
- temperaturni raspon primjene od -60 °C do 315 °C ,
- feromagnetičnost.

Najčešće korišteni dupleks čelici [4]:

- X4CrNiMoNb25-7-2
- X6CrNiMoTi20-6-2

- X2CrNiMoSi18-5-3
- X2CrNiMoN22-5-3
- X8CrNiMoN-27-5-2
- X2CrN-26-5-4
- X3CrNiMoCuN24-5-2

Primjena dupleks nehrđajućih čelika [3]:

- industrija nafte i plina,
- industrija celuloze i papira,
- izmjenjivači topline,
- procesna industrija,
- postrojenja za desalinizaciju,
- medicinski implantati,
- brodogradnja.

3. ZAVARLJIVOST NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

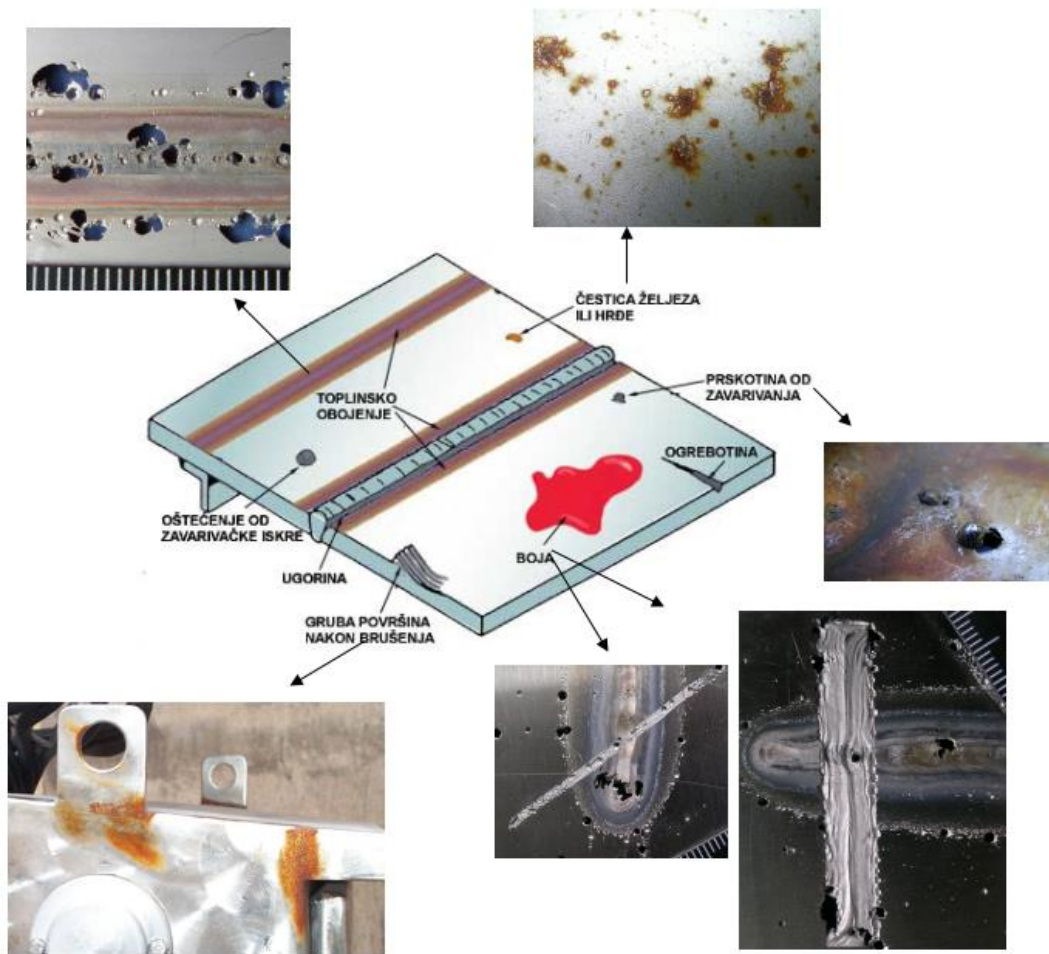
Zavarivanje je široko rasprostranjena tehnologija spajanja materijala bez koje bi moderan svijet bio nezamisliv. Transportna i procesna su samo neke od industrija koje se u velikoj mjeri oslanjaju na različite postupke zavarivanja kako bi proizvele svoje proizvode.

Zavareni spojevi na konstrukcijama od nehrđajućih čelika predstavljaju ozbiljnu opasnost zbog povećane mogućnosti nastanka korozijskih oštećenja uslijed rupičaste, napetosne, mikrobiološke, interkristalne i korozije u procjepu. Uzrok tome su izražene strukturne i površinske nehomogenosti samih zavarenih spojeva te zone utjecaja topline. Kako bi se eliminirale navedene opasnosti, potrebno je ispravno provoditi tehnologiju zavarivanja strogo kontrolirajući [2]:

- postupak,
- parametre,
- osnovni materijal,
- dodatni materijal,
- tehnološku disciplinu itd.

Na slici 11 prikazana su karakteristična korozijska oštećenja nastala uslijed različitih nehomogenosti površine koje su posljedica samog postupka zavarivanja ili loše provedene tehnologije zavarivanja. Prikazane nehomogenosti uključuju [2]:

- toplinsko obojenje,
- čestice hrđe ili željeza na površini,
- naštrcane metalne kapljice,
- pregrubu mehaničku obradu,
- neuklonjene organske boje ili markere,
- samoljepljive folije.



Slika 11. Prikaz korozijskih oštećenja nastalih uslijed različitih nehomogenosti površine [2]

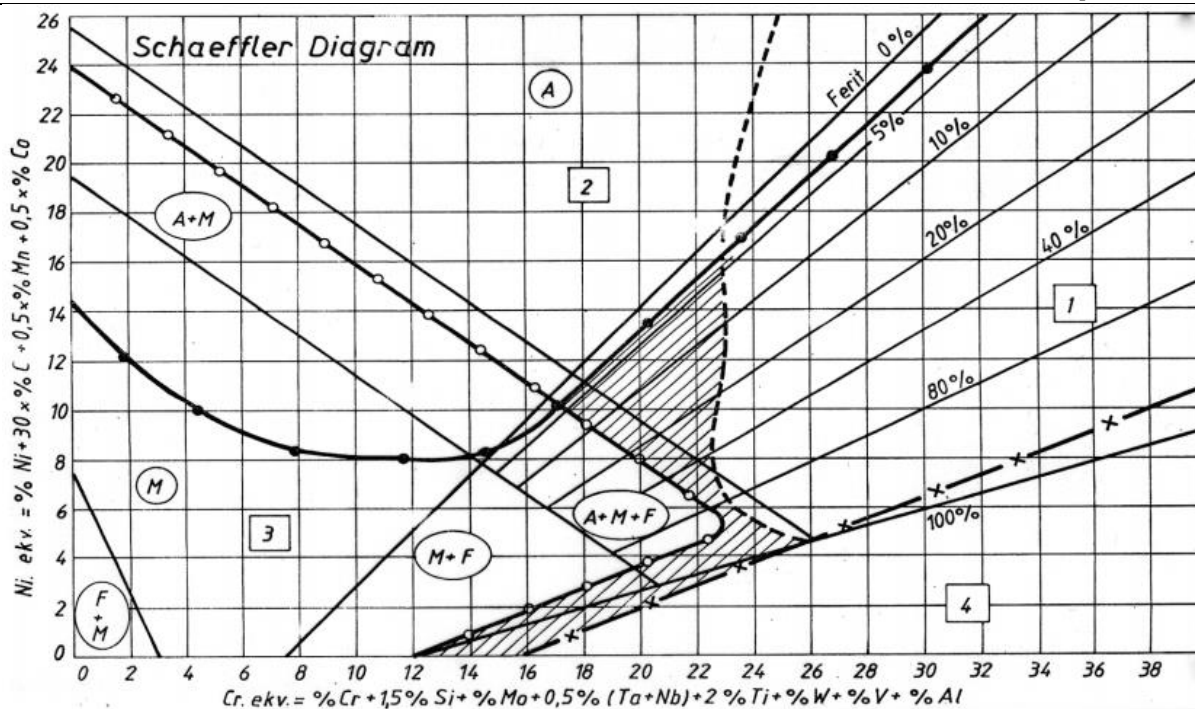
Schaefflerov dijagram, na slici 13, prikazuje mikrostrukturna stanja (gašeno stanje) koja je moguće postići u zavaru, na temelju vrijednosti dva parametra [3, 10]:

1. Cr ekvivalent (Cr_{ekv}) – iskazuje utjecaj alfa genih elemenata,

$$Cr_{ekv} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb$$

2. Ni ekvivalent (Ni_{ekv}) – iskazuje utjecaj gama genih elemenata.

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



Slika 12. Schaefflerov dijagram dopunjen DeLongom i M. C. T. Bystranom s prikazom područja strukturne osjetljivosti te šrafiranim područjem prihvatljive zavarljivosti [10]

Strukturna područja u Schaefflerovom dijagramu odvojena su pravicima i označena prvim slovima faza koje nastaju [10]:

- 1) Osnovni i dodatni materijal u ovom polju je na temperaturama 500 do 900 °C sklon pojavi krhke σ -faze.
- 2) Osnovni i dodatni materijal u ovom polju je sklon stvaranju toplih pukotina iznad 1250 °C.
- 3) Zavareni spojevi s krhkom martenzitno-austenitnom i martenzitno-feritnom mikrostrukturom koje su sklone pojavi hladnih pukotina (ispod 400 °C) te ih je stoga potrebno predgrijavati i naknadno žariti.
- 4) Korozijski postojani čelici s vrlo malim sadržajem ugljika kod kojih na temperaturi iznad 1100 °C dolazi do izrazitog rasta zrna što uzrokuje pojavu pukotina u zavaru i zoni utjecaja topline.

Šrafirano područje u dijagramu označuje optimalan sastav zavarenog spoja i dobru zavarljivost. U tablici 7 prikazane su razlike u određenim svojstvima ugljičnih i nehrđajućih čelika koje dovode do poteškoća prilikom zavarivanja.

Tablica 7. Usporedba određenih svojstava ugljičnih i nehrđajućih čelika [11]

	Ugljični čelik	Nehrđajući čelik X5CrNi18-9
Boja	Sivo-crna	Srebrno-siva
Linearni koeficijent toplinskog širenja pri 20-800 °C [$\times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$]	13	20
Toplinska vodljivost pri 20-100 °C [W/m °C]	47	16
Električni otpor pri 20 °C [$\text{n}\Omega\text{m}$]	150	700
Magnetičnost	da	ne

Iz podataka navedenih u tablici može se zaključiti:

- kod zagrijavanja nehrđajućih čelika nastaju veća unutarnja naprezanja i lakše dolazi do deformacije zbog ~50% većeg toplinskog koeficijenta širenja,
- oko 3 puta manja toplinska vodljivost nehrđajućeg čelika znači da se toplina duže zadržava u zavaru i zoni utjecaja topline što daje više vremena difuzijskim procesima da modificiraju mikrostrukturu zavara (npr. nastajanje karbida),
- preko četiri puta veći električni otpor nehrđajućeg čelika uzrokuje veće zagrijavanje materijala i smanjuje maksimalno strujno opterećenje elektroda i žice,
- magnetičnost ugljičnih čelika omogućuje lakše pozicioniranje komada prije zavarivanja.

3.1. Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika [2,9]

Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika je ograničena zbog sklonosti porastu zrna na temperaturama iznad 900 °C (ubrzano iznad 1150 °C). Generalno, feritni čelici su sitnozrnati te imaju dobru istežljivost, no s pogrubljenjem zrna dolazi do povećanja prijelazne temperature udarne žilavosti iznad sobne, čime materijal postaje veoma krhak. Nakon pogrubljenja zrna, čelik više nije moguće vratiti u sitnozrnato stanje toplinskom obradom. Stoga je potrebno zavarivanje provoditi postupkom koji ima mali unos topline u materijal i brzo hlađenje (REL,

MAG, EP). Teorijski je moguće grubozrnatu strukturu poboljšati zagrijavanjem i čekićanjem zone utjecaja topline, ali taj postupak nije uvijek primjenjiv te je upitna njegova pouzdanost.

Sklonost porastu zrna je moguće smanjiti:

- dodavanjem 0,1 %N feritnom čeliku i dodavanjem dušika u metal zavara koji tada skrućuje u sitnozrnatu strukturu,
- legiranjem čelika tako da osim ferita, sadrži i malo austenita.

Kod zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika može doći i do nastanka σ -faze. Sigma faza je tvrdi intermetalni spoj kroma i željeza koji smanjuje istezljivost, žilavost i korozijsku postojanost čelika. Osim nastanka σ -faze može doći i do izlučivanja kromovih karbida koji smanjuju otopljeni udio kroma te time narušavaju korozijsku postojanost čelika. Također treba izbjegavati dugotrajno zadržavanje čelika u temperaturnom rasponu 400-540 °C zbog pojave *krhkosti 475*.

Samo feritni nehrđajući čelici s visokim sadržajem kroma i relativno visokim sadržajem ugljika (0,25%) se predgrijavaju na 200 °C. Žarenje se može provesti na temperaturama od 750 do 850 °C uz brzo hlađenje kako bi se povećala istezljivost prijelazne zone i poboljšala otpornost na interkristalnu koroziju.

3.2. Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika [2,9]

Austenitni nehrđajući čelici dobro su zavarljivi (uz iznimku čelika za strojnu obradu). Nije ih potrebno predgrijavati. Najveću opasnost predstavlja senzibilizacija, odnosno izlučivanje kromovih karbida po granicama zrna u temperaturnom rasponu od 425 do 850 °C što može dovesti do pojave interkristalne korozije.

Precipitacija karbida se može spriječiti:

1. legiranjem stabilizatorima (Nb, Ti, Ta) koji imaju veći afinitet prema ugljiku te tvore stabilne karbide,
2. smanjenjem sadržaja ugljika ispod 0,03%,
3. žarenjem na 1050-1100 °C prilikom čega se karbidi rastvaraju i gašenjem,
4. malim unošenjem topline.

Austenitni nehrđajući čelici su također podložni nastanku krhke σ -faze koju je jedino moguće ukloniti žarenjem na 1200 °C, ali je potrebno uzeti u obzir da tada dolazi do značajnog pogrubljenja zrna.

Austenitni nehrđajući čelici su skloni nastanku toplih pukotina u metalu zavara zbog nečistoća u materijalu te izražene sklonosti deformacijama, odnosno zaostalim naprezanjima. Pravilan odabir dodatnog materijala koji će osigurati s 4-12% δ -ferita u metalu zavara te izbor pravilne tehnike zavarivanja rješavaju taj problem.

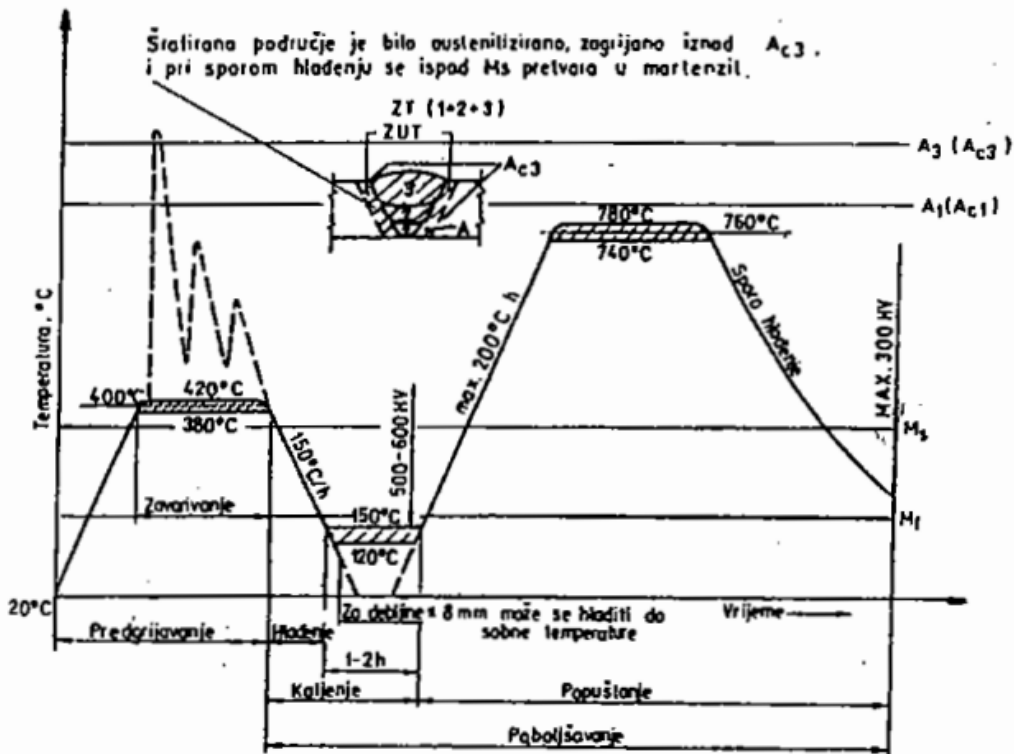
3.3. Zavarljivost martenzitnih nehrđajućih čelika [2,9]

Zbog svojstva samozakaljivosti na zraku, zavarivanje martenzitnih nehrđajućih čelika zahtijeva predgrijavanje na 200-300°C prije postupka zavarivanja te popuštanje na 700-750°C nakon provedenog zavarivanja. Za izradu zavarenih konstrukcija rabe se čelici s manje od 0,15% C.

Vrste dodatnog materijala kod zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika mogu biti:

1. isti ili slični osnovnom materijalu – martenzitna mikrostruktura zavara,
2. austenitni dodatni materijal – povećana žilavost i istežljivost zavara.

Martenzitne nehrđajuće čelike je potrebno predgrijavati iznad temperature M_s kako bi se spriječila mogućnost stvaranja martenzita za vrijeme zavarivanja. Također je potrebno držati temperaturu čelika iznad M_s između prolaza. Nakon zavarivanja čelik se lagano hladi na temperaturu ispod M_f kako bi se omogućila potpuna pretvorba zaostalog austenita u martenzit. Na kraju se provodi popuštanje ispod temperature A_{c1} čime se čelik dovodi u poboljšano stanje. Na slici 13 prikazan je cijeli prethodno navedeni toplinski ciklus.



Slika 13. Ispravne toplinske operacije pri zavarivanju martenzitnih nehrđajućih čelika [9]

3.4. Zavarljivost dupleks nehrđajućih čelika [2]

Dobra svojstva dupleks čelika temelje se na izbalansiranom udjelu ferita i austenita u mikrostrukтури. Zavarivanjem se ovaj omjer narušava. U metalu zavara i u zoni utjecaja topline znatno se povećava udio ferita na račun austenita. Kako bi se zadržao dovoljan udio austenitne faze u području zavarenog spoja dupleks čelika, koriste se dodatni materijali s povećanim udjelom nikla. Dodatkom dušika u zaštitni plin također se promiče stvaranje austenita.

Feritizirani dio strukture je najkritičnije područje zavarenog spoja kod dupleks nehrđajućih čelika. Feritizacija je posljedica zavarivanja te djeluje štetno na svojstva samog zavara, jer povećava udio ferita, i preko 80%. Osim povećanja udjela ferita, visoki unos topline pri zavarivanju pogoduje stvaranju krhkih faza u području zavara te dovodi do smanjenja korozijske postojanosti.

Zavarivanje je nužno izvoditi u kontroliranim uvjetima unosa topline što znači da je potrebno poštivati propisane parametre zavarivanja.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

U eksperimentalnom dijelu rada analizirane su promjene mikrostrukture austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNi18-9 koje nastaju pri izradi šavnih cijevi vanjskog promjera 8 mm i debljine stijenke 0,5 mm. Proizvedene cijevi koriste se u prehrambenoj industriji. Cijevi se izrađuju iz lima širine 30 mm i debljine 0,5 mm kroz četiri faze:

- savijanje,
- zavarivanje,
- provlačenje (kalibriranje),
- toplinska obrada – rastvorno žarenje.

Analizirana je mikrostruktura lima u uzdužnom i poprečnom presjeku te mikrostruktura osnovnog materijala nakon savijanja. Nakon provedenog zavarivanja analizirana je mikrostruktura metala zavara i zone utjecaja topline (ZUT-a). Isto područje analizirano je nakon kalibriranja i nakon toplinske obrade.

Osim kvalitativne analize mikrostrukture provedeno je i mjerenje mikrotvrdoće u osnovnom materijalu i zavarenom spoju nakon svake faze proizvodnje cijevi.

4.2. Materijal za ispitivanje

Sastav austenitnog nehrđajućeg čelika X2CrNi 18-9 naveden je u tablici 8, a mehanička svojstva, zajamčena od strane proizvođača lima, nalaze se u tablici 9.

Tablica 8. Kemijski sastav čelika X2CrNi18-9

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	N [%]	Fe [%]
0,019	0,410	1,570	0,028	0,002	18,3	8	0,060	ostatak

Tablica 9. Mehanička svojstva čelika X2CrNi18-9

$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A [%], 80 mm	HV
277	632	57	156

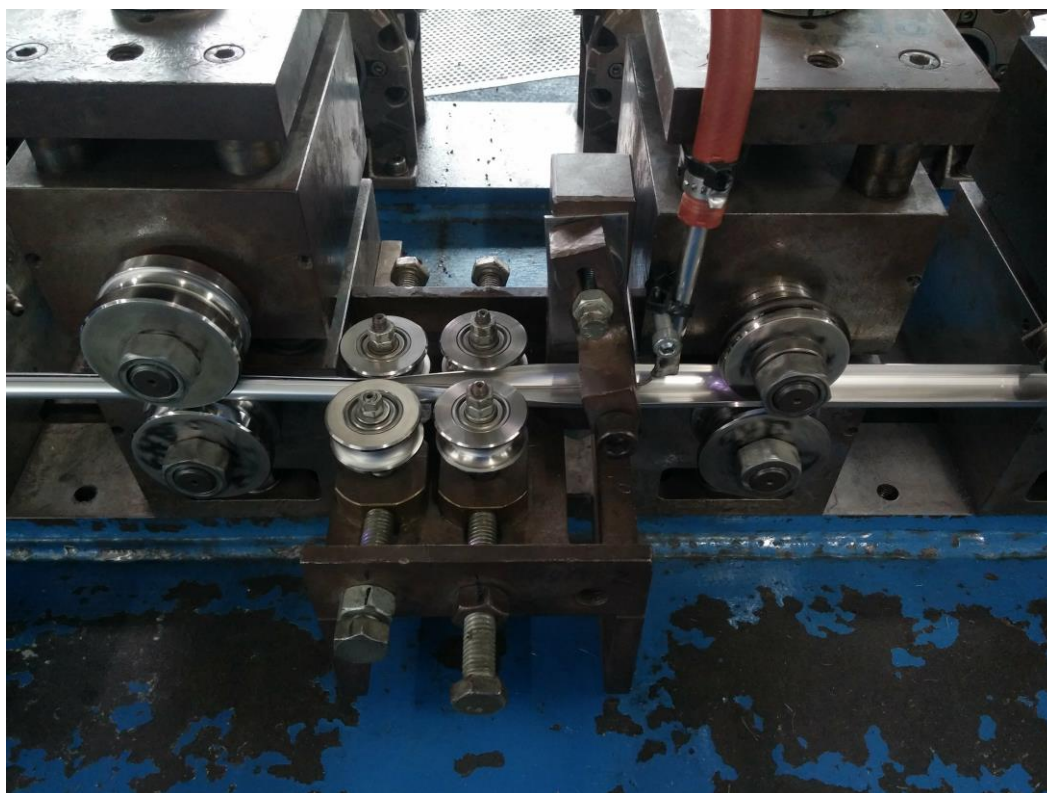
4.3. Proces proizvodnje šavne cijevi

Proces proizvodnje šavne cijevi počinje s kolutom lima debljine 0,5 mm i širine 30 mm (ukupne mase oko 300 kg). Lim nakon odmatanja prolazi između dvije krpe natopljene acetonom kako bi se uklonile nečistoće s površine. Na slici 14 prikazano je odmatanje lima s koluta i čišćenje površine lima.



Slika 14. Odmatanje lima s koluta (a) i čišćenje lima acetonom (b)

Nakon čišćenja lim prolazi kroz sustav profiliranih valjaka koji ga formiraju u oblik cijevi promjera ≈ 10 mm. Na slici 15 prikazano je sustav valjaka za savijanje lima.



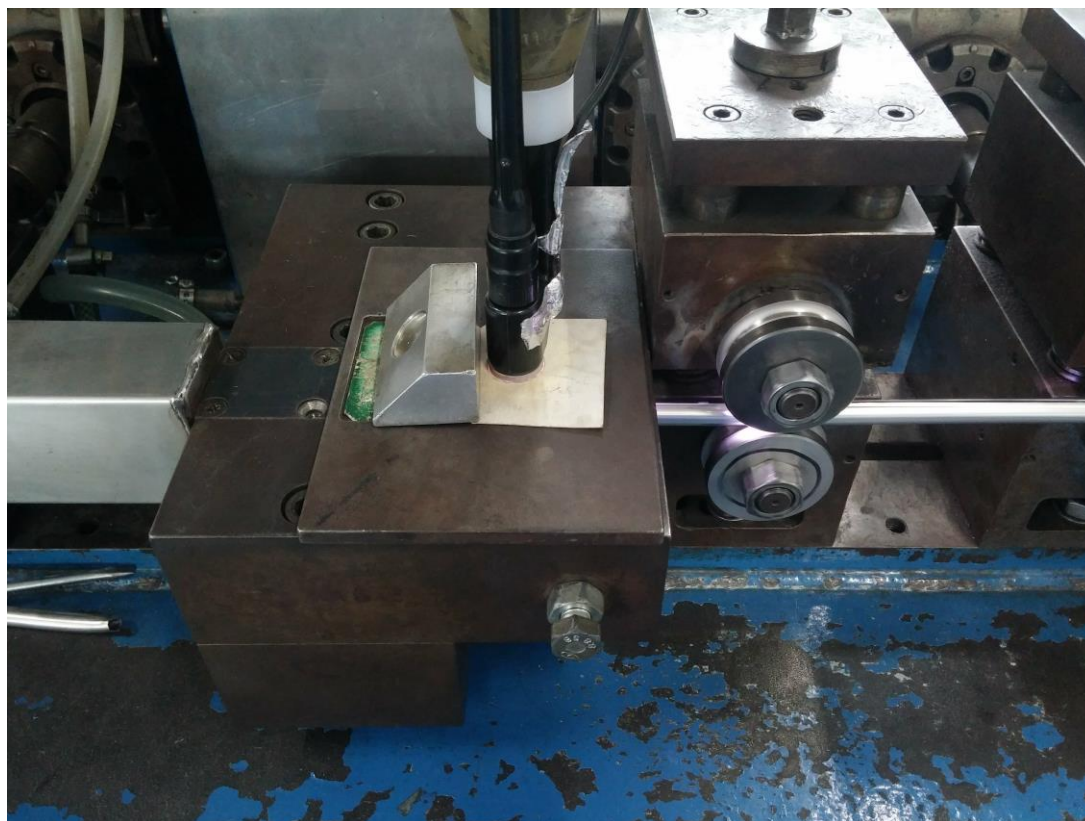
Slika 15. Sustav valjaka za profiliranje lima

Nakon profiliranja sučelje rubova lima ulazi u vodom hlađenu komoru za zavarivanje, gdje se krajevi spajaju postupkom plazma zavarivanja, bez dodatnog materijala. Kao zaštitni plin s vanjske strane cijevi koristi se mješavina plinova trgovačkog naziva *VARIGON*, a s unutarnje strane se pomoću kapilare upuhuje mješavina pod nazivom *FORMIR*. *VARIGON* je mješavina sastavljena od 80-97% argona i 3-20% vodika, a *FORMIR* se sastoji od 80-94,3% dušika i 5,7-20% vodika. U tablici 10 prikazani su parametri zavarivanja.

Na slici 16 vidi se komora za zavarivanje, a na slici 17 prikazan je uzorak cijevi koji se koristi za vizualnu kontrolu kvalitete zavara s unutarnje strane cijevi (označen crveno).

Tablica 10. Parametri zavarivanja plazma postupkom

Brzina zavarivanja	3,5 m/min
Protok zaštitnog plina <i>VARIGON</i>	3 l/min
Protok plina <i>VARIGON</i> kroz unutarnju sapnicu	0,9 l/min
Protok plina <i>FORMIR</i>	2,5 l/min
Struja zavarivanja	70 A
Broj prolaza	1



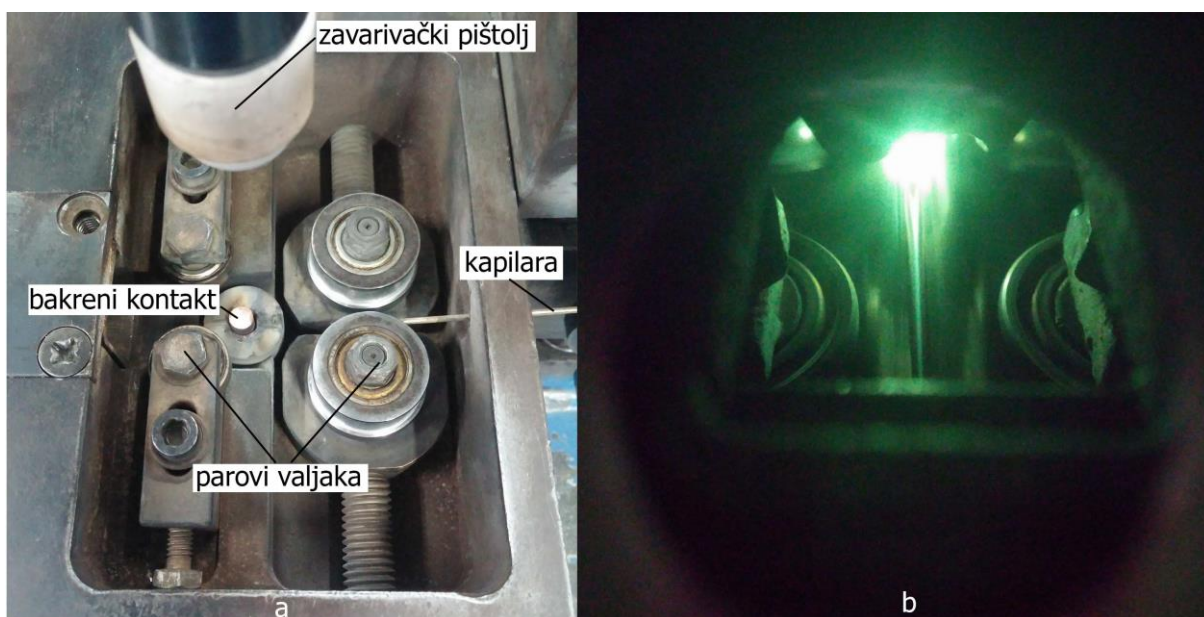
Slika 16. Komora za zavarivanje



Slika 17. Zavar s unutarnje strane cijevi

Glavna uloga komore za zavarivanje je sprečavanje otpuhivanja zaštitnog plina i zaštita radnika od UV zračenja. Komora sadrži dva para valjaka koji vode profilirani lim, bakreni kontakt za uspostavljanje strujnog kruga te kapilaru za upuhivanje zaštitnog plina. Zavarivački pištolj ima mogućnost podešavanja po sve tri osi. Kartonski poklopac komore ima otvor kroz koji se pomoću posebne leće i zavarivačkog stakla vrši vizualna kontrola procesa zavarivanja.

Na slici 18 prikazana je otvorena komora za zavarivanje i pogled kroz kontrolni prozor tijekom zavarivanja.



Slika 18. Otvorena komora za zavarivanje (a) i pogled kroz kontrolni prozor (b)

Nakon izlaska iz komore, zavarena cijev prolazi kroz još tri para valjaka te se hladi na zraku do namatanja na kolut.

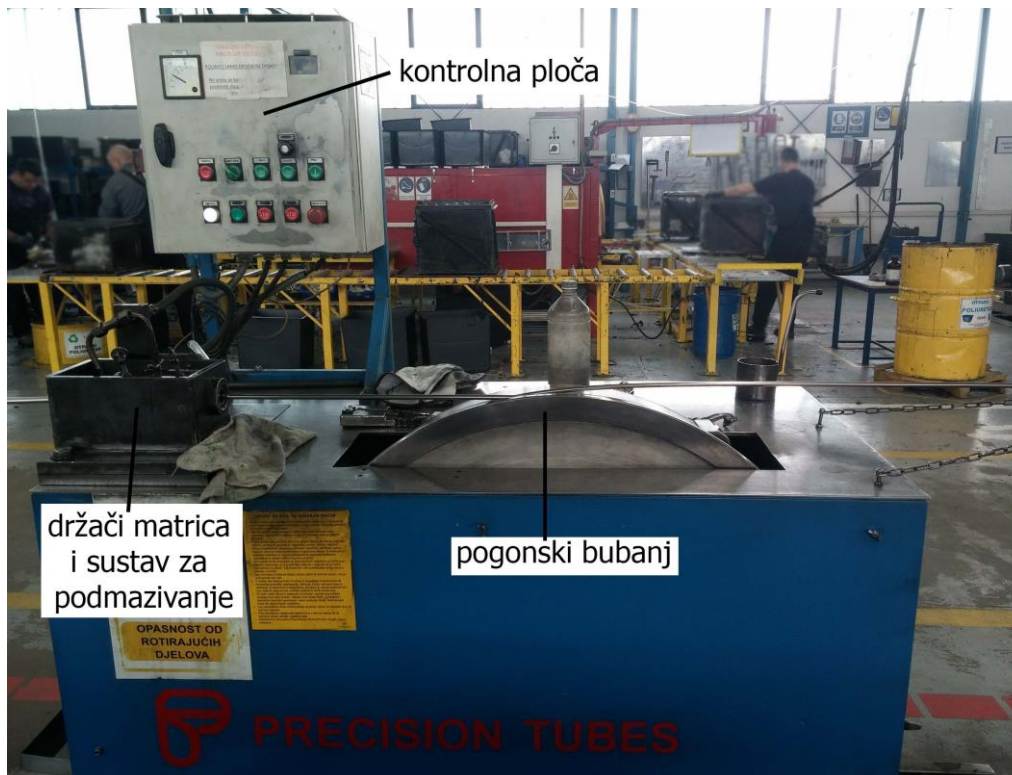
Na slici 19 prikazan je izlazak cijevi iz komore za zavarivanje i cijev namotana na kolut.



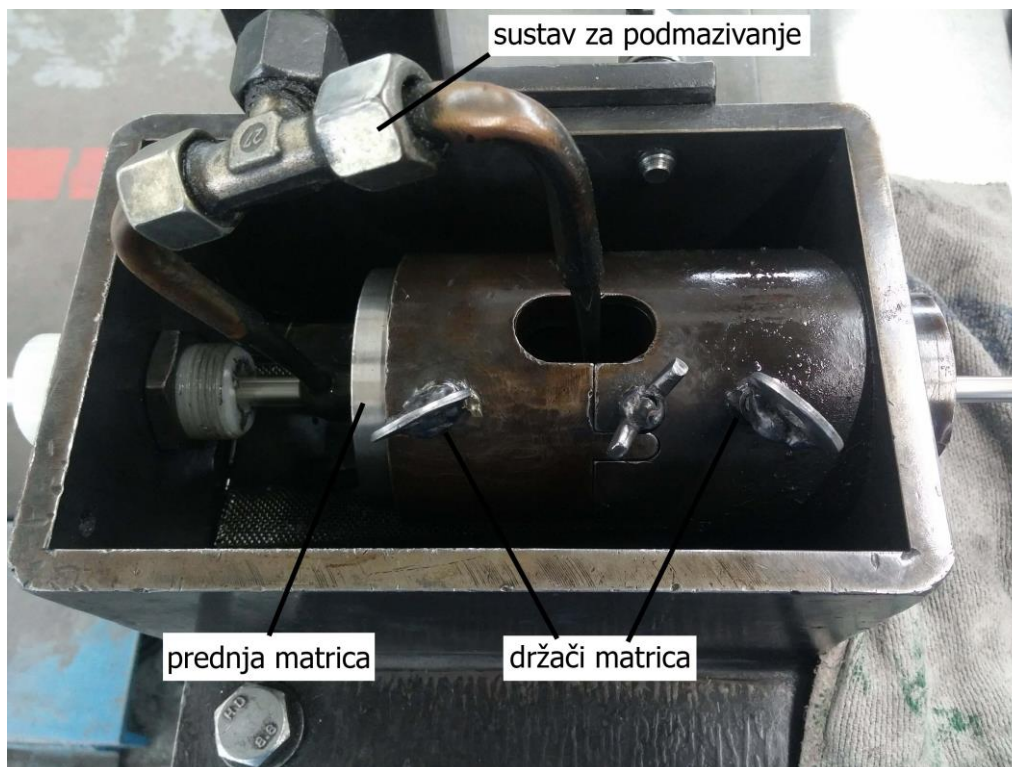
Slika 19. Izlazak cijevi iz komore za zavarivanje (a) i namatanje cijevi na kolut (b)

Nakon što se sav lim zavari, cijev namotana na kolut premješta se na postrojenje za provlačenje, slika 20. Tu se vanjski promjer cijevi smanjuje u dva koraka, prvo s ≈ 10 na 9,5 mm te na konačnih 8 mm. Prije provlačenja kroz svaku matricu cijev se obilno zalijeva mazivom kako bi se što više smanjilo trenje. Konusi matrica prevučeni su DLC prevlakama (eng. *Diamond Like Carbon*), što također doprinosi smanjenju trenja i trošenju alata. Cijev se kroz matrice provlači pomoću pogonskog bubnja silom 4 kN i brzinom 7 m/min. Nakon provlačenja cijev se briše spužvama natopljenim sredstvom za odmašćivanje te se namata na kolut.

Na slici 21 prikazani su držači matrica i sustav za podmazivanje, a na slici 22 prikazano je odmašćivanje cijevi.



Slika 20. Postrojenje za provlačenje



Slika 21. Držači matrica i sustav za podmazivanje



Slika 22. Odmašćivanje cijevi

Nakon što su cijevi kalibrirane, propuhuju se zaštitnim plinom naziva *ARGON 5.0* u trajanju od 8 minuta pod tlakom 4 bara. Nakon propuhivanja cijevi se zatvaraju kako bi zaštitni plin ostao u njima. Cijevi se nakon toga odmataju s koluta i provode kroz peć za toplinsku obradu gdje se odvija proces rastvornog žarenja.

Parametri toplinske obrade navedeni su u tablici 9.

Tablica 11. Parametri toplinske obrade

Protok goriva: 75% H ₂ + 15% N ₂	2800 l/h
Protok zaštitnog plina: N ₂	4000 l/h
Duljina peći	2 m
Temperatura: zona 1	1050 °C
Temperatura: zona 2	1080 °C
Duljina bazena za hlađenje	4 m
Izlazna temperatura vode za hlađenje	Max 30 °C
Brzina prolaska cijevi kroz peć	0,8 m/min
Maksimalan broj koluta za obradu	10

Peć za toplinsku obradu je podijeljena u dvije temperaturne zone. Prva je zagrijana na 1050 °C, a druga na 1080 °C. Nakon prolaska kroz obje zone cijevi se naglo hlade u bazenu s vodom čime se želi spriječiti zadržavanje austenitnog čelika u temperaturnom rasponu gdje postoji opasnost od nastanka nepoželjnih strukturnih faza. Pri izlasku iz bazena za hlađenje, na cijevi se ispisuju podaci o dimenziji, materijalu, datumu proizvodnje i proizvođaču.

Na slici 23 prikazan je ulaz i izlaz cijevi iz peći.

Nakon toplinske obrade cijevi se namataju na kolute prikazane na slici 24 te se kasnije testiraju i pakiraju.



Slika 23. Ulaz cijevi u peć za toplinsku obradu (a) i izlaz cijevi iz peći za toplinsku obradu (b)



Slika 24. Sustav za namatanje gotovih cijevi

4.4. Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture

Kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uzorci na kojima je provedena analiza mikrostrukture prikazani su na slici 25. Lijevo na slici su uzorci polaznog lima (za poprečni i uzdužni presjek), a dalje slijede uzorci cijevi nakon zavarivanja, nakon provlačenja te nakon toplinske obrade.



Slika 25. Uzorci za analizu mikrostrukture

Zalijevanje uzoraka u masu provodi se na uređaju *BUEHLER*. Uzorci se postavljaju na platformu uređaja koja se nakon toga spusti te se u cilindar stave tri mjerice praha vodljive fenolne smole. Cilindar se tada zatvara te se grije na 143 ± 5 °C, pod tlakom od 2,5 bara 15 min. Nakon toga slijedi period hlađenja 30 min. Vodljiva smola se u ovom slučaju koristi zbog toga što se nehrđajući čelici nagrizažu elektrokemijski.

Na slici 26 prikazani su uzorci postavljeni na platformu uređaja za zalijevanje i uzorci zaliveni u masu.



Slika 26. Uzorci postavljeni na platformu (a) i uzorci zaliveni u masu (b)

Nakon zalijeivanja slijedi mehanička priprema uzoraka. Brušenje uzoraka provodi se u šest koraka na brusnim papirima sve finije granulacije, na uređaju za brušenje *BUEHLER PHOENIX ALPHA*. Uređaj je prikazan na slici 27.

Parametri brušenja svakog koraka navedeni su u tablici 12.

Tablica 12. Parametri brušenja

Korak	Granulacija brusnog papira	Brzina rotacije ploče za brušenje [o/min]	Hlađenje	Orijentacija uzorka	Sila pritiska
1.	120	300	vodeno	0°	ručna
2.	320	300	vodeno	+ 90°	ručna
3.	500	300	vodeno	0°	ručna
4.	1000	300	vodeno	+ 90°	ručna
5.	2000	300	vodeno	0°	ručna
6.	4000	300	vodeno	+ 90°	ručna



Slika 27. Brušenje uzoraka

Poliranje se provodi na uređaju *Struers DAP-V* u dva koraka, s parametrima navedenim u tablici 13. Postupak poliranja prikazan je na slici 28.

Tablica 13. Parametri poliranja

Korak	Veličina zrna dijamantne paste [μm]	Brzina rotacije ploče za poliranje [o/min]	Hlađenje / mazivo	Vrijeme poliranja [min]	Sila pritiska [N]
1.	3	150	voda + alkohol	2	30
2.	1	150	voda + alkohol	2	30



Slika 28. Poliranje uzoraka

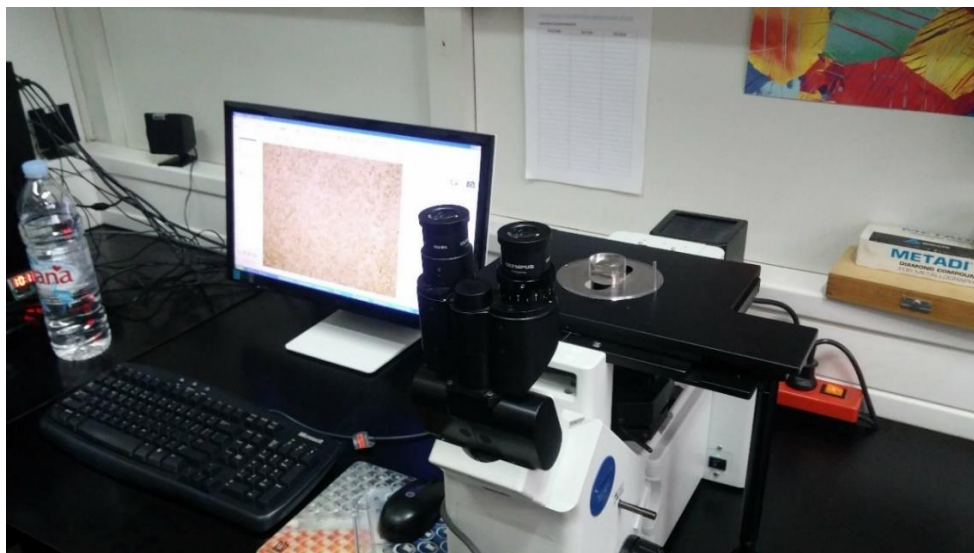
Nakon poliranja uzorci se elektrokemijski nagrizzaju u 10%-tnoj oksalnoj kiselini, strujom jakosti 4 A, pod naponom od 7 V. Trajanje nagrizzanja određuje se vizualnom kontrolom, a nakon postizanja zadovoljavajuće nagrizenosti uzorci se ispiru vrućom vodom.

Na slici 29 prikazana je kupka s oksalnom kiselinom i držač uzorka koji je spojen na izvor električne struje.



Slika 29. Nagrizzanje uzoraka

Metalografska analiza provodi se na optičkom mikroskopu *OLYMPUS GX51*, prikazanom na slici 30. Uzorci se prvo analiziraju u poliranom stanju, a zatim i u nagriženom stanju. Mjerenje mikrotvrdoće provodi se na nenagriženim uzorcima s poliranom površinom zbog lakšeg očitavanja otiska. Mjerenje je provedeno na mikrotvrdomjeru *PMT3* metodom po Vickersu uz opterećenje od 1 N (HV 0,1). Uređaj je prikazan na slici 31.



Slika 30. Optički mikroskop *OLYMPUS GX51*



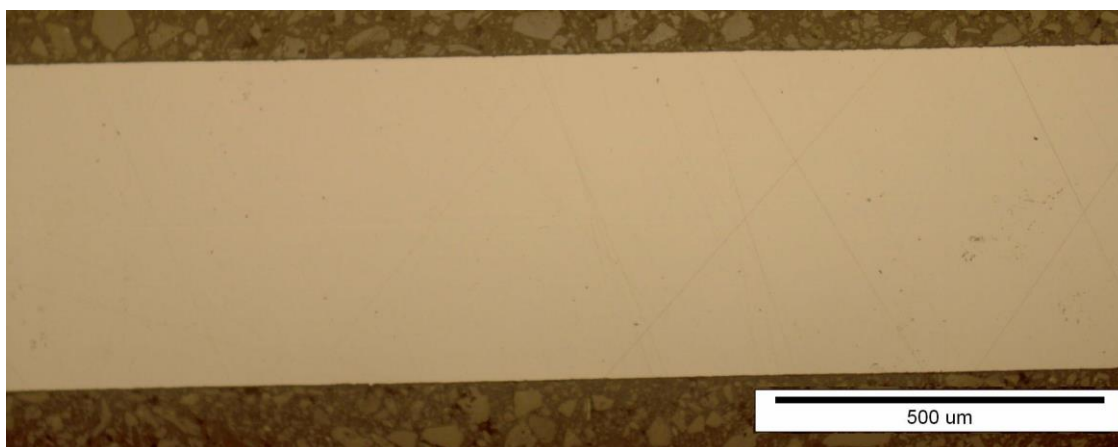
Slika 31. Mikrotvrdomjer *PMT3*

4.5. Analiza mikrostrukture polaznog lima

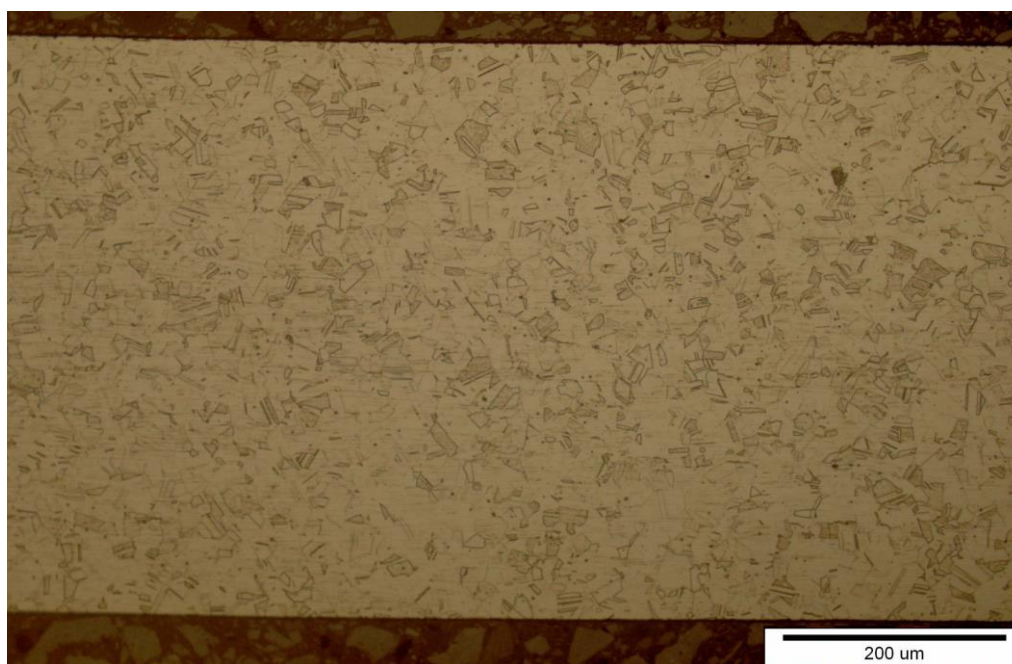
Za potrebe ove analize pripremljena su dva uzorka polaznog lima. Jedan uzorak je poprečni presjek lima, a drugi je uzdužni presjek, s obzirom na smjer valjanja.

Na slici 32 prikazana je mikrostruktura poliranog uzorka poprečnog presjeka lima snimljena pri povećanju 100×. Na površini uzorka nisu uočene nikakve nepravilnosti, samo se mjestimice mogu uočiti tragovi pripreme uzorka.

Mikrostruktura istog uzorka u nagriženom stanju prikazana je na slici 33. U potpunosti se sastoji od austenita i relativno je sitnozrnata. Austenitna zrna su pravilnog oblika, a usmjerenost mikrostrukture uslijed valjanja nazire se u valovitim linijama uzduž cijele površine presjeka.

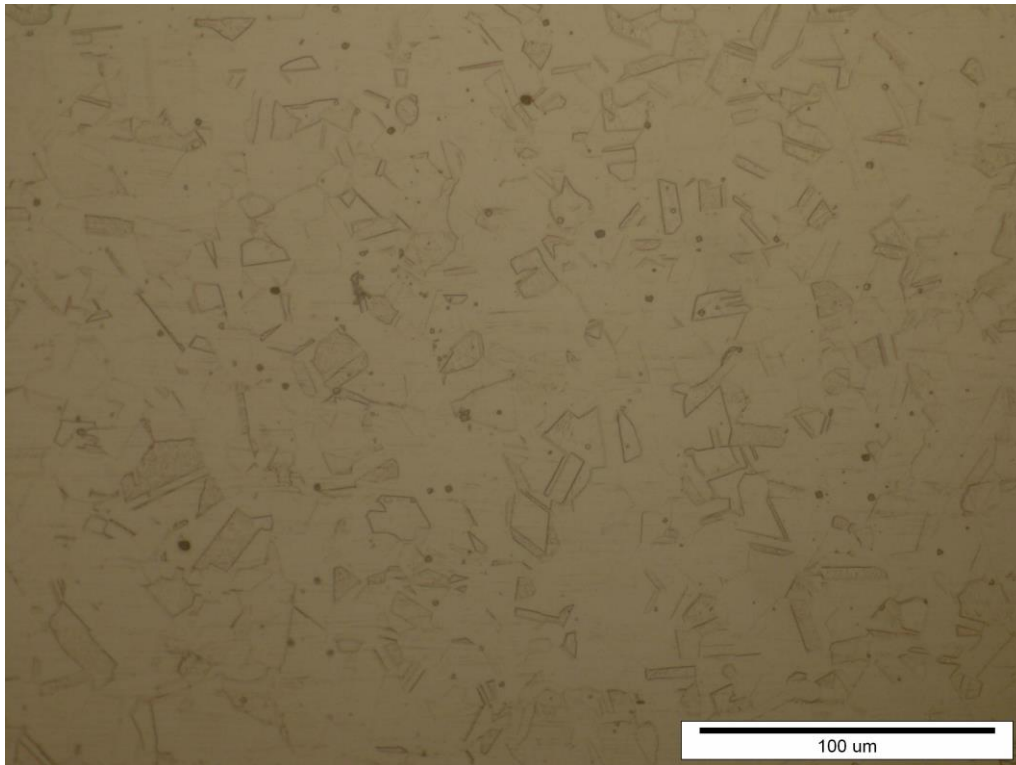


Slika 32. Površina poprečnog presjeka lima u poliranom stanju



Slika 33. Mikrostruktura poprečnog presjeka lima u nagriženom stanju

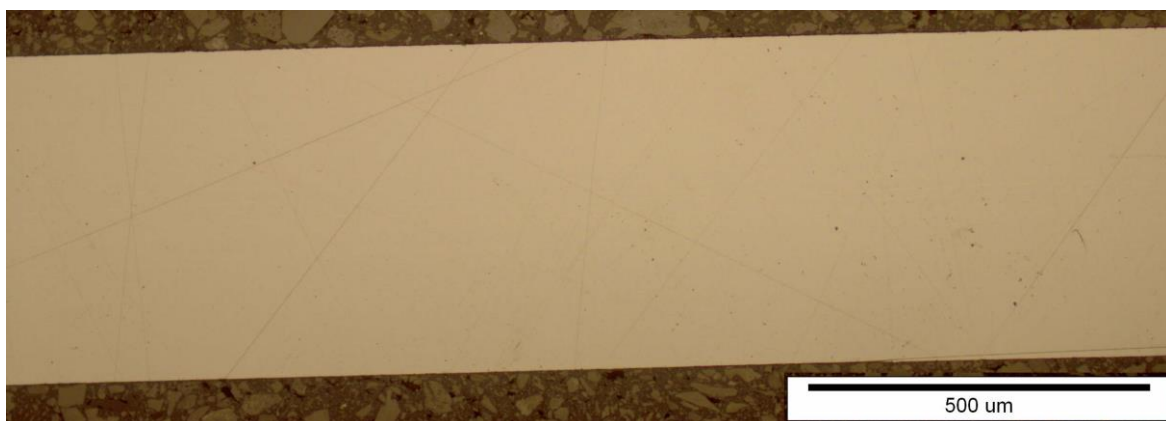
Na slici 34 vidi se mikrostruktura istog uzorka snimljena pri većem povećanju (500×). Lijepo se vide austenitna zrna s jasno izraženim granicama i kristalima blizancima.



Slika 34. Austenitna mikrostruktura u poprečnom presjeku

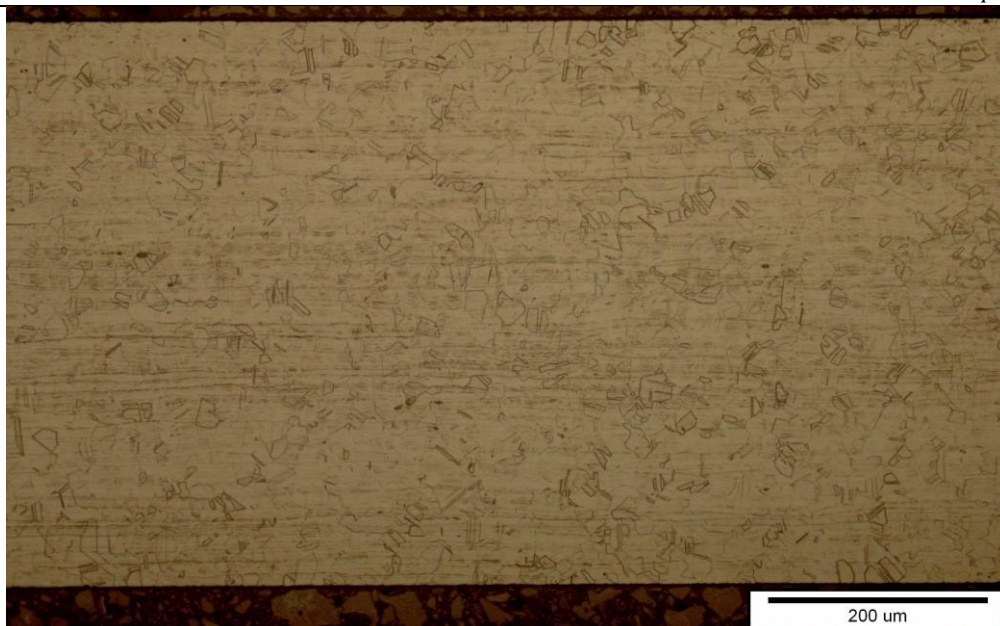
Na slici 35 prikazana je površina poliranog uzorka uzdužnog presjeka lima, snimljena pri povećanju 100×, na kojoj se također mogu uočiti tragovi pripreme.

U poliranom stanju nema razlike između poprečnog i uzdužnog presjeka polaznog lima.



Slika 35. Površina uzdužnog presjeka lima u poliranom stanju

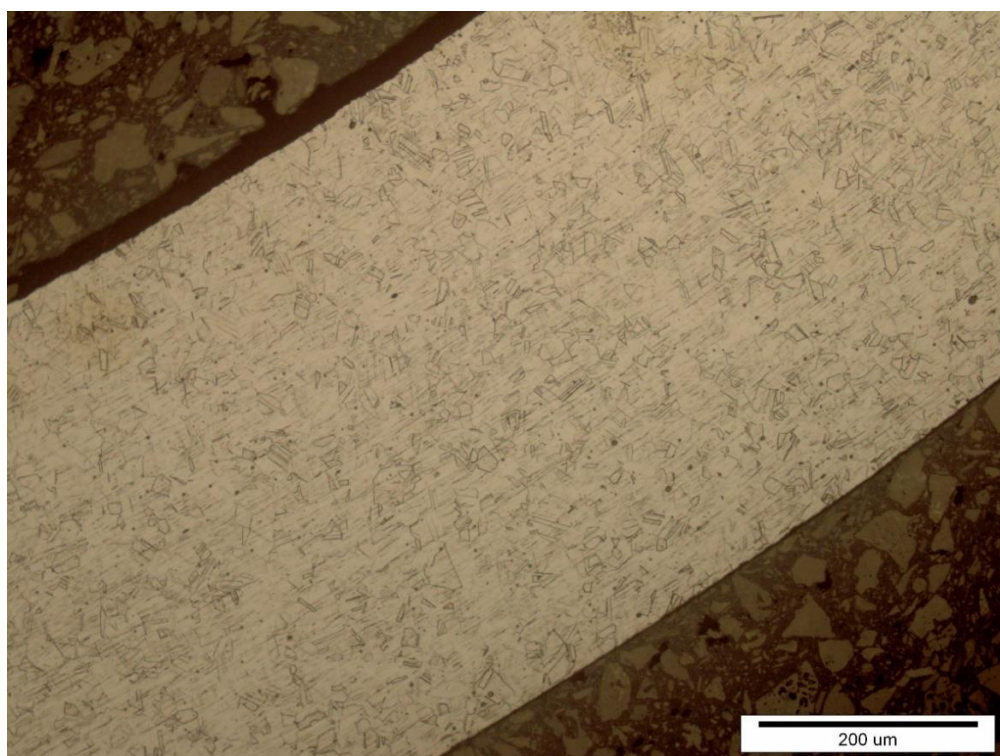
Mikrostruktura uzdužnog presjeka lima vrlo je slična mikrostrukturi u poprečnom presjeku i prikazana je na slici 36. U ovom presjeku usmjerenost uslijed valjanja je nešto jače izražena.



Slika 36. Mikrostruktura nagriženog uzorka uzdužnog presjeka lima

4.6. Analiza mikrostrukture cijevi nakon savijanja

Na slici 37 prikazana je mikrostruktura lima nakon savijanja, u nagriženom stanju. Stupanj deformacije pri savijanju u hladnom stanju nije bio dovoljno velik da izazove bilo kakve promjene u mikrostrukturi lima.

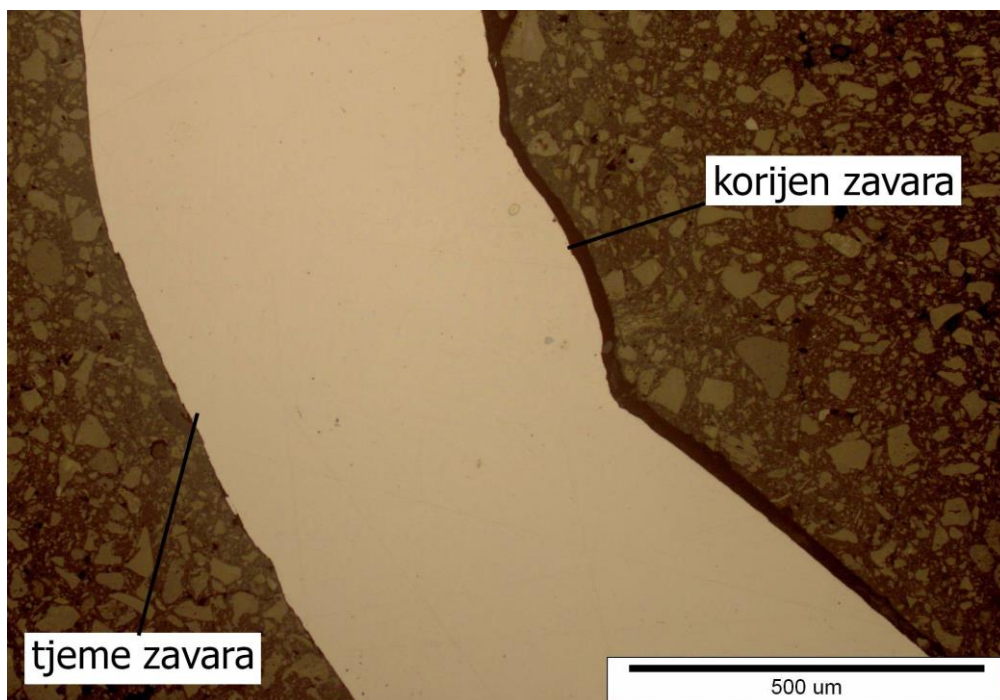


Slika 37. Nagrižena mikrostruktura osnovnog materijala uzorka cijevi nakon zavarivanja, povećanje 200x

4.7. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja

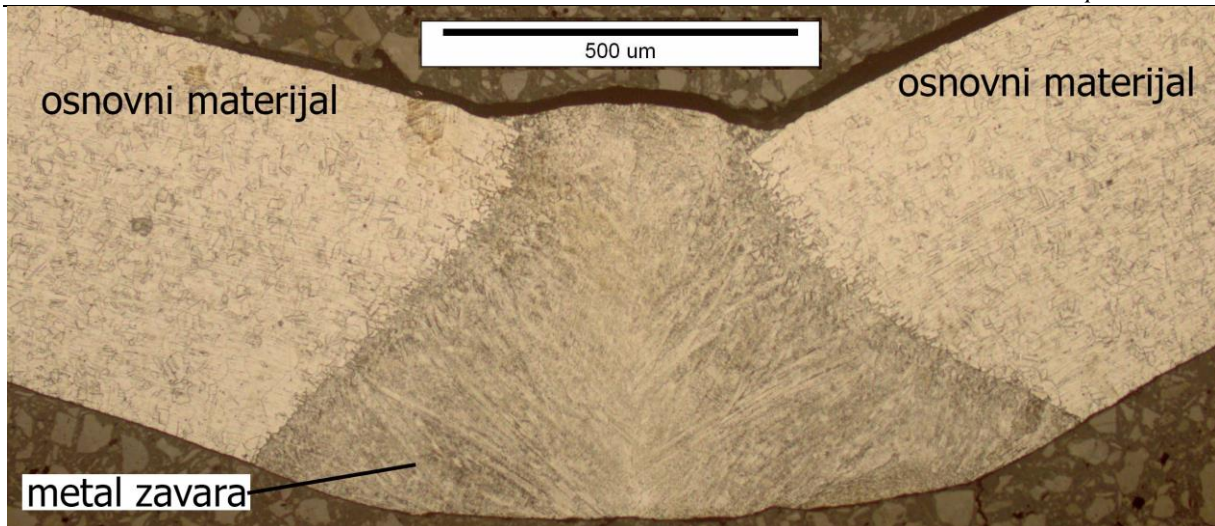
Pri analizi zavarenog spoja posebna pozornost posvećena je mikrostrukтури metala zavara i mikrostrukturnim promjenama u zoni utjecaja topline. Detaljno su analizirani korijen, sredina i tjeme zavara u poliranom i nagriženom stanju, pri povećanjima od 50× do 1000×.

Na slici 38 prikazana je polirana površina zavarenog spoja na poprečnom presjeku cijevi, snimljena pri povećanju 100×. Na uzorku nisu uočene nikakve nepravilnosti.

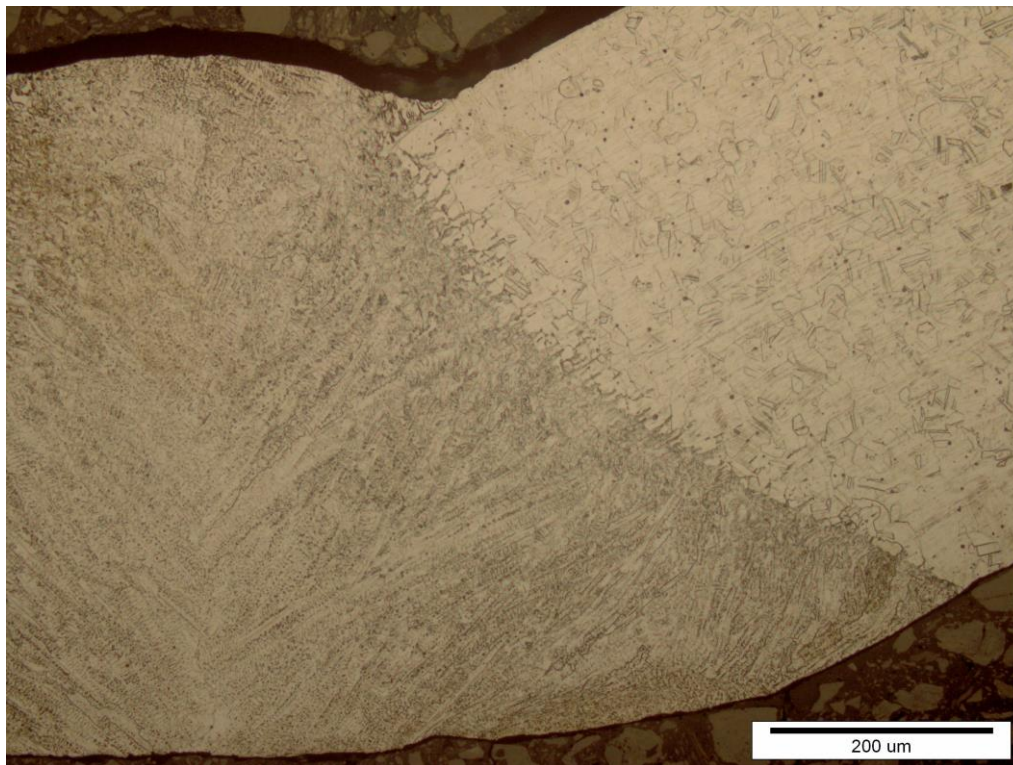


Slika 38. Površina zavarenog spoja u poliranom stanju

Da bi se otkrila mikrostruktura metala zavara i zone utjecaja topline, površina uzorka je nakon poliranja elektrokemijski nagrižena. Mikrostruktura zavarenog spoja u nagriženom stanju prikazana je na slici 38. Na slici se jasno vidi pravilna geometrija zavarenog spoja, usmjerenost ljevačke mikrostrukture u metalu zavara, linija staljivanja i širina zone utjecaja topline. Sve navedeno vidi se još detaljnije na slici 39, snimljenoj pri dva puta većem povećanju.



Slika 39. Mikrostruktura zavarenog spoja u nagriženom stanju



Slika 40. Mikrostruktura metala zavara i ZUT-a

Pri većim povećanjima mogu se detaljnije vidjeti mikrostrukturne promjene izazvane zavarivanjem. Na slici 40 prikazana je mikrostruktura metala zavara od korijena preko sredine do tjemena snimljena pri povećanju 500 \times . Nema veće razlike između navedenih područja, mikrostruktura je tipična ljevačka mikrostruktura s usmjerenim dendritima, bez uočenih nepravilnosti.

Na slici 41 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline od korijena prema sredini, a na slici 42 od tjemena prema sredini zavarenog spoja.

Linija staljivanja je prilično jasno izražena po cijeloj visini zavara.

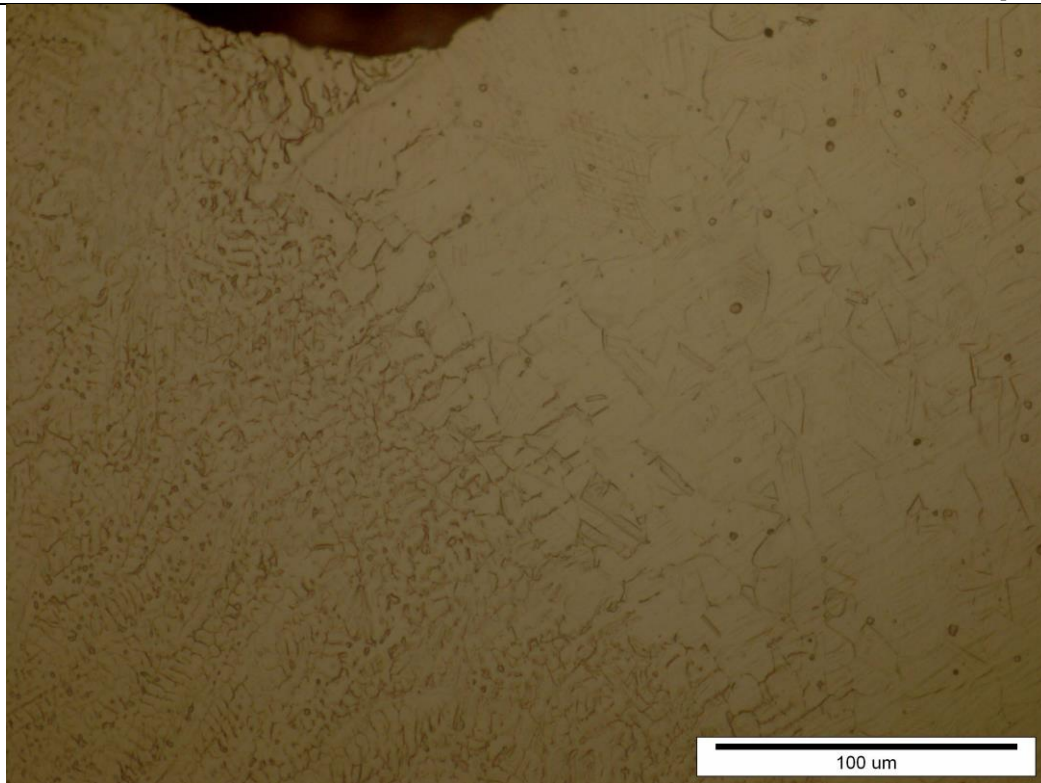
Zona utjecaja topline je relativno uska. Mjestimice se vide jače izražene granice austenitnih zrna što bi moglo ukazivati na izlučene nakupine neželjenih faza u tom području.

Mikrostrukture ZUT-a korijena, sredine i tjemena se ne razlikuju.

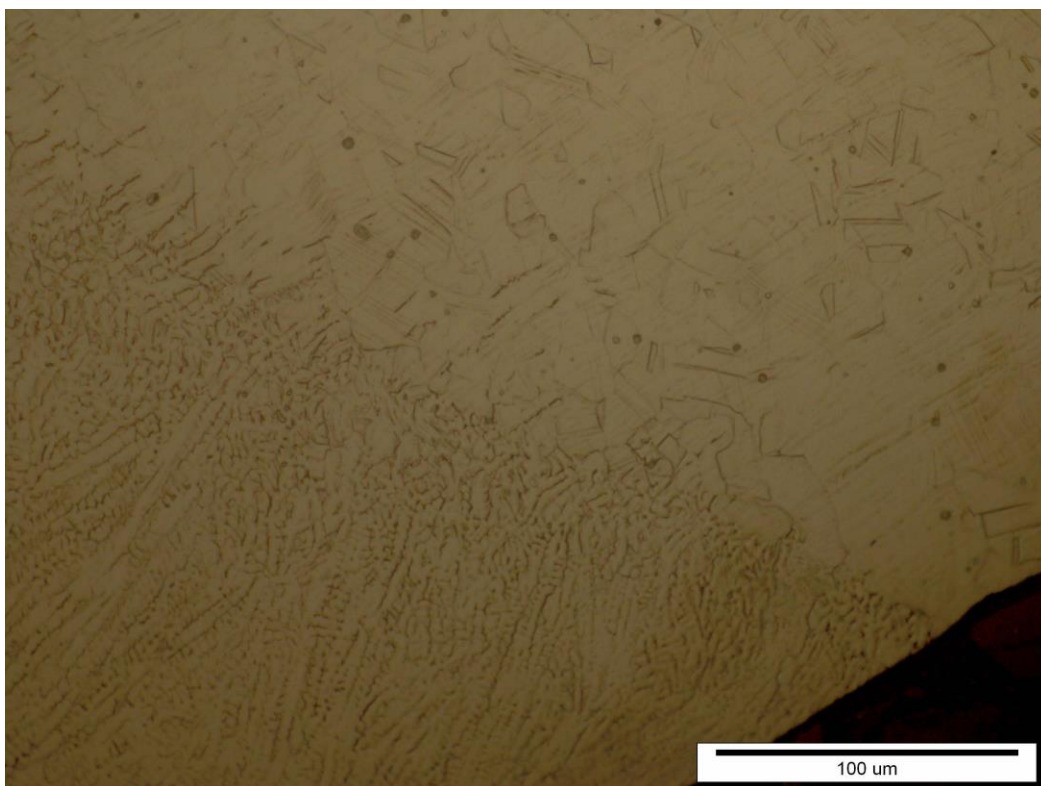
Sve navedeno ukazuje na dobru kvalitetu provedenog postupka zavarivanja.



Slika 41. Mikrostruktura metala zavara u nagiženom stanju



Slika 42. Mikrostruktura ZUT-a korijena zavora

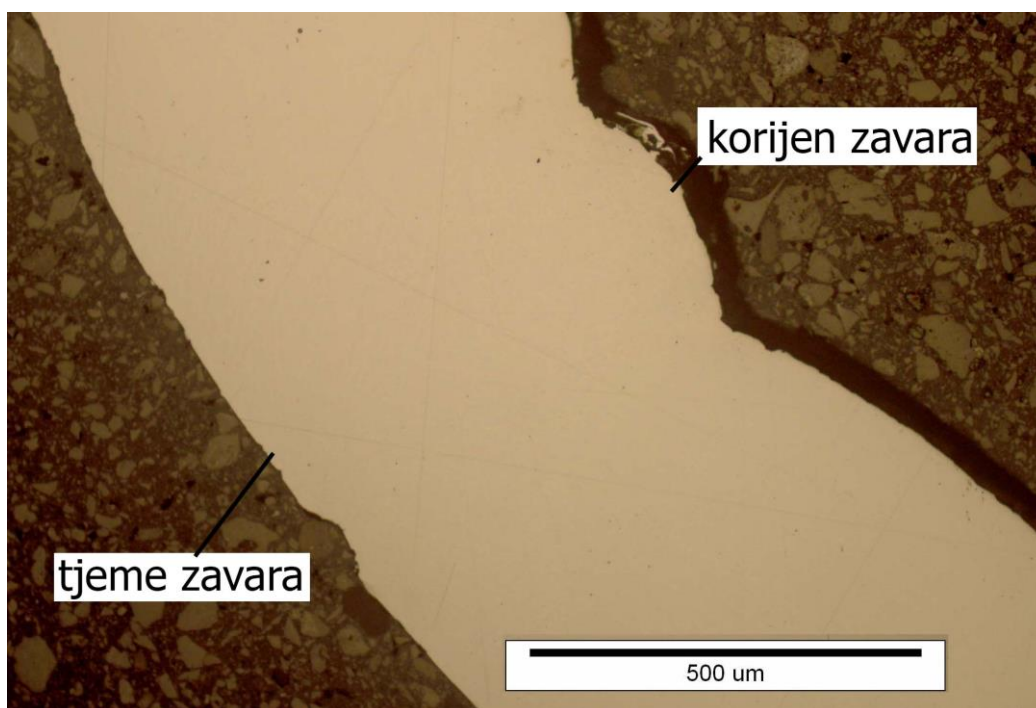


Slika 43. Mikrostruktura ZUT-a tjemena zavora

4.8. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja i osnovnog materijala nakon provlačenja

Na slikama od 44 do 50 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala i zavarenog spoja nakon postupka provlačenja. Tijekom provlačenja smanjuje se promjer cijevi, poboljšava se kružnost vanjskog profila cijevi, a stijenka ostaje približno iste debljine.

Na slici 44 koja prikazuje poliranu površinu poprečnog presjeka cijevi nakon provlačenja, vidljivo je poboljšanje kružnosti vanjskog profila cijevi i veći stupanj nepravilnosti unutarnjeg profila cijevi u odnosu na uzorak nakon zavarivanja.



Slika 44. Površina zavarenog spoja u poliranom stanju nakon provlačenja

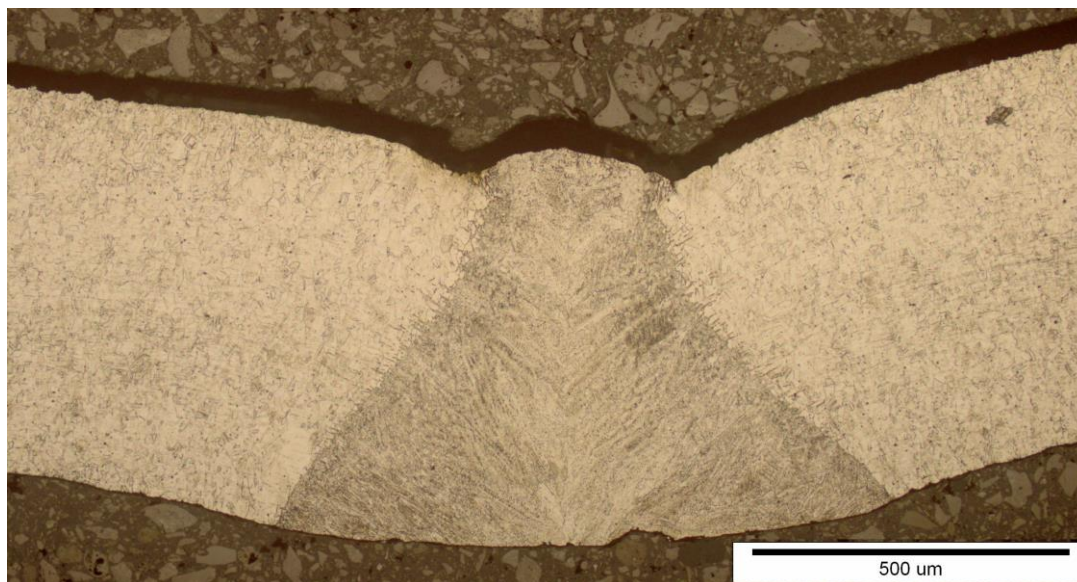
Na slici 45 prikazan je isti uzorak u nagriženom stanju. U usporedbi s uzorkom prije provlačenja, ovaj uzorak ima puno jače nagriženu površinu iako su oba uzorka nagrizana u identičnim uvjetima. To je posljedica većih zaostalih naprezanja koja su nastala uslijed intenzivne hladne deformacije pri provlačenju. Austenitna zrna su ugnječena po cijelom presjeku cijevi, a osobito su „zbijena“ na unutarnjem rubu.

Pri provlačenju je došlo i do promjene oblika i dimenzija zavarenog spoja. Zbog intenzivnog sabijanja materijala smanjila se širina zavarenog spoja, a korijen zavara se izbočio prema središtu cijevi, slika 46.

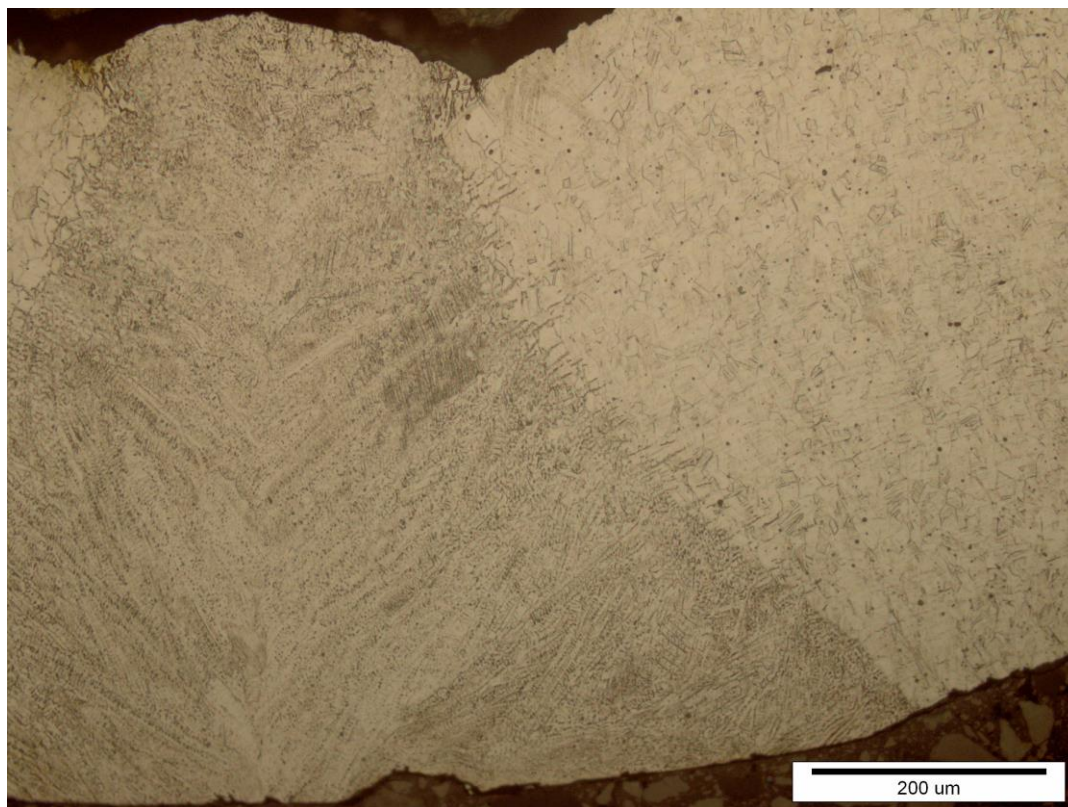
U metalu zavara također je došlo do ugnječanja mikrostrukture što je vidljivo na slici 47.

Na slikama 48 i 49 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu i tjemenu. I ovdje su vidljive posljedice intenzivne plastične deformacije.

Na slici 50 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala cijevi nakon provlačenja.



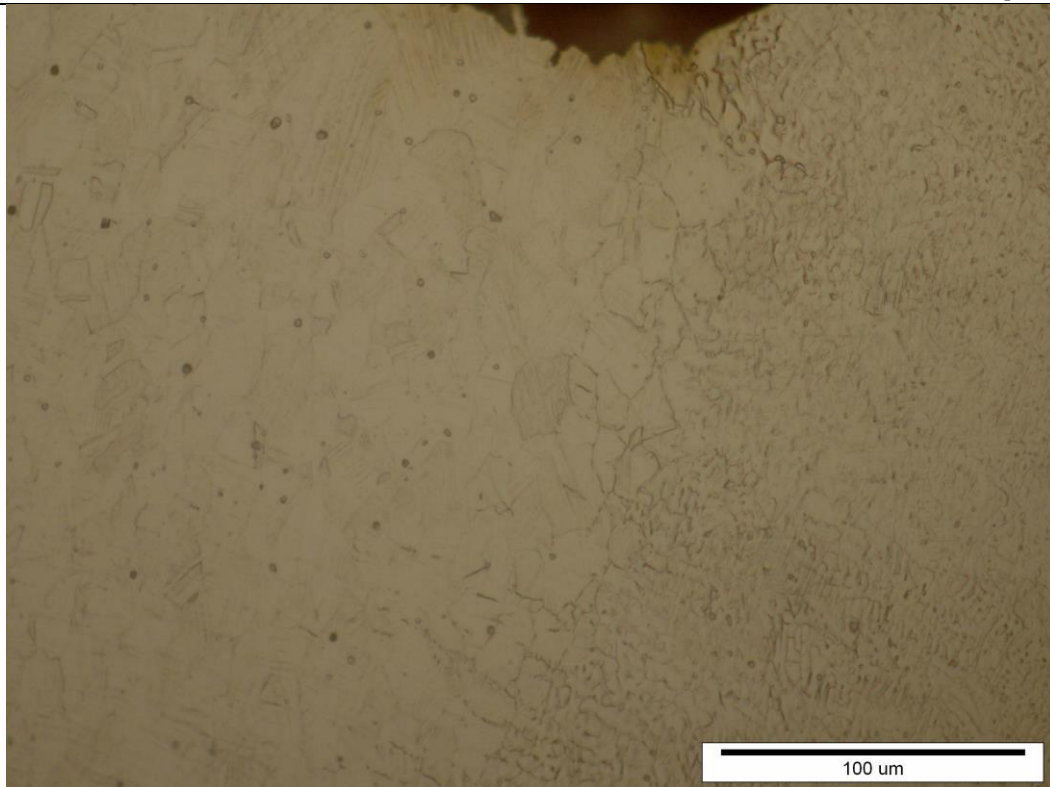
Slika 45. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon provlačenja u nagriženom stanju



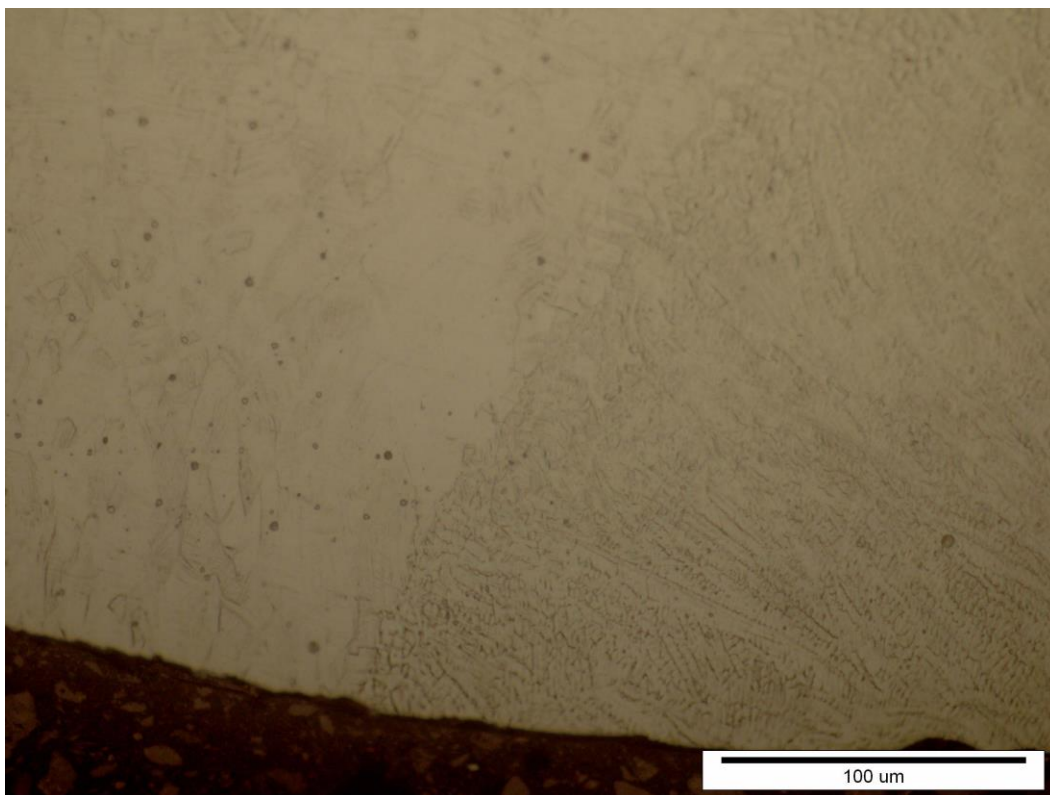
Slika 46. Mikrostruktura metala zavara i ZUT-a nakon provlačenja



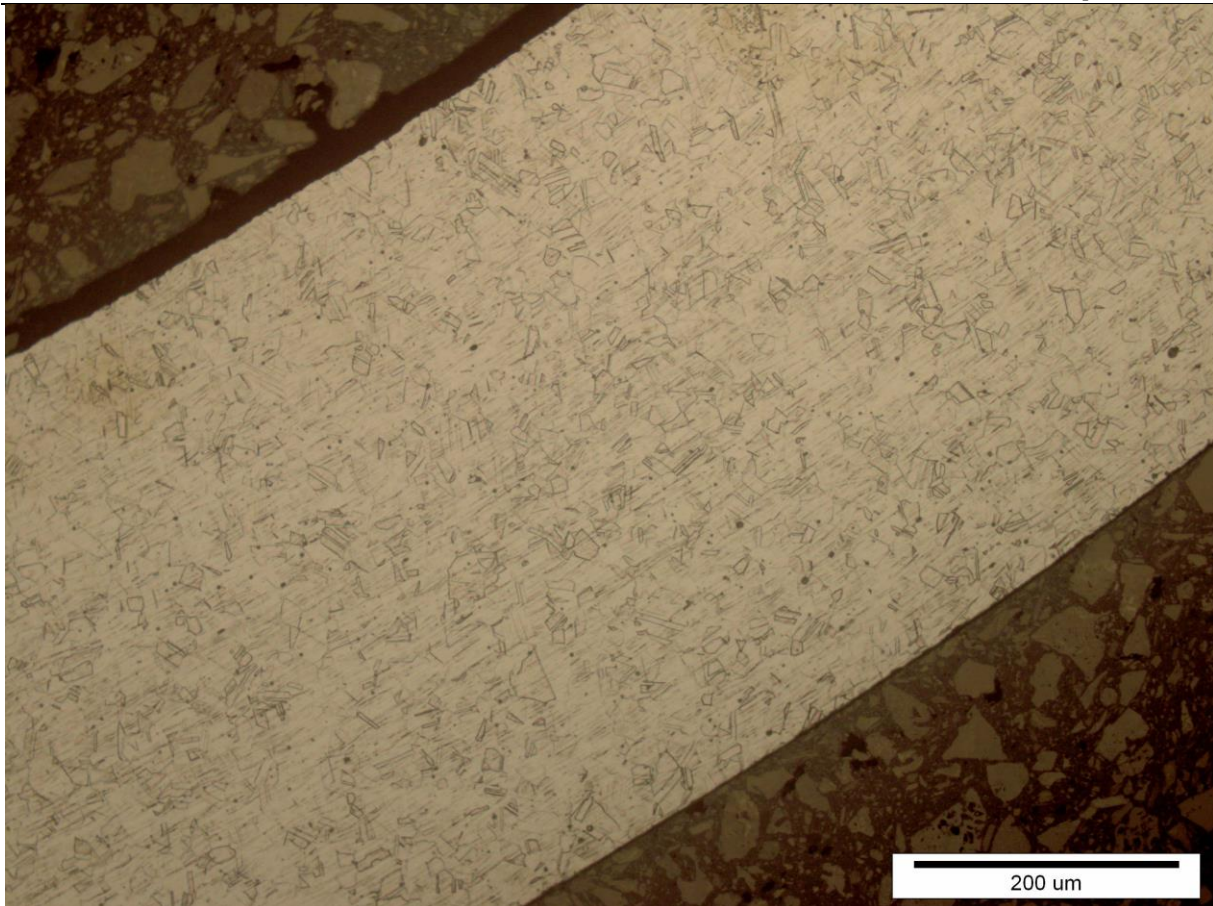
Slika 47. Mikrostruktura metala zavara nakon provlačenja



Slika 48. Mikrostruktura ZUT-a korijena zavara nakon provlačenja



Slika 49. Mikrostruktura ZUT-a tjemena zavara nakon provlačenja



Slika 50. Mikrostruktura osnovnog materijala cijevi nakon provlačenja

4.9. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja i osnovnog materijala nakon rastvornog žarenja

Svrha rastvornog žarenja je homogenizacija mikrostrukture i smanjenje zaostalih naprezanja nastalih uslijed zavarivanja i provlačenja u hladnom stanju.

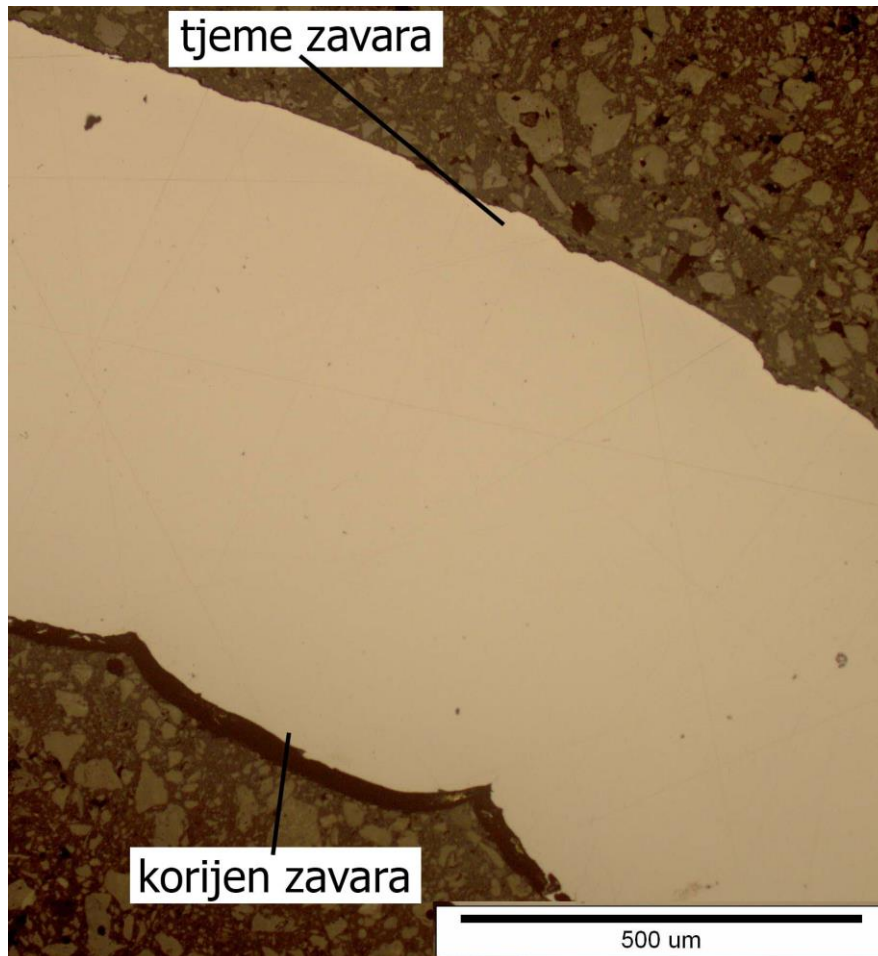
Na slici 51 prikazana je površina dijela poprečnog presjeka cijevi sa zavarenim spojem nakon rastvornog žarenja u poliranom stanju.

Mikrostruktura zavarenog spoja i osnovnog materijala u nagriženom stanju prikazane su na slikama od 52 do 57. Odmah se može uočiti znatno manji stupanj nagriženosti uzorka (i osnovnog materijala i zavarenog spoja) u odnosu na stanje prije žarenja, iako su svi uzorci nagrizeni u identičnim uvjetima. Zbog toga su granice austenitnih zrna slabije izražene, slike 52 i 53. To se može objasniti manjom količinom zaostalih naprezanja nakon toplinske obrade.

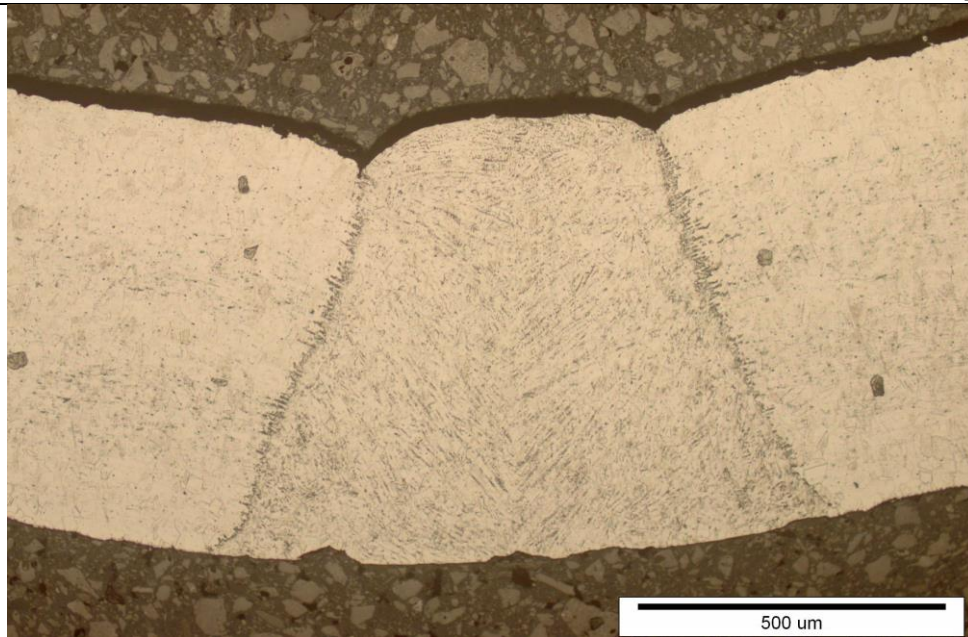
Na slici 54 prikazana je mikrostruktura metala zavara nakon toplinske obrade.

Na slikama 55 i 56 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline. U odnosu na stanje prije toplinske obrade, na granicama austenitnih zrna u ZUT-u, nema tako puno izlučenih neželjenih faza. One koje i jesu prisutne, žarenjem su poprimile sferoidizirani oblik i nisu međusobno povezane.

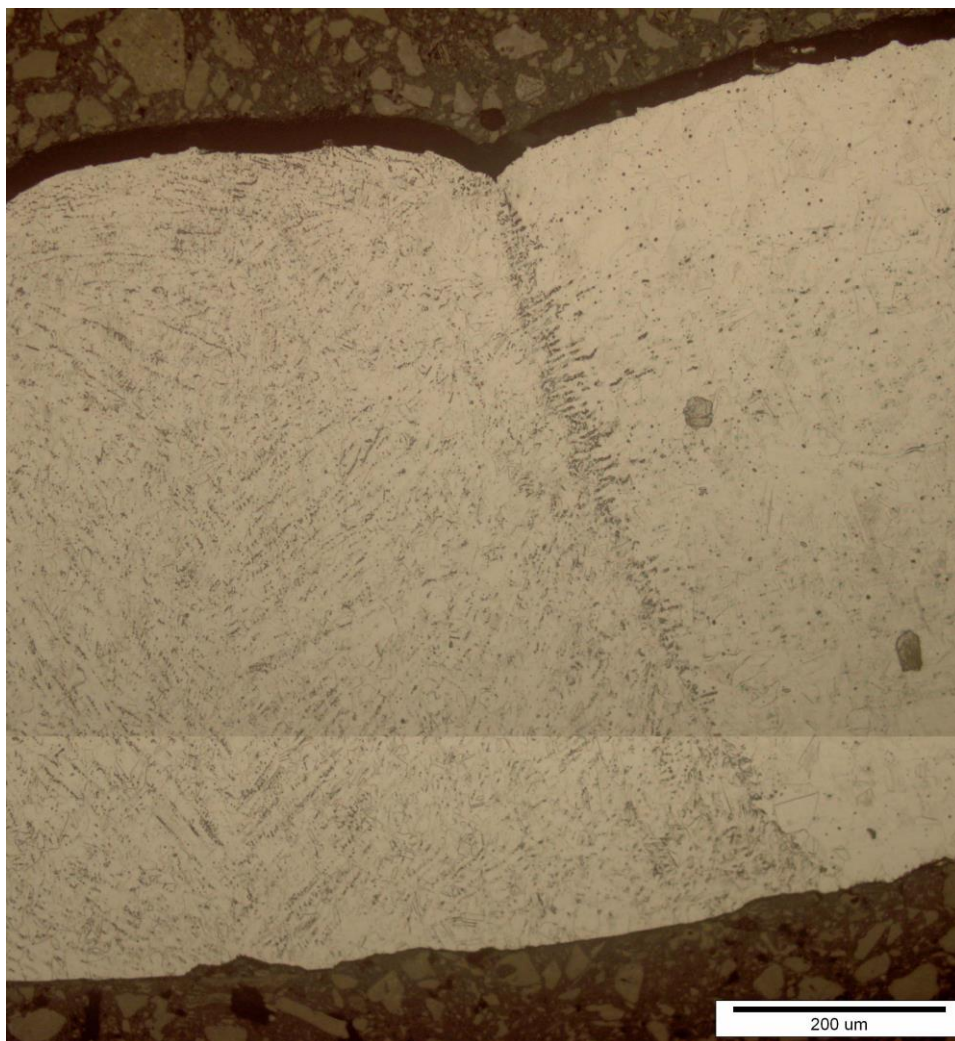
Mikrostruktura osnovnog materijala nakon rastvornog žarenja može se vidjeti na slici 57.



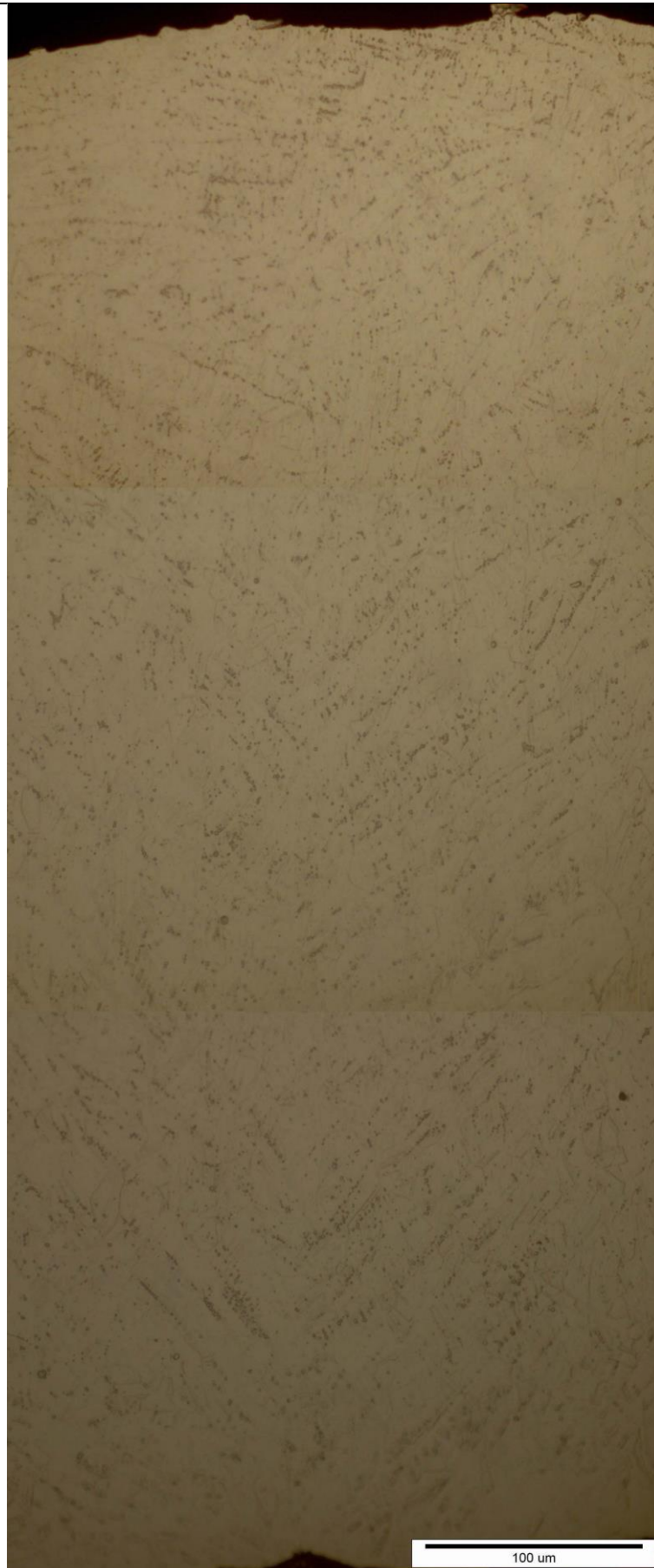
Slika 51. Površina zavarenog spoja u poliranom stanju nakon toplinske obrade



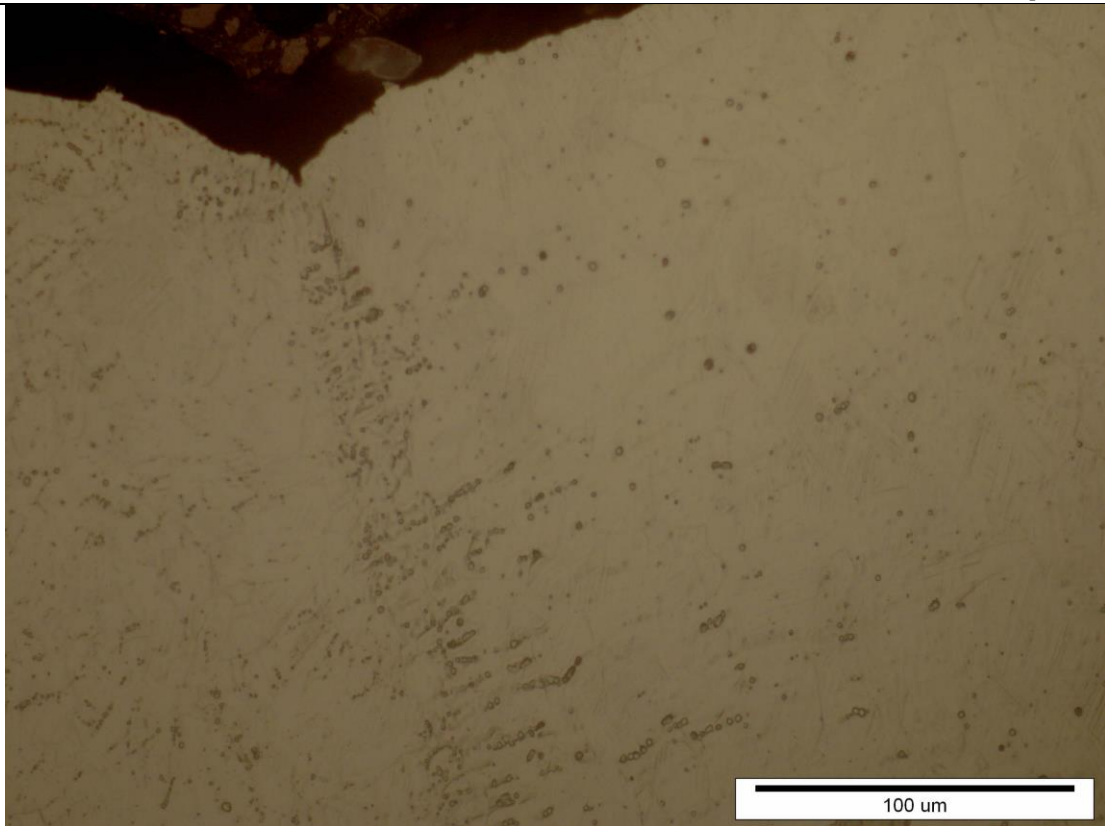
Slika 52. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja



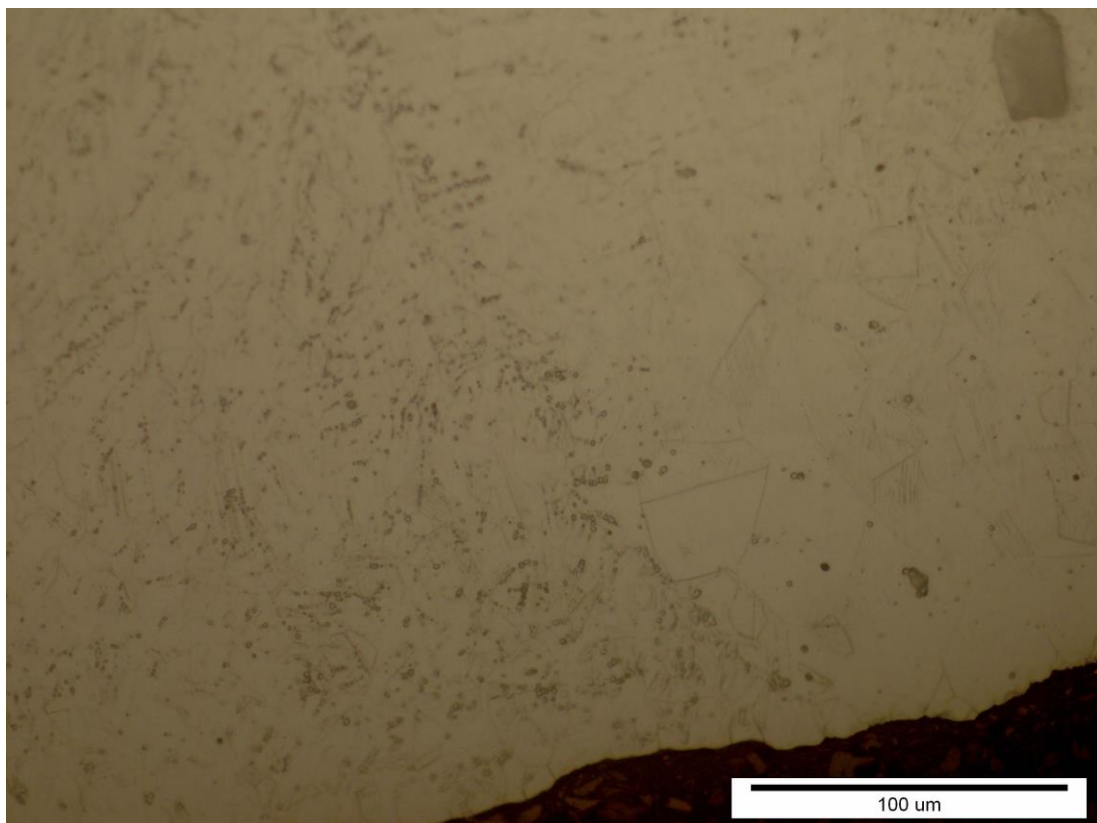
Slika 53. Mikrostruktura metala zavara i ZUT-a nakon rastvornog žarenja



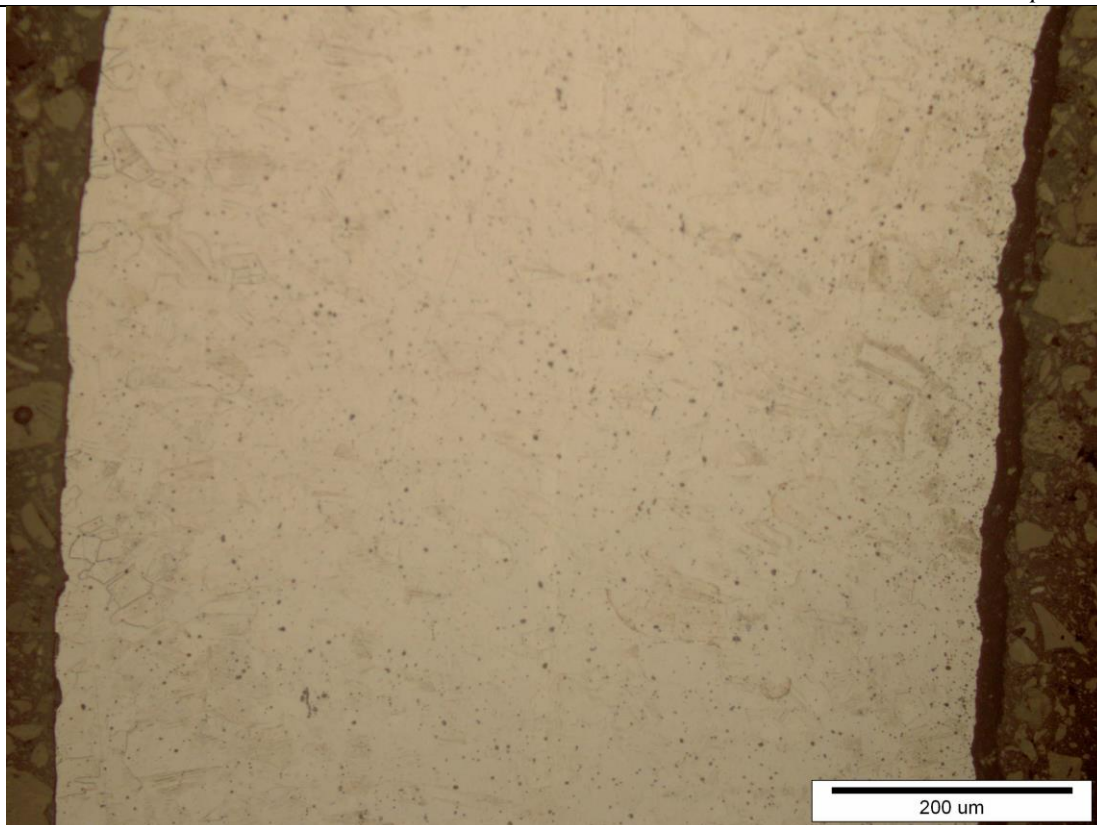
Slika 54. Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja



Slika 55. Mikrostruktura ZUT-a korijena nakon rastvornog žarenja



Slika 56. Mikrostruktura ZUT-a tjemena nakon rastvornog žarenja



Slika 57. Mikrostruktura osnovnog materijala cijevi nakon rastvornog žarenja

4.10. Kvantitativna analiza mikrostrukture – mikrotvrdoća HV 0,1

Mjerenjem mikrotvrdoće materijala od faze lima do gotove cijevi pratio se utjecaj mikrostrukturnih promjena na mikrotvrdoću.

Mikrotvrdoća lima mjerena je uzdužnom i poprečnom presjeku. Nakon provedenog zavarivanja i sljedećih faza proizvodnje, mikrotvrdoća je mjerena u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara.

Na svakoj poziciji mjerenja su tri puta ponovljena te su izračunate aritmetičke sredine.

U tablici 14 prikazane su izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće za određena mjesta na uzorcima.

Tablica 14. Izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće

UZORAK	MJESTO	MJERENJE	HV 0,1	ARITMETIČKA SREDINA HV 0,1
lim - poprečni presjek	vanjski rub	1	251	251
		2	256	
		3	245	
	sredina	1	235	233
		2	235	
		3	230	
	unutarnji rub	1	245	238
		2	240	
		3	230	
lim - uzdužni presjek	vanjski rub	1	220	202
		2	179	
		3	207	
	sredina	1	178	213
		2	225	
		3	235	
	unutarnji rub	1	165	158
		2	154	
		3	154	
cijev nakon zavarivanja	tjeme zavora	1	294	279
		2	268	
		3	274	
	sredina zavora	1	256	239
		2	245	
		3	216	
	korijen zavora	1	175	190
		2	203	
		3	192	
	ZUT tjemena zavora	1	157	159
		2	175	
		3	146	
	ZUT sredine zavora	1	207	233
		2	325	
		3	168	
	ZUT korijena zavora	1	287	265
		2	297	
		3	212	
sredina osnovnog materijala	1	142	161	
	2	185		
	3	157		

cijev nakon provlačnja	tjeme zavara	1	325	305
		2	287	
		3	302	
	sredina zavara	1	240	239
		2	302	
		3	175	
	korijen zavara	1	256	297
		2	302	
		3	333	
	vanjski rub osnovnog materijala	1	235	277
		2	287	
		3	309	
sredina osnovnog materijala	1	203	239	
	2	251		
	3	262		
unutarnji rub osnovnog materijala	1	245	268	
	2	302		
	3	256		
cijev nakon toplinske obrade	tjeme zavara	1	230	282
		2	274	
		3	342	
	sredina zavara	1	206	262
		2	294	
		3	287	
	korijen zavara	1	235	248
		2	216	
		3	294	
	ZUT tjemena zavara	1	287	263
		2	256	
		3	245	
	ZUT sredine zavara	1	325	291
		2	281	
		3	268	
	ZUT korijena zavara	1	287	276
		2	268	
		3	274	
	sredina osnovnog materijala	1	185	207
		2	212	
		3	225	

Vrijednosti mikrotvrdoće dobivene na poprečnom presjeku lima nešto su više od onih na uzdužnom presjeku. Ove razlike su posljedica samog procesa valjanja prilikom kojeg se dobiva usmjerena mikrostruktura. Tvrdoća materijala je u takvom slučaju veća okomito na smjer valjanja nego u smjeru valjanja. Iako se ne mogu uspoređivati tvrdoće mjerene pri različitim opterećenjima, dobivene vrijednosti mikrotvrdoće su nešto više od vrijednosti tvrdoće koju jamči proizvođač lima (156 HV).

Nakon zavarivanja metal zavara ima najnižu tvrdoću u korijenu, a najvišu u tjemenu. Volumen rastaljenog metala prilikom zavarivanja najveći je u tjemenu zavara te stoga nije iznenađujuće da su zaostala toplinska naprezanja tamo najveća. Ta zaostala naprezanja su i razlog povećanja tvrdoće u ovom području metala zavara. Tvrdoća zone utjecaja topline je pak najveća s unutarnje strane cijevi, a najmanja s vanjske. Tvrdoća osnovnog materijala je manja od tvrdoće polaznog lima. Uzrok tome može biti rezidualna toplina zavarivanja koja ima efekt žarenja za redukciju zaostalih naprezanja.

Nakon provlačenja, tvrdoće svih dijelova presjeka značajno rastu, osim sredine metala zavara. Tvrdoće rastu zbog primijenjene plastične deformacije u hladnom stanju čiji je stupanj najniži u sredini metala zavara..

Rastvorno žarenje očekivano je smanjilo tvrdoću svih segmenata presjeka cijevi osim sredine zavara i sredine zone utjecaja topline. Produljenjem vremena žarenja tvrdoća bi se vjerojatno smanjila i u ovim područjima.

5. ZAKLJUČAK

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

- Polazni lim ima potpuno austenitnu mikrostrukturu, čija je mikrotvrdoća viša na poprečnom presjeku.
- Stupanj deformacije nakon savijanja nije dovoljno velik da izazove mikrostrukturne promjene u materijalu.
- Zavareni spoj ima pravilnu geometriju. Metal zavara ima karakterističnu ljevačku mikrostrukturu, linija staljivanja je jasno izražena, a zona utjecaja topline je relativno uska. Unutar ZUT-a, mjestimice šire granice austenitnih zrna, ukazuju na moguću prisutnost neželjenih intermetalnih faza, koje su se izlučile zbog velikog unosa topline prilikom zavarivanja. Unesena topline pri zavarivanju smanjila je mikrotvrdoću osnovnog materijala. Mikrotvrdoća u zavarenom spoju viša je od mikrotvrdoće polaznog lima.
- Visok stupanj deformacije prilikom provlačenja rezultirao je promjenom širine zavarenog spoja i ugnječenjem austenitnih zrna po cijelom presjeku. Također je uočeno jače sabijanje materijala po unutarnjem profilu cijevi. Visoki stupanj primijenjene hladne deformacije povećao je mikrotvrdoću svih dijelova presjeka, osim sredine metala zavara.
- Tijekom rastvornog žarenja u materijalu je došlo do redukcije zaostalih naprezanja i smanjenja količine izlučenih neželjenih faza po granicama austenitnih zrna u ZUT-u, što je rezultiralo padom tvrdoće osnovnog materijala i zavarenog spoja.

LITERATURA

- [1] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2013.
- [2] Juraga I., Šimunović V., Stojanović I.: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozivna postojanost, rukovanje, Pula, 2007.
- [3] Rede V.: Korozivski postojani čelici, predavanja, Zagreb, 2017.
- [4] Kožuh S.: Specijani čelici – skripta, Sisak, 2010.
- [5] <http://www.steelnumber.com>, 7.4.2018.
- [6] <https://www.azom.com>, 8.4.2018.
- [7] <https://www.quora.com/>, 21.4.2018.
- [8] <http://www.worldstainless.org>, 21.4.2018.
- [9] Lukačević Z.: Zavarivanje, Slavonski Brod, 1998.
- [10] Mateša B., Samardžić I., Dunđer M.: Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaefflerovog dijagrama. Slavonski Brod, 2011.
- [11] Rudan M.: Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, Pula, 2007.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija