

# Utjecaj parametara žarenja na mikrostrukturu i svojstva austenitnog nehrđajućeg čelika X2CrNi18-9

---

**Grgec, Karlo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:844320>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Karlo Grgec**

Zagreb, 2021. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Karlo Grgec

Zagreb, 2021. godina

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i znanje stečeno na preddiplomskom i diplomskom studiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na stručnoj pomoći prilikom izrade diplomskog rada, a prije svega na razumijevanju i ljudskosti. Zahvaljujem se i laborantu Ivanu Vovku na pomoći prilikom provođenja svih ispitivanja te firmi Oprema d.d. na uzorcima, dokumentaciji i podršci.

Posebno bih želio zahvaliti svojim roditeljima i sestri na potpori tijekom cijelog studija i dosadašnjeg života.

Također zahvaljujem svojoj djevojci Eleni koja je uvijek bila uz mene i zajedno sa mnom prebrodila sve teške, ali i sretne trenutke studiranja.

Ostalim dragim i posebnim osobama koje su dio mog života, kao i kolegama, od srca hvala.





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KARLO GRGEC** Mat. br.: **0035200208**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj parametara žarenja na mikrostrukturu i svojstva austenitnog nehrđajućeg čelika X2CrNi18-9**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of annealing parameters on microstructure and properties of austenitic stainless steel X2CrNi18-9**

Opis zadatka:

Austenitni nehrđajući čelici su najbrojnija skupina korozijski postojanih čelika po broju vrsta i ukupnoj potrošnji. Posjeduju izvrsnu korozijsku otpornost na cijeli niz agresivnih medija, imaju izvrsna mehanička i tehnološka svojstva, a mogu se primijeniti u širem temperaturnom rasponu nego bilo koji drugi nehrđajući čelici. Austenitni nehrđajući čelici sa sniženim udjelom ugljika razvijeni su ciljano za primjenu u farmaceutskoj, kemijskoj i prehrambenoj industriji. Zbog malog udjela ugljika mogućnost pojave senzibilizacije i interkristalne korozije kod ovih čelika svedena je na najnižu razinu.

U diplomskom radu potrebno je istražiti kako trajanje žarenja i brzina ohlađivanja utječu na mikrostrukturu i svojstva zavarenog spoja na cijevima od austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNi18-9. Cijevi su izrađene iz lima koji se postupno oblikuje u cijevi i zavaruje postupkom plazma zavarivanja, a nakon toga se kalibriraju i žare na 1050°C. Optimalno trajanje žarenja i brzinu hlađenja treba odrediti na temelju rezultata analize mikrostrukture i mjerenja mikrotvrdoće u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara te na temelju rezultata ispitivanja cijevi savijanjem.

Zadatak zadan:  
12. studenog 2020.

Rok predaje rada:  
14. siječnja 2021.

Predviđeni datum obrane:  
18. siječnja do 22. siječnja 2021.

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

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

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. NEHRĐAJUĆI ČELICI .....	2
2.1. Feritni nehrđajućí čelici .....	6
2.2. Martenzitni nehrđajućí čelici .....	8
2.3. Dupleks nehrđajućí čelici.....	12
2.4. Austenitni nehrđajućí čelici .....	13
2.4.1. Klasifikacija i primjena austenitnih čelika.....	18
3. ZAVARLJIVOST AUSTENITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA .....	24
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	29
4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja .....	29
4.2. Proces proizvodnje cijevi .....	30
4.3. Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture .....	43
4.4. Analiza mikrostrukture .....	48
4.4.1. Analiza mikrostrukture polaznog lima.....	48
4.4.2. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja cijevi nakon zavarivanja .....	48
4.4.3. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja nakon provlačenja (kalibriranja).....	51
4.4.4. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja nakon toplinske obrade .....	54
4.5. Kvantitativna analiza mikrostrukture zavarenog spoja – mjerenje tvrdoće HV 0,1 ..	70
4.6. Ispitivanje cijevi savijanjem.....	74
5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA.....	78
5.1. Osvrt na rezultate mjerenja mikrotvrdoće.....	78
5.2. Osvrt na rezultate savojnog ispitivanja .....	82
6. ZAKLJUČAK.....	83
LITERATURA.....	84
PRILOZI.....	85

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Proizvodnja nehrđajućeg čelika od 2005.-2019. godine [2] .....	2
Slika 2. Samoobnavljanje pasivnog filma kromovih oksida na nehrđajućem čeliku [4] .....	3
Slika 3. Primjer korozije.....	4
Slika 4. Smještaj nehrđajućih čelika u Schaefflerovom dijagramu [3] .....	5
Slika 5. Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika [1] .....	6
Slika 6. Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [5].....	9
Slika 7. Mikrostruktura dupleks čelika [3] .....	12
Slika 8. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [5] .....	15
Slika 9. Potpuni austenit (lijevo) i austenit s delta feritom (desno) [3].....	16
Slika 10. Prikaz senzibiliziranog čelika (lijevo) i interkristalne korozije (desno) [3].....	18
Slika 11. Shematski prikaz razvoja različitih vrsta nehrđajućih čelika [11] .....	20
Slika 12. Limovi od čelika X5CrNi18-8 (AISI 304) [14] .....	21
Slika 13. Šipke od čelika X2CrNiMo17-12-2 [15] .....	23
Slika 14. Utjecaj udjela ugljika na početak formiranja karbida u čeliku X5CrNi18-10 [3] ....	25
Slika 15. Shematski prikaz senzibiliziranog čelika, čelika sa smanjenim udjelom ugljika i stabiliziranog čelika [3] .....	26
Slika 16. Transkristalna napetosa korozija austenitnog čelika X5CrNi18-8 [6].....	27
Slika 17. Obojenja površine nastala unosom topline postupkom zavarivanja [6] .....	28
Slika 18. Uređaj za točenje piva - BERG NB1002T70 MOBI [7].....	30
Slika 19. Odmatanje koluta .....	31
Slika 20. Čišćenje lima.....	32
Slika 21. Polazni kolut lima za izradu cijevi .....	32
Slika 22. Sustav profiliranih valjka za oblikovanje cijevi.....	33
Slika 23. Upuhivanje zaštitnog plina FORMIRA pomoću kapilare.....	34
Slika 24. Otvorena komora za zavarivanje.....	35
Slika 25. Proces zavarivanja cijevi.....	35
Slika 26. Kontrola zavara .....	36
Slika 27. Namatalica cijevi.....	36
Slika 28. Sustav za provlačenje.....	37
Slika 29. Matrica za provlačenje .....	38
Slika 30. Sustav za podmazivanje i držači matrica .....	38
Slika 31. Odmašćivanje cijevi.....	39
Slika 32. Privremeno skladištenje cijevi .....	39
Slika 33. Peć [8] .....	41
Slika 34. Ulaz cijevi u peć (a) te pisac (b) [10].....	41
Slika 35. Namatalice cijevi.....	42
Slika 36. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51 .....	43
Slika 37. Uzorci 1, 2, 3, 4 i 5 prije zalijevanja u masu.....	44
Slika 38. Uzorci 6, 7, 8 i 9 prije zalijevanja u masu.....	44
Slika 39. Uzorci zaliveni u polimernu masu .....	45
Slika 40. Uređaj BUEHLER LTD.....	45
Slika 41. Uređaj za brušenje MINITECH 233 .....	46
Slika 42. Poliranje uzoraka.....	47
Slika 43. Mikrostruktura lima u nagriženom stanju, poprečni presjek .....	48
Slika 44. Makrostruktura zavarenog spoja .....	49
Slika 45. Mikrostruktura zone utjecaja topline .....	50
Slika 46. Mikrostruktura metala zavara .....	50

Slika 47. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon provlačenja .....	51
Slika 48. Mikrostruktura ZUT-a nakon provlačenja .....	52
Slika 49. Mikrostruktura metala zavara nakon provlačenja .....	53
Slika 50. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja; $v=0,6$ m/min .....	54
Slika 51. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja; $v=0,6$ m/min pri većem povećanju.....	55
Slika 52. Mikrostruktura ZUT-a nakon rastvornog žarenja; $v=0,6$ m/min .....	56
Slika 53. Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja; $v=0,6$ m/min .....	56
Slika 54. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja; $v=0,85$ m/min .....	57
Slika 55. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja; $v=0,85$ m/min pri većem povećanju.....	58
Slika 56. Mikrostruktura ZUT-a nakon rastvornog žarenja; $v=0,85$ m/min .....	59
Slika 57. Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja; $v=0,85$ m/min .....	59
Slika 58. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja $v=0,9$ m/min .....	60
Slika 59. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja; $v=1,00$ m/min .....	61
Slika 60. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja; $v=1,00$ m/min pri većem povećanju.....	62
Slika 61. Mikrostruktura ZUT-a nakon rastvornog žarenja; $v=1,00$ m/min .....	63
Slika 62. Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja; $v=1,00$ m/min .....	63
Slika 63. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja; $v=1,10$ m/min .....	64
Slika 64. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja; $v=1,10$ m/min pri većem povećanju.....	65
Slika 65. Mikrostruktura ZUT-a nakon rastvornog žarenja; $v=1,10$ m/min .....	66
Slika 66. Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja; $v=1,10$ m/min .....	66
Slika 67. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja; $v=1,20$ m/min .....	67
Slika 68. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja; $v=1,20$ m/min pri većem povećanju.....	68
Slika 69. Mikrostruktura ZUT-a nakon rastvornog žarenja; $v=1,20$ m/min .....	69
Slika 70. Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja; $v=1,20$ m/min .....	69
Slika 71. Mikrotvrdomjer PMT3.....	70
Slika 72. Primjer proizvoda od cijevi.....	74
Slika 73. Naprava za ručno savijanje cijevi .....	75
Slika 74. Uzorci za ispitivanje prije savijanja .....	76
Slika 75. Uzorci nakon ispitivanja savijanjem .....	76
Slika 76. Promjena mikrotvrdoće za osnovni materijal .....	78
Slika 77. Promjene mikrotvrdoće u zoni utjecaja topline .....	79
Slika 78. Promjena mikrotvrdoće u metalu zavara .....	80
Slika 79. Mikrotvrdoća OM, ZUT-a i MZ za pojedinačne uzorke .....	81
Slika 80. Maksimalna sila savijanja za sve uzorke .....	82

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Mehanička svojstva i promjena feritnih nehrđajućih čelika [1] .....	7
Tablica 2. Korozijski postojani martenzitno-feritni čelici [1] .....	10
Tablica 3. Korozijski postojani martenzitni čelici [1] .....	11
Tablica 4. Udio legirnih elemenata u austenitnim nehrđajućim čelicima [3] .....	14
Tablica 5. Austenitni monofazni čelici [1] .....	16
Tablica 6. Austenitni nehrđajući čelici s manje od 10% $\delta$ -ferita u mikrostrukturi [1] .....	17
Tablica 7. Kemijski sastav čelika X2CrNi18-9, % mase .....	30
Tablica 8. Mehanička svojstva čelika X2CrNi18-9 .....	30
Tablica 9. Parametri plazma zavarivanja .....	33
Tablica 10. Parametri brušenja .....	46
Tablica 11. Parametri poliranja .....	47
Tablica 12. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće lima (HV 0,1) .....	70
Tablica 13. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon zavarivanja ..	71
Tablica 14. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon kalibriranja ..	71
Tablica 15. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 0,60 m/min .....	71
Tablica 16. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 0,85 m/min .....	72
Tablica 17. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 0,90 m/min .....	72
Tablica 18. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 1,00 m/min .....	72
Tablica 19. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 1,10 m/min .....	73
Tablica 20. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 1,20 m/min .....	73
Tablica 21. Izmjerene vrijednosti kod savijanja .....	77

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
<i>A</i>	%	istezljivost
<i>A<sub>5</sub></i>	%	istezljivost
AISI	-	američki sustav označavanja
BCC	-	prostorno centrirana kubična rešetka
DLC	-	prevlake na bazi ugljika
ELA	-	superferitni čelici
FCC	-	plošno centrirana kubična rešetka
FN	-	sadržaj ferita
HV	-	tvrdoća po Vickersu
MZ		metal zavara
OM		osnovni materijal
<i>R<sub>m</sub></i>	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća
<i>R<sub>p0,2</sub></i>	N/mm <sup>2</sup>	konvencionalna granica razvlačenja
<i>s</i>	mm	širina lima
<i>v</i>	m/min	brzina namatanja koluta
ZUT		zona utjecaja topline

---

**SAŽETAK**

Osnovni cilj rada bio je utvrđivanje optimalnih parametara toplinske obrade zavarenog spoja na cijevima od austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNi18-9. Cijevi su vanjskog promjera 8 mm i koriste se u rashladnim komorama.

U teorijskom dijelu rada navedena je podjela nehrđajućih čelika, opisana su njihova mehanička svojstva i područja primjene. Opisano je i ponašanje navedenih čelika pri zavarivanju, posebice za austenitne nehrđajuće čelike.

Eksperimentalni dio rada opisuje proces proizvodnje cijevi koje se izrađuju iz lima širine 30 mm i debljine 0,5 mm. Cijevi se zavaruju postupkom plazma zavarivanja, kalibriraju i toplinski obrađuju rastvornim žarenjem na 1050 °C. Trajanje žarenja i brzina ohlađivanja ovise o brzini prolaska cijevi kroz peć, tj. o brzini namatanja cijevi na kolut koja trenutno iznosi 0,85 m/min. Istražena je mogućnost da se povećanjem brzine poboljša produktivnost uz zadovoljavajuća svojstva zavarenog spoja. Kako bi se odredila optimalna brzina, analizirana je mikrostruktura i izmjerena mikrotvrdoća u osnovnom materijalu, metalu zavara i zoni utjecaja topline na zavarenim spojevima cijevi. Također su ispitana savojna svojstva zavarenih spojeva.

Na temelju dobivenih rezultata, utvrđena je optimalna vrijednost brzine prolaska cijevi kroz peć od 1,00 m/min. Ovim režimom toplinske obrade postiže se homogena mikrostruktura, niska mikrotvrdoća i odlična savitljivost cijevi, a produktivnost u fazi toplinske obrade povećava se za oko 18 %.

Ključne riječi: austenitni nehrđajući čelik, zavareni spoj, toplinska obrada, mikrostruktura, svojstva

**SUMMARY**

The main objective of this work was to determine the optimal parameters of heat treatment of a welded joint on austenitic stainless-steel pipes grade X2CrNi18-9. The pipes have an outer diameter of 8 mm and are used in cooling chambers.

The theoretical part describes the systematization of stainless steels, their mechanical properties, and areas of application. The behavior of various stainless steel during welding was described especially for austenitic stainless steels.

The experimental part describes the production process of pipes, which are made of sheet metal 30 mm wide and 0.5 mm thick. The pipes are welded by plasma welding, calibrated and heat treated by annealing at 1050 ° C. The duration of annealing and the cooling rate depends on the passing speed of the pipes through the furnace, ie. on the speed of the pipe winding on the coil, which is currently used 0.85 m/min. The possibility of improving productivity by increasing the speed was investigated along with satisfactory properties of the welded joint. To determine the optimal speed, the microstructure was analyzed and the microhardness was measured in the base material, the weld metal, and the heat affected zone at the welded pipe joints. The bending properties of welded joints were also investigated.

Based on the obtained results, the optimal value of the passing speed of the pipes through the furnace is 1.00 m / min. This heat treatment condition is achieves a homogeneous microstructure, low microhardness and excellent pipe flexibility, and productivity in the heat treatment phase increases by about 18%.

Key words: austenitic stainless steels, welded joint, heat treatment, microstructure, properties



## 1. UVOD

Proizvodni procesi se svakim danom unaprjeđuju i otvaraju se nove mogućnosti njihovoj primjeni. Sukladno tome, mogu se očekivati stroži i složeniji zahtjevi za sam razvoj i kvalitetu proizvoda. Današnje tržište ima svoje zahtjeve koji predstavljaju veliki izazov u poduzećima. Neki od njih su: proizvodnja u malim serijama, proizvodnja „Just in time“, što kraće vrijeme isporuke, povišenje kvalitete proizvoda, mogućnost izmjene proizvoda u što kraćem vremenskom intervalu, veća produktivnost i drugo. Ovo su zapravo na neki način i pokretači razvitka proizvodnje i njezinih komponenti. Osim nabrojanoga, važnu ulogu ima svekolika dostupnost i distribucija informacija, brzo širenje novih tehnologija, odgovornost za okoliš te ubrzani ritam inovacija i promjena u tehnologijama. To su ključni faktori koji oblikuju uvjete tržišta te postoje neovisno o aktivnostima bilo koje tvrtke. Ostvarivanje profita osnovni je cilj svake proizvodnje. S većim ostvarenim profitom, tj. zaradom, može se u budućnosti više uložiti u sam proizvodni sustav te poboljšati učinkovitost i radne uvjete. Omogućuje se ulaganje u analizu postojećih struktura te uvid u probleme koji koče daljnji rast. Također se omogućuje i razvoj novih sustava i poboljšavanje postojećih.

Da bi se proizveo kvalitetan, dopadljiv i jeftin proizvod uz što veću dobit, potrebno je unaprjeđivati postupke izrade i voditi računa o pravilnom izboru optimalnog materijala.

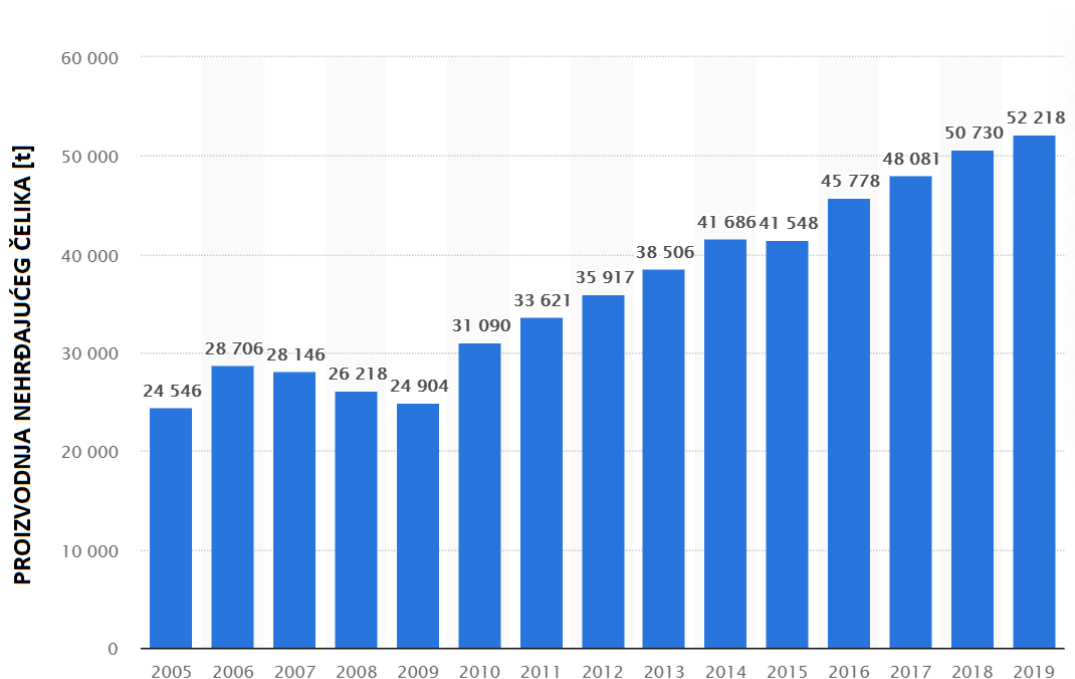
U ovom radu opisana je proizvodnja cijevi od austenitnog nehrđajućeg čelika za prehrambenu industriju. Austenitni nehrđajući čelici posjeduju izvrsna antikorozijska, mehanička i tehnološka svojstva i imaju vrlo široko područje primjene. Postupak proizvodnje cijevi uključuje savijanje lima, zavarivanje, kalibriranje i toplinsku obradu žarenjem. Istražena je mogućnost da se ubrza postupak toplinske obrade cijevi i na taj način poveća produktivnost proizvodnje.

## 2. NEHRĐAJUĆI ČELICI

Nehrđajući čelik (eng. Stainless steel) naziv je koji se koristi za grupu korozijski postojanih čelika još od najranijih faza razvoja, početkom 20. stoljeća. Označava široki raspon različitih vrsta i kvaliteta čelika otpornih na opću koroziju. Nehrđajući ili korozijski postojani čelici su visokolegirani čelici koji se temelje na Fe-C, Fe-Cr-C i Fe-Cr-Ni sustavu. [1]

Prema podacima Svjetske udruge za čelik (World Steel Association) u 2019. godini ukupno je proizvedeno oko 1840 milijuna tona čelika. Udio nehrđajućih čelika u ukupnoj proizvodnji čelika iznosio je oko 2,8 % ili 52,2 milijuna tona. Tehnički i gospodarski značaj nehrđajućih čelika znatno premašuje njihov udio u ukupnoj proizvodnji. [2,9]

Na slici 1. prikazana je proizvodnja nehrđajućih čelika od 2005. do 2019. godine na svjetskoj razini.



Slika 1. Proizvodnja nehrđajućeg čelika od 2005.-2019. godine [2]

Postoje dva uvjeta korozijske postojanosti čelika:

1. Maseni udio kroma u čeliku mora biti barem 12 %
2. Mikrostruktura čelika treba biti monofazna

Krom mora u potpunosti biti otopljen u metalnoj osnovi ili kristalu mješancu i nikako ne smije biti sastavni dio karbida ili drugih strukturnih tvorevina. Kod čelika koji u svom sastavu ne sadrže krom, na površini nastaju željezni oksidi koji ne prijanjaju uz površinu i neprekidno uzrokuju gubitak materijala. U slučaju kada je čelik legiran s kromom, na površini neće nastati željezni oksidi već kromov oksid. Korozijska postojanost nehrđajućih čelika povezana je s fenomenom pasivnosti. Pasivnost se pojavljuje kao rezultat formiranja nevidljivog filma kromovog oksida  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  na površini čelika. Nehrđajući čelici nalaze se uvijek u pasivnom stanju, osim kada su svježe oštećeni ili ogreban, ili kada su uronjeni u neki reducirajući medij koji sprječava pasivaciju površine. Iako je nastali oksid vrlo tanka i oku nevidljiva zaštitna prevlaka, debljine približno 1 do 5 nm, kemijski je stabilna i čvrsto prijanja uz površinu u uvjetima koji osiguravaju dovoljnu količinu kisika na površini. Također, zaštitni oksidni film, s obzirom na prirodu i spontano formiranje, ima i važno svojstvo samoobnavljanja. Da bi uopće došlo do stvaranja kromovog oksida, potrebno je da se u atmosferi nalazi kisik, koji se zatim spaja s kromom iz čelika, kao što je prikazano na slici 2. Debljina oksidnog filma varira od prirodno nastalog minimuma do filma veće debljine formiranog postupcima elektrokemijske ili kemijske pasivizacije [3,4].

Sloj kromovog oksida sprječava daljnju oksidaciju i koroziju u normalnim uvjetima, a korozija se može definirati kao spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija uslijed kemijskih ili elektrokemijskih procesa. [1]



**Slika 2. Samoobnavljanje pasivnog filma kromovih oksida na nehrđajućem čeliku [4]**

Na slici 3. prikazani su primjeri gdje se vide željezni oksidi na površini čelika koji nisu korozijski postojani.



**Slika 3. Primjer korozije**

Maseni udio ugljika u čeliku također utječe na korozijsku postojanost. Što je viši udio ugljika, to je veća opasnost stvaranja karbida čime se osiromašuje čvrsta otopina s legirnim elementima. Suvremenim postupcima pročišćavanja, maseni udio ugljika u nehrđajućim čelicima može se smanjiti i do 0,02 %. [1]

Drugi uvjet korozijske postojanosti, koji se odnosi na monofaznost mikrostrukture, bitan je kako bi se izbjegla opasnost od nastanka galvanskih članaka. Oni u vodljivom mediju mogu prouzročiti korozijsko trošenje materijala. Kemijski sastav nehrđajućih čelika mora biti tako podešen da pri formiranju mikrostrukture nastane samo jedna faza. [3]

Monofazna feritna mikrostruktura postiže se legiranjem s alfaformirajućim elementima (feritotvorcima) od koji je najjači Cr i uz njega Al, Mo, V, Nb i Ti. Gammaformirajući elementi (austenitotvorci) omogućuju stvaranje monofazne austenitne mikrostrukture i u njih spadaju Ni kao najjači te Mn, Co, Cu i N.

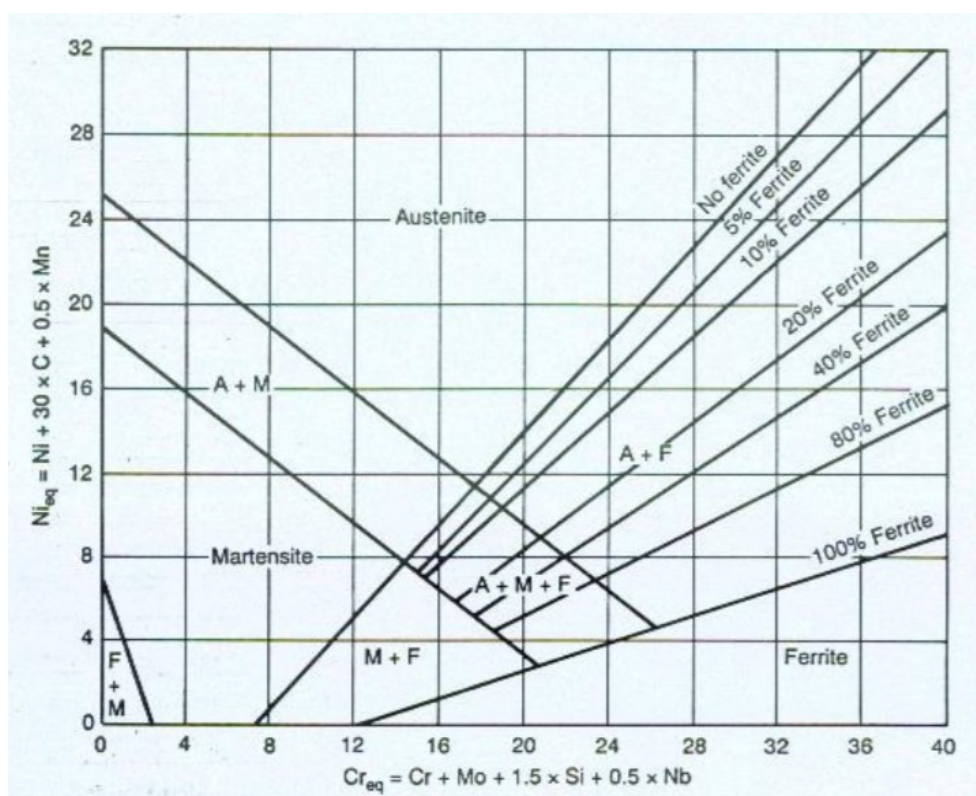
Postoje i vrste nehrđajućih čelika s ciljano postignutom dvojnomostrukturom. Kod njih je važno da razlika potencijala između faza bude dovoljno mala da u agresivnom mediju ne dođe do korozije. [1]

Najčešća podjela nehrđajućih čelika napravljena je na osnovi njihove mikrostrukture:

1. Feritni nehrđajući čelici
2. Martenzitni nehrđajući čelici
3. Austenitni nehrđajući čelici
4. Duplex nehrđajući čelici

Navedena podjela može se proširiti ako se uzmu u obzir i precipitacijski očvrtnuti nehrđajući čelici. Njihova osnovna mikrostruktura može austenitna ili martenzitna uz sitne čestice različitih intermetalnih faza, koje očvršćuju navedeni kristali mješanci. Zbog prisustva druge faze, njihova korozivna postojanost je nešto lošija, ali im je čvrstoća puno viša od čvrstoće prethodnih skupina. [6]

Slika 4. prikazuje smještaj pojedinih skupina nehrđajućih čelika u Schaefflerovom dijagramu. To je dijagram u kojem se prema kemijskom sastavu čelika orijentacijski može odrediti kojoj skupini pripada.



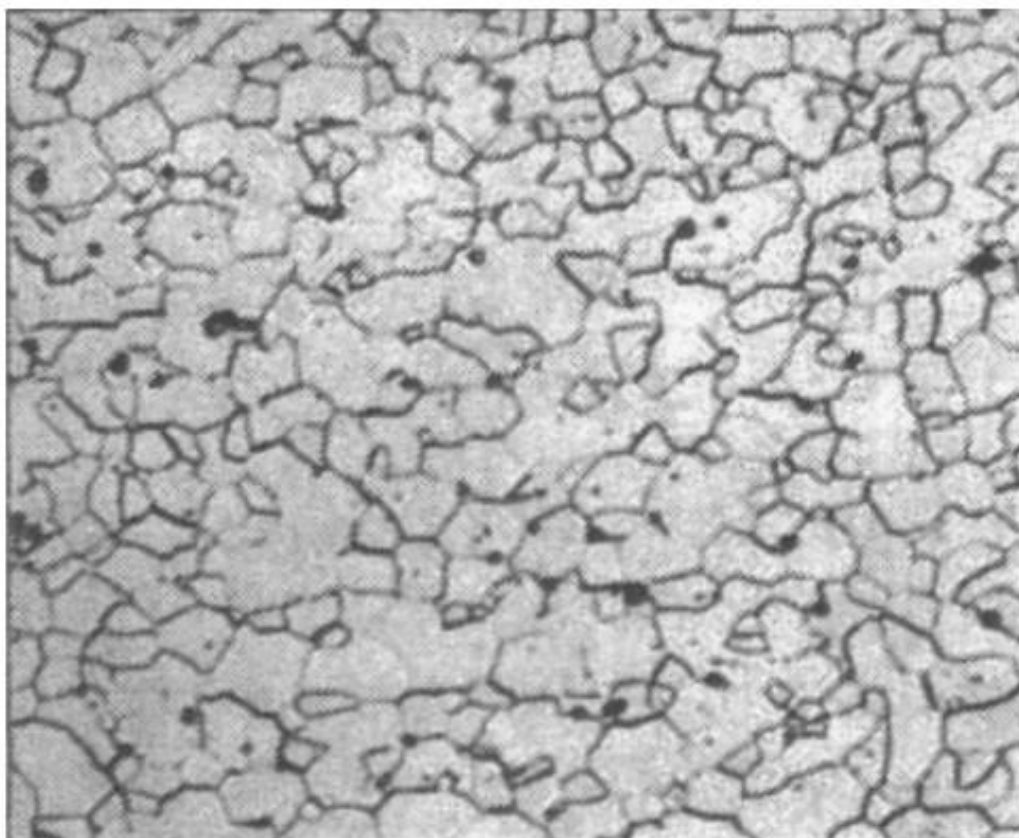
Slika 4. Smještaj nehrđajućih čelika u Schaefflerovom dijagramu [3]

Prema kemijskom sastavu nehrđajuće čelike dijelimo na osnovu prisutnih legiranih elemenata kroma, nikla, molibdena te mangana u njihovom kemijskom sastavu. Tom podjelom, nehrđajuće čelike dijelimo u četiri grupe : [3]

1. Cr čelici
2. Cr–Ni čelici
3. Cr–Ni–Mo čelici
4. Cr–Mn čelici

## 2.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni čelici sadrže 13 do 17 % Cr i do 0,1 % C. Udio molibdena je najčešće manji od 2%. Zbog niskog udjela ugljika, zadržavaju feritnu mikrostrukturu pri gotovo svim temperaturama te se ne mogu zakaliti. Postoji mogućnost dodavanja legirnih elemenata poput Si, Nb, Ti, Mo i Al. Feromagnetični su i nemaju faznu pretvorbu zbog čega se ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade. Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika prikazana je na slici 5. [1]



Slika 5. Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika [1]

Kristalna struktura feritnih nehrđajućih čelika je u obliku prostorno centrirane kubične rešetke (BCC) i ona određuje njihova osnovna svojstva i karakteristike. Relativno su slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna i izlučivanja karbida i nitrida grijanjem iznad 900°C. Njihova primjena je ograničena pojavom „krhkosti 475“ prilikom dužeg držanja u rasponu od 350 do 520 °C. Također, prilikom dužeg izlaganja u temperaturnom rasponu od 520 do 850 °C dolazi do stvaranja  $\sigma$ -faze koja loše utječe na korozivnu postojanost i mehanička svojstva feritnih nehrđajućih čelika. [1,3]



Nisu pogodni za oblikovanje deformiranjem i sklони su lomljivosti pri niskim temperaturama. Neosjetljivi su na plinove koji sadrže sumpor i postojaniji su prema oksidirajućim kiselinama. Zbog toga su popularni u petrokemijskoj industriji. Manje su postojani prema kloridnim otopinama (morska sol). Zbog feromagnetičnih svojstava, lako ih je razlikovati u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike. Manje se koriste od austenitnih i jeftiniji su zbog nižeg udjela skupih legirnih elemenata. [1]

U tablici 1 navedene su neke vrste feritnih nehrđajućih čelika, njihova primjena i mehanička svojstva.

**Tablica 1. Mehanička svojstva i promjena feritnih nehrđajućih čelika [1]**

OZNAKA ČELIKA	SASTAV ostalo %	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p0,2</sub> min, N/mm <sup>2</sup>	A <sub>5</sub> min, %	POSEBNA OTPORNOST I PRIMJERI PRIMJENE
X6Cr17	-	450- 600	270	20	Korozijski postojani pribor za jelo (osim oštrice noža, dijelovi kućanskih aparata, dijelovi uređaja u proizvodnji dušične kiselina i sapuna te u petrokemijskoj industriji).
X6CrMo17	1,1 Mo	450- 650	270	20	Posebno otporan na slanu vodu i organske kiseline, za auto-dijelove, okvire prozora, prevlake hladnjaka, kvake, okvire retrovizora.
X8CrTi17	0,7 Ti	450- 600	270	20	Kao i X6Cr17, otporniji na rast zrna, za zavarene dijelove kućanskih aparata, za sita i okvire.
X8CrNb17	0,9 Nb	450- 600	270	20	Dijelovi uređaja u mljekarama, pivovarama, u proizvodnji boja i sapuna (ponajprije za zavarene dijelove).
X8CrMoTi17	1,75 Mo 0,65 Ti	500- 600	300	20	Za jače napregnute zavarene dijelove aparata u proizvodnji jestivog octa, u mljekarama, prešaonicama voća, nije za udarni rad.
X12CrMoTi25	2,5 Mo 1,8 Ti	650- 750	550	12	Za otopine s visokim udjelom slobodnog klora.
X12CrMoS17	0,25 Mo 0,20 S	700- 850	450	12	Za obradu odvajanjem čestica na automatima : vijke, zakovice, matice, male zupčanike, male osovine.

Porastom čistoće feritnih čelika postiže se znatno poboljšanje svojstava. Feritni nehrđajući čelici s vrlo niskim udjelom nečistoća i primjesa, uobičajeno se nazivaju superferitni čelici (eng. Extra Low Additions - ELA). Oni imaju bolju zavarljivost, bolju žilavost pri niskim temperaturama, poboljšanu korozijsku postojanost, povišen udio kroma i vrlo niski udio dušika i ugljika. [1]

Otpornost na koroziju feritnih nehrđajućih čelika ovisi o količini legirnih elemenata. Glavni legirajući elementi koji pružaju otpornost na lokalnu koroziju, opću koroziju i koroziju u procjepu su krom, molibden i dušik. Dušik je netopljiv u feritu i on ne može doprinijeti korozijskoj otpornosti u toj mjeri kao što može kod austenita. Feritni nehrđajući čelici ne podliježu nastanku pukotina uslijed napetostne korozije sve dok su legirni elementi poput nikla, bakra i kobalta ispod 0,5 % udjela. [3]

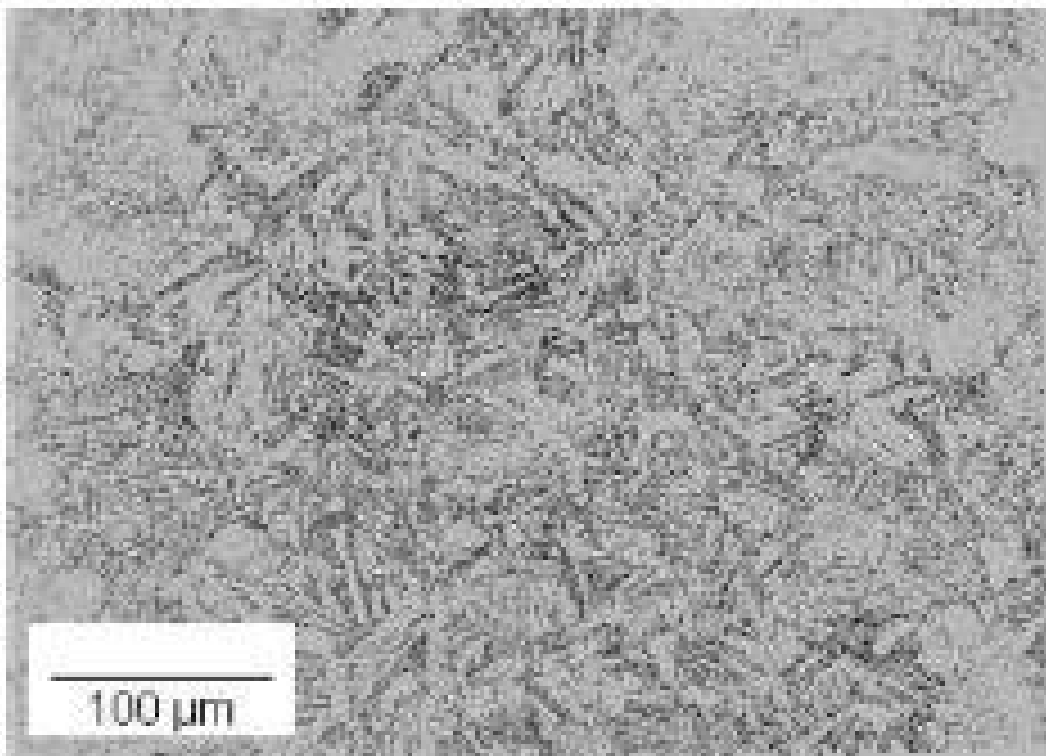
## 2.2. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici su po sastavu slični feritnoj skupini, ali sadrže veći udio ugljika. Udio ugljika u ovim čelicima iznosi od 0,15 do 1,0 %, a udio kroma iznosi preko 13%. Mogu sadržavati do 1,3 % molibdena i do 2,5 % nikla. Optimalna mehanička svojstva i korozijsku postojanost postižu kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem. Ugrijavanje na temperaturu austenitizacije u svrhu kaljenja, potrebno je obaviti postupno zbog male toplinske vodljivosti ovih čelika. Što je viši udio ugljika i kroma, to će temperatura austenitizacije biti viša. Time će se u austenitu otopiti više ugljika i kroma, što je važno zbog zakaljivosti i korozijske postojanosti. [1]

U odnosu na feritne i austenitne čelike, imaju višu tvrdoću i čvrstoću, te otpornost na trošenje. Martenzitni nehrđajući čelici su feromagnetični. Imaju slabiju korozijsku postojanost nego drugi nehrđajući čelici, ali su općenito jeftiniji od ostalih nehrđajućih čelika zbog nižeg sadržaja kroma i ostalih legirnih elemenata. Ne koriste se na temperaturama višim od 650 °C zbog pada mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti. [1]

Slika 6 prikazuje mikrostrukturu martenzitnog nehrđajućeg čelika.





**Slika 6. Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [5]**

Mogu se podijeliti u dvije podskupine:

1. Konstrukcijski
2. Alatni

Konstrukcijski nehrđajući martenzitni čelici sadrže do 0,25 % C, dok alatni sadrže više od 0,3 % C. Kod konstrukcijskih čelika u prvom je planu korozivna postojanost, a kod alatnih postoji dodatni zahtjev prema otpornosti na abrazivno trošenje. Zbog većeg udjela ugljika, alatni čelici često imaju dvofaznu martenzitno-karbidnu mikrostrukturu čija je korozivna postojanost manja od čiste jednofazne martenzitne mikrostrukture. Karbidi omogućavaju visoku otpornost na trošenje, ali je negativna pojava značajno smanjenje otpornosti na koroziju. [1]

Svi martenzitni nehrđajući čelici isporučuju se u meko žarenom stanju. Nakon strojne obrade i/ili obrade deformiranjem, provodi se toplinska obrada koja uključuje kaljenje i popuštanje nakon čega se postižu željena mikrostruktura i svojstva.

Ponekad se u mikrostrukturi martenzitnih nehrđajućih čelika može naći i određena količina ferita što loše utječe na mehanička i korozivna svojstva ovih čelika.

U tablici 2 navedene su neke vrste martenzitno-feritnih nehrđajućih čelika, njihova mehanička i korozijska svojstva te primjeri primjene

**Tablica 2. Korozijski postojani martenzitno-feritni čelici [1]**

OZNAKA ČELIKA	SASTAV ostalo, %	R <sub>p0,2</sub> , N/mm <sup>2</sup>	A <sub>5</sub> , %	POSEBNO OTPORAN	PRIMJERI PRIMJENE
X10CR13	-	250 400	20 18	-oksidirajuće kiseline, ali slabije nego feritni -na ogorine	-dijelovi vodnih turbina, pribor za jelo, unutrašnja arhitektura
X15Cr13	-	450	18	-oksidirajuće kiseline, ali slabije nego feritni -na ogorine	-osovine, svornjaci, ventilska vretena, turbinske lopatice (do 500°C), kirurški elementi
X7CrAl13	0,1-0,3 Al	250	20	-oksidirajuće kiseline, ali slabije nego feritni -na ogorine -aluminij sprječava zakaljivanje ZUT-a, a time i sklonost puknuću	-dijelovi u industriji nafte i plina, zavareni dijelovi u hidroenergetskim postrojenjima
X12CrS13	0,25 S	440	12	-oksidirajuće kiseline, ali slabije radi prisutnosti sumpora	-čelik za obradu na automatima – vijci, matice, svornjaci
X15CrMo13	1-1,3 Mo	600	18	-oksidirajuće kiseline i pri povišenim temp (300-500 °C)	-osovine, ventili, kirurški elementi, turbinske lopatice (do 500 °C), toplo opterećene opruge

U tablici 3, prikazane su vrste korozijski postojanih martenzitnih nehrđajućih čelika, njihova mehanička i korozijska svojstva te područja primjene.

Tablica 3. Korozijski postojani martenzitni čelici [1]

OZNAKA ČELIKA	SASTAV ostalo, %	R <sub>p0,2</sub> , N/mm <sup>2</sup>	Tvrdoća u meko- žarenom stanju, HB	POSEBNO OTPORAN	PRIMJERI PRIMJENE
X20Cr13	-	800-650	≤ 220	-na vodi i vodenu paru, na organske kiseline : octenu, mliječnu, voćnu	-kirurški elementi, pribor za jelo, strojni dijelovi, turbinske lopatice
X20CrMo13	1-1,3 Mo	900-750	≤ 265	-povišena toplinska postojanost u odnosu na X20Cr13	-toplinski napregnute osovine, za radne temperature i do 500 °C
X22CrNi17	1,5-2,5 Ni	950-800	≤ 275	-na organske kiseline koje se javljaju u industriji namirnica, octene kiseline i sapuna, postojanost na morsku vodu	-osovine, ventili, dijelovi pumpa, dijelovi uređaja u mljekarama, u industriji papira, u proizvodnji kvasca i škroba, za dijelove kompresora
X30Cr13	-	1000-800	≤ 245	-na vodu i paru (samo u kaljenom stanju)	-opruge, vijci (za rad u agresivnoj atmosferi), škare, mjerni alat
X36CrMo17	1-1,3 Mo	950-800 47 HRC	≤ 250	-u atmosferi aminokiselina, octene kiseline i solne kiseline	-dijelovi kalupa za preradbu polimera, kirurški rezni alat, zubarski alat
X42Cr13	-	57-54 HRC	≤ 225	-kao X36CrMo17	-kao X36CrMo17, posebno za aminoplaste
X45CrMoV15	0,4-0,6 Mo 0,1 V	57-55 HRC	≤ 260	-otporan do 500 °C	-različiti rezni alati, kirurški skalpeli
X90CrMoV18	0,9-1,3 Mo 0,1 V	57-55 HRC	≤ 265	-istovremeno vrlo otporan na trošenje i koroziju	-noževi za meso, skalpeli, korozijski postojani kotrljajući ležajevi, sapnice, britve, žileti

### 2.3. Dupleks nehrđajući čelici

Dupleks nehrđajući čelici nemaju monofaznu mikrostrukturu, nego dvofaznu austenitno-feritnu sa sadržajem ferita od 40 do 60%. Ovi čelici sadrže visoki postotak kroma koji se kreće od 20 do 27 % te srednji udio nikla koji se kreće u iznosu od 1 do 7 %. Dodavanjem molibdena u čelik, povećava se korozivna postojanost na rupičastu koroziju, koroziju u procjepu te napetosnu koroziju. Ukoliko su prisutni ostali legirni elementi, tada vrijedi da molibden, silicij, titanij i niobij djeluju na mikrostrukturu slično kao porast sadržaj kroma, a mangan, bakar, dušik i ugljik promiču austenitnu mikrostrukturu slično kao povišenje sadržaja nikla. [1,3]

Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika karakteristična je po naizmjeničnim zrnima ferita i austenita, u podjednakom udjelu. Na slici 7. prikazana je mikrostruktura valjane ploče dupleks čelika u smjeru valjanja.



Slika 7. Mikrostruktura dupleks čelika [3]

Zbog velikog unosa topline, dvofaznost čelika može izazvati teškoće pri zavarivanju. Može doći do pojave krhkosti ferita i do izlučivanja karbida i drugih štetnih faza po granicama

zrna ferit/austenit. Povišenjem temperature pri zavarivanju iznad 500 °C raste udio ferita, a smanjuje se udio austenita tako da se narušava izbalansirani omjer ferita i austenita preko dopuštene vrijednosti. To će izazvati dovoljno veliku razliku potencijala da dođe do neželjenih korozijskih pojava. Tako na primjer čelik s 22% kroma i 8% nikla pri 1350 °C posjeduje jednofaznu feritnu mikrostruturu.

Primjena dupleks čelika pri povišenim temperaturama je moguća, ali na maksimalno do 350 °C. Razlog tog ograničenja primjene je pojava „krhkosti 475“ koja se javlja u dupleks čelicima u feritnoj fazi po istom principu kao i kod feritnih čelika.

Svojsva austenitno-feritnih (dupleks) nehrđajućih čelika [1]:

- povećana otpornost prema napetosnoj koroziji i utjecaju klorida, puno bolja nego kod austenitnih čelika
- postojanost prema interkristalnoj koroziji zbog niskog sadržaja ugljika i visokog sadržaja kroma
- bolja otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike
- čvrstoća je veća u odnosu na čvrstoću austenitnih čelika
- tvrdoća je u granicama od 250 do 350 HV
- konvencionalna granica razvlačenja ( $R_{p0,2}$ ) je u granicama od 500 do 800 N/mm<sup>2</sup>
- vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) kreće se od 700 do 1100 N/mm<sup>2</sup>
- u određenim uvjetima može doći do nastanka neželjenih strukturnih faza, najčešće su sigma-faza i alfa-prim-faza
- magnetični su.

Sve je šire područje primjene ovih čelika u industriji nafte i plina, papira i celuloze, petrokemijskoj i kemijsko-procesnoj industriji, brodogradnji itd. [3]

#### 2.4. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici najbrojnija su skupina nehrđajućih čelika po broju vrsta i po proizvedenoj količini. Karakteristični su po svojoj plošno centriranoj kubičnoj rešetki – FCC. Sadrže od 16 do 26 % Cr te 8 do 35 % Ni, koji su osnovni legirni elementi. Nikal je gamageni legirni element koji proširuje austenitno područje te omogućava stabilnu mikrostrukturu čak i kod vrlo niskih temperatura. Dodatni legirni elementi mogu biti : Mo, N, Al, Cu, Ti, Nb, Ta, Se, S. Maseni udio ostalih legirnih elemenata je izbalansiran kako bi se dobila austenitna mikrostruktura. [3]

Tablica 4 prikazuje udio legirnih elemenata u austenitnim nehrđajućim čelicima.

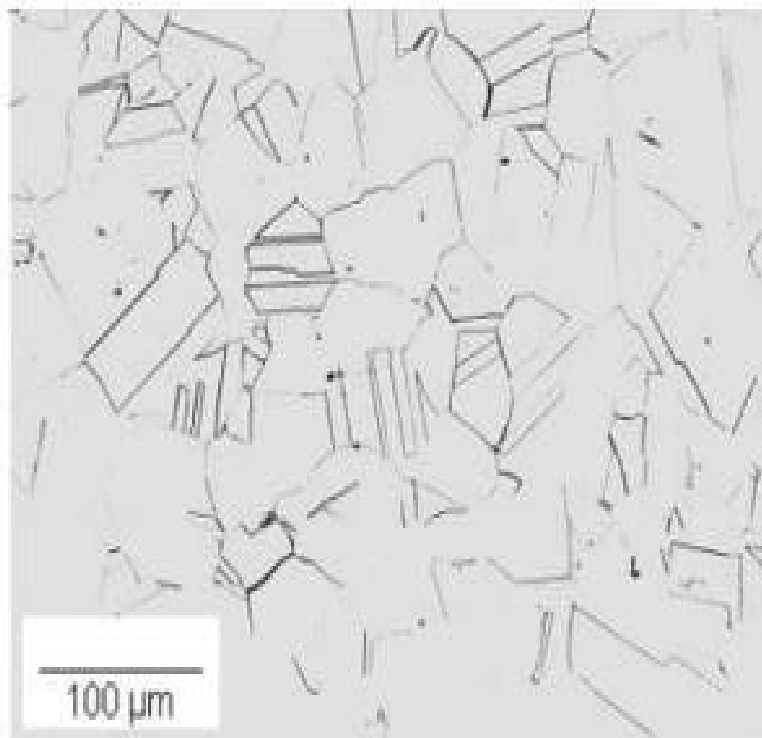
**Tablica 4. Udio legirnih elemenata u austenitnim nehrđajućim čelicima [3]**

ELEMENT	MASENI UDIO (%)
Krom	18 – 26
Nikal	8 – 35
Mangan	1 – 2 (4 – 15,5)
Silicij	0,5 – 3
Molidben	do 2
Dušik	do 0,15
Titanij i niobij	do 0,2
Ugljik	0,02 – 0,08

Korozijski su postojani u puno različitih medija, osim u medijima koji sadrže kloride, gdje može doći do nastanka pukotina uslijed napetostne korozije, posebno pri visokim temperaturama. Jako su dobro otporni na opću koroziju pri sobnoj temperaturi. Minimalne vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja ( $R_{p0,2}$ ) nalaze se u rasponu od 205 do 275 N/mm<sup>2</sup>, a vlačne čvrstoće ( $R_m$ ) 520 do 760 N/mm<sup>2</sup>. Istezljivost je velika i iznosi od 40 do 60 %, a tvrdoća do 260 HV. Dobro su oblikovljivi u hladnom stanju. Hladna deformacija snižava žilavost i istežljivost. Nakon hladne deformacije, žarenje daje mogućnost da se vrijednosti vrate u prvobitno stanje. Austenitni čelici nisu magnetični, osim ako ne sadrže određeni udio  $\delta$ -ferita. Zbog visokog udjela legirnih elemenata skuplji su od martenzitnih i feritnih (s nižim i srednjim udjelom kroma) nehrđajućih čelika, međutim njihova svojstva poput dobre oblikovljivosti i zavarljivosti opravdavaju njihovu primjenu. [3]

Austenitni čelici nemaju izraženu prijelaznu temperaturu i zadržavaju dobru žilavost i na niskim temperaturama. Nešto lošiju žilavost na niskim temperaturama imaju čelici s visokim udjelom dušika. [3]

Na slici 8 prikazana je mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika.



**Slika 8. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [5]**

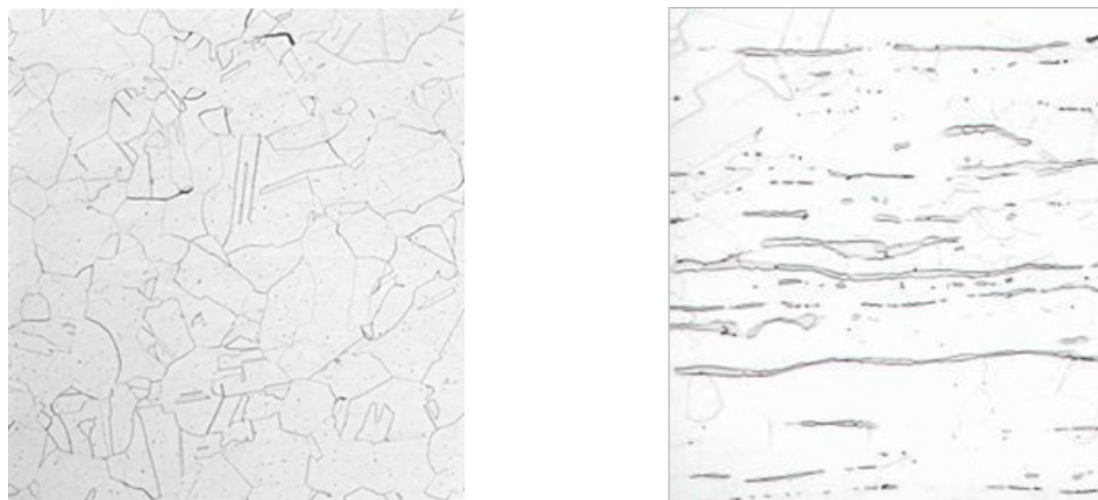
Kod austenitnih nehrđajućih čelika s manje od 2 %Mn i više od 7 %Ni prilikom hladne deformacije dolazi do martenzitne pretvorbe. Udio martenzita ovisi o temperaturi, stupnju hladne deformacije i vrsti čelika [3].

Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika može biti monofazna i potpuno austenitna ili austenitno-feritna. Delta-ferit je nepoželjan u mikrostrukturi austenitnog nehrđajućeg čelika, ali se njegova prisutnost tolerira u udjelu od 5 do 10 %. On snižava otpornost na senzibilizaciju, ako je izlučen po granicama austenitnog zrna. Negativno djeluje na ponašanje čelika pri toploj obradi. Povećava opasnost od nastanka  $\sigma$ -faze na povišenim temperaturama. U nekim slučajevima ipak je poželjan jer otežava nastanak toplih pukotina pri zavarivanju. [1,3]

Duljim zadržavanjem austenitnih čelika na temperaturama 600 i 900 °C nastaje i nepoželjna  $\sigma$ -faza. Ona smanjuje otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procjepu te uzrokuje porast tvrdoće i pad lomne žilavosti te istežljivosti. Dušik i ugljik usporavaju rast precipitata sigma-faze. Formira se na granici austenitnog zrna. Može se rastvoriti žarenjem na temperaturama iznad 1050 °C. [1,3]

Na slici 9 su prikazane mikrostrukture nehrđajućeg austenitnog čelika sa 100 % austenita (lijevo) i čelika s određenom količinom delta-ferita (desno).

U tablici 5 prikazane su vrste austenitnih nehrđajućih čelika bez  $\delta$ -ferita u mikrostrukturi s njihovim mehaničkim svojstvima, posebnostima i područjima primjene, a u tablici 6 prikazane su vrste austenitnih nehrđajućih čelika s manje od 10%  $\delta$ -ferita u mikrostrukturi.



Slika 9. Potpuni austenit (lijevo) i austenit s delta feritom (desno) [3]

Tablica 5. Austenitni monofazni čelici [1]

Oznaka čelika prema VDEh	Sastav, "ostalo" %	Mehanička svojstva					Posebna postojanost i primjeri primjene
		$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	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



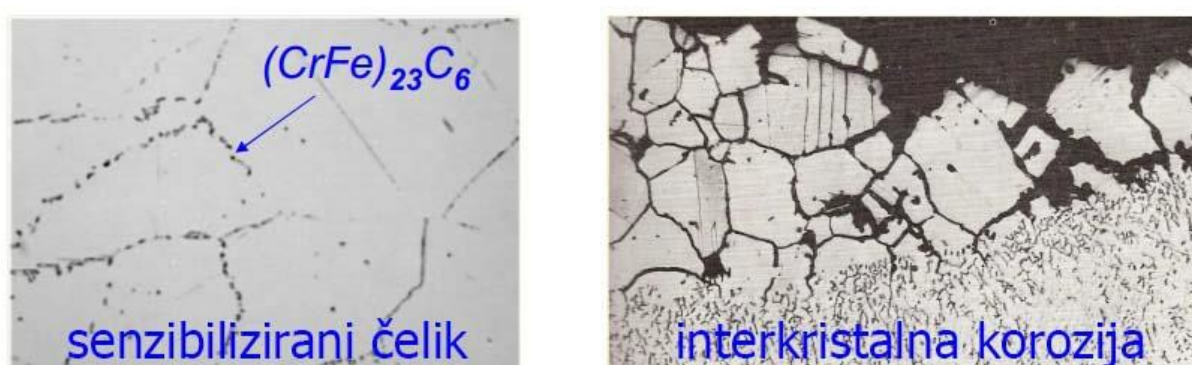
Tablica 6. Austenitni nehrđajući čelici s manje od 10%  $\delta$ -ferita u mikrostrukturi [1]

Oznaka čelika		Sastav "ostalo", %	Mehanička svojstva pri 20°C					Posebna otpornost i primjeri primjene
Oznaka čelika prema VDEh	M <sub>s</sub> M <sub>d</sub>		R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p0,2</sub> , N/mm <sup>2</sup>	HB	A <sub>5</sub> , %	KV, J	
X12 CrNi 18 8	M <sub>s</sub> = -58 °C M <sub>d</sub> = + 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
X5 CrNi 18 9	M <sub>s</sub> = -32 °C M <sub>d</sub> =+37 °C	-	700	185	180	50	85	- industrija masnih kiselina, papira, tekstila, umjetnih vlakana, aparata za pranje. Primjenjiv do 300°C.
X10 CrNiTi 18 9	M <sub>s</sub> = -72 °C M <sub>d</sub> = + 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.
X5 CrNiMo 18 10	M <sub>s</sub> =-166 °C M <sub>d</sub> =-25 °C	2,25 Mo	700	205	180	45	85	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.
X10 CrNiMoTi 18 10	M <sub>s</sub> =-206 °C M <sub>d</sub> =-48 °C	2,25 Mo 0,5 Ti	750	225	190	40	85	-industrija tekstila, sulfita, celuloze, masnih kiselina, gume, boja, uređaja za medicinu, fotografiju i plast. mase

M<sub>s</sub> – temperatura početka stvaranja martenzita pri "dubokom" hlađenju,  
M<sub>d</sub> – temperatura početka stvaranja martenzita pri hladnom deformiranju  
IKK – interkristalna korozija

Pojava senzibilizacije je česta kod austenitnih čelika. To je proces formiranja karbida tipa  $M_{23}C_6$  na granicama austenitnih zrna. Sitni karbidni precipitati formiraju se u temperaturnom području između 425 i 850°C. Na samoj granici i oko nje, smanjuje se udio kroma ispod 12 % što u vrlo kratkom vremenu može izazvati interkristalnu koroziju ako se čelik nađe u određenom okruženju, tj. vodljivom mediju. [3] Ova pojava je detaljnije opisana u poglavlju 3.1.

Slika 10 prikazuje mikrostrukturu senzibiliziranog austenitnog čelika kod kojeg još nije nastupila interkristalna korozija (lijevo) i čelika kod kojeg je već došlo do interkristalne korozije uslijed senzibilizacije (desno).



Slika 10. Prikaz senzibiliziranog čelika (lijevo) i interkristalne korozije (desno) [3]

#### 2.4.1. Klasifikacija i primjena austenitnih čelika

Označavanje nehrđajućih čelika propisano je normom HRN EN 10027-1. Kako se radi o visokolegiranim čelicima, kod njihovog označavanja prema kemijskom sastavu oznaka uvijek počinje sa znakom „X“ iza kojeg slijedi sadržaj ugljika pomnožen sa 100 te kemijski simboli i maseni udjeli legiranih elemenata poredani po veličini masenih udjela i odijeljeni s crticama.

Prema normi HRN EN 10027-2, koja se odnosi na brojčani sustav označavanja, za nehrđajuće čelike rezervirane su oznake od 1.40 do 1.49 (nehrđajući i vatrootporni čelici).

Prema američkom sustavu označavanja (American Iron and Steel Institute - AISI) svi austenitni nehrđajući čelici mogu se svrstati u dvije skupine. Prva podskupina austenitnih nehrđajućih čelika pripada seriji 300 i kod njih je (uz krom) osnovni legirni element nikal, a čelici iz druge podskupine pripadaju seriji 200 i kod njih je nikal zamijenjen jeftinijim manganom. Austenitne vrste s oznakom 300 su najstarije, imaju najširu primjenu i najčešće se primjenjuju.

Čelici koji u oznaci sadrže slovo L imaju snižen sadržaj ugljika na vrijednost do 0,03 % (304L i 316L). Ovi čelici su neosjetljivi na senzibilizaciju i interkristalnu koroziju jer nema dovoljno ugljika za nastanak kritične količine karbida.

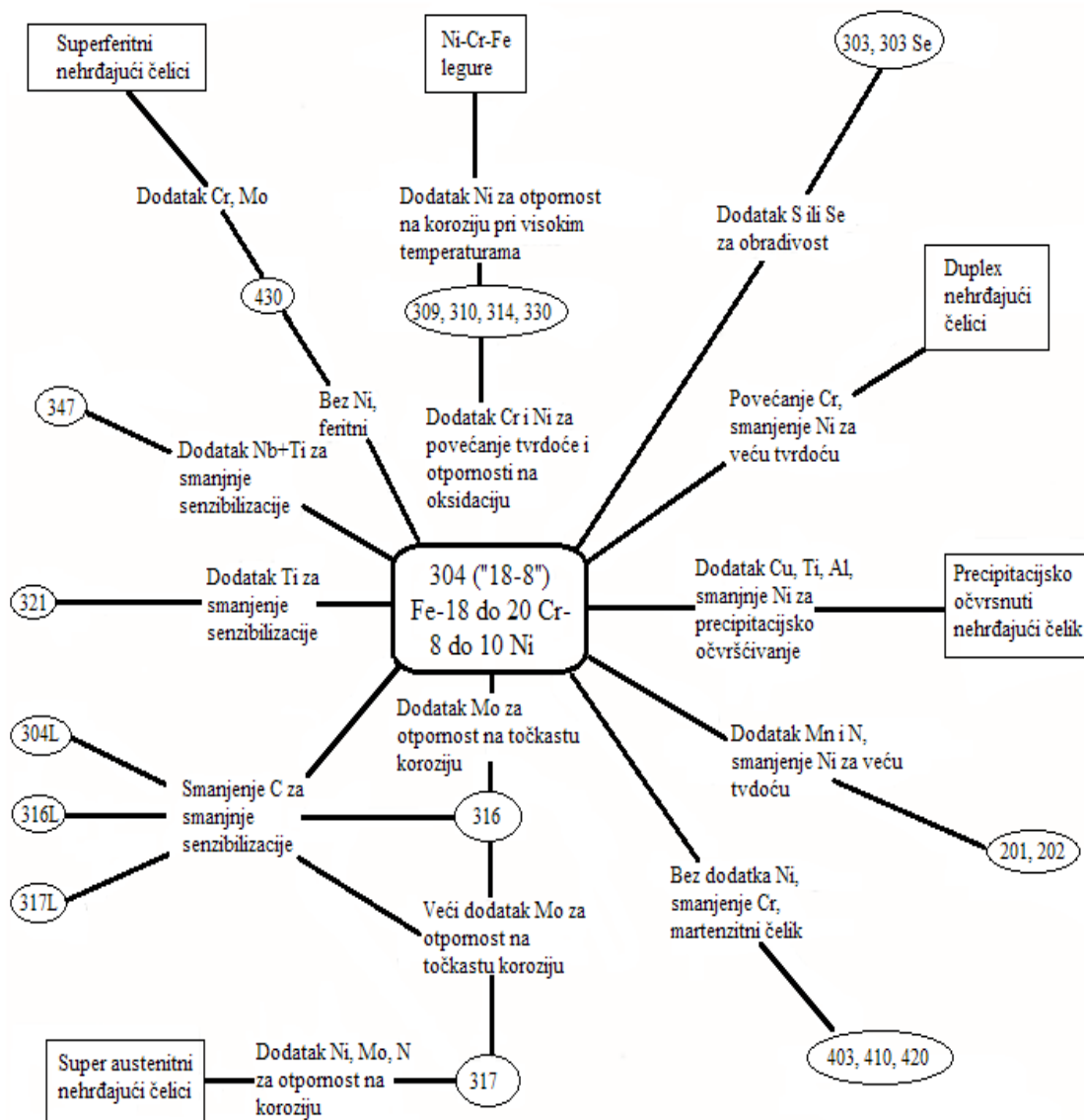
Vrste s oznakom H imaju povišen maseni udio ugljika do 0,1 %. Viši sadržaj ugljika pridonosi višim vrijednostima čvrstoće. To dolazi do izražaja na visokoj temperaturi.

Čelici sa slovom N u oznaci imaju povećan sadržaj dušika do 0,20 %. Maseni udio dušika može biti i veći od navedenog ako čelik sadrži dovoljno mangana, zato što mangan povisuje topljivost dušika u austenitu. Dušik povoljno djeluje na čvrstoću, otpornost na adheziju i otpornost na rupičastu koroziju.

Vrste koje sadrže titanij i niobij stabilizirane su vrste austenitnih nehrđajućih čelika, a ova dva elementa nazivaju se stabilizirajućim elementima. Titanij i niobij imaju veći afinitet prema ugljiku od kroma pa se njihovim dodavanjem sprječava nastanak kromovih karbida tipa  $M_{23}C_6$  po granicama kristalnih zrna. Dodatkom titanija i niobija u iznosu od 1 %, znatno se reducira sadržaj otopljenog ugljika u austenitu, a time i mogućnost nastanka kromovih karbida.

Korozijska postojanost nehrđajućih čelika iz serije 200 nije tako dobra kao kod čelika iz serije 300. Čelici koji sadrže više ugljika osjetljivi su na napetosnu koroziju nakon zavarivanja, a osjetljivost raste s povećanjem debljine materijala. Kod nekih austenitnih nehrđajućih čelika nikal je u potpunosti zamijenjen manganom, dušikom i bakrom. Od takvih čelika rade se implantati za pacijente koje su alergični na nikal. [3]

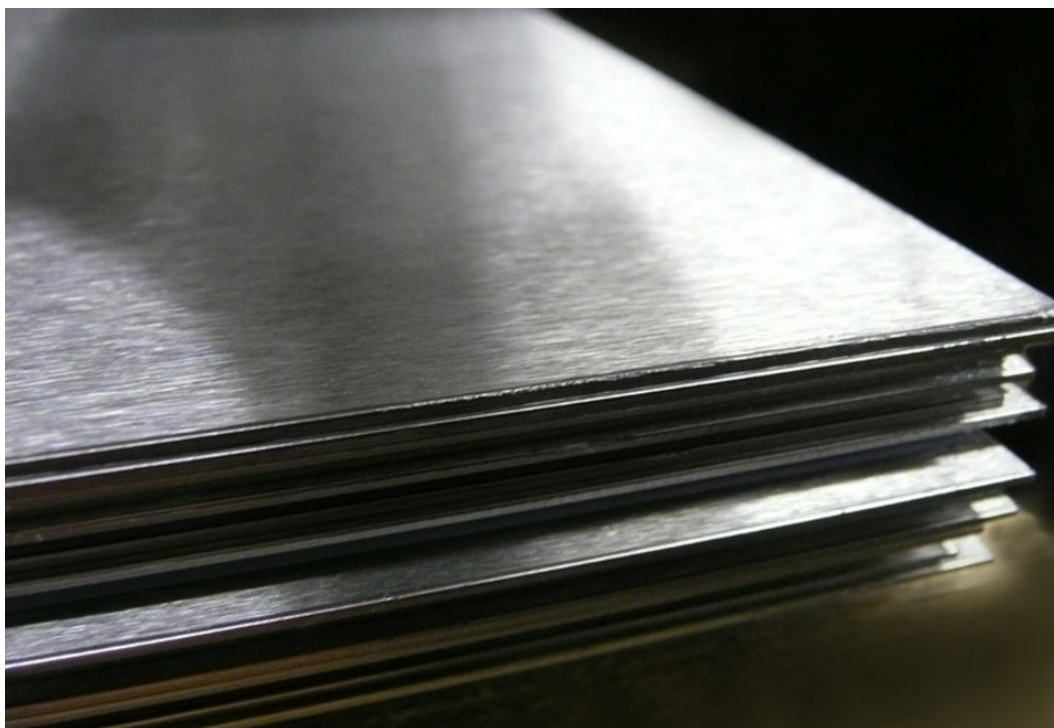
Na slici 11 shematski je prikazan razvoj novih vrsta nehrđajućih čelika koje su proizašle iz osnovnog austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X5CrNi18-8. Prema američkom sustavu označivanja, ovaj čelik ima oznaku UNS S30400 (AISI 304). Upravo od ove osnovne vrste austenitnog čelika razvijeno je desetak i više novih čelika koji se baziraju na promjeni osnovnog sastava radi postizanja potrebnih svojstava. [6]



Slika 11. Shematski prikaz razvoja različitih vrsta nehrđajućih čelika [11]

Čelik oznake X5CrNi18-8(AISI 304) je austenitni 18-8 Cr-Ni čelik i pokriva 70% uporabe i proizvodnje svih austenitnih čelika. To je Fe-C legura koja u svom sastavu sadrži nominalno 18% kroma i 8 do 10% nikla, uključujući i manje količine dušika, mangana i silicija. Otporan je na kiseline, a zbog niskog udjela ugljika (0,05 %) otporan je i na interkristalnu koroziju nakon zavarivanja kod limova debljine do 6 mm i to bez naknadne toplinske obrade. Zavarljivost ovih čelika je dobra za sve elektrolučne postupke. Također, ima mogućnost vrlo dobrog poliranja i sposobnost preoblikovanja dubokim vučenjem i valjanjem. Prema napatku proizvođača, pri obradi odvajanjem česticama preporuča se korištenje alata od brzoreznog čelika ili od tvrdog metala [12,13].

Nehrđajući austenitni čelik oznake X5CrNi18-8 (AISI 304) otporan je na vodu i vodenu paru, vlažni zrak, konzumne kiseline kao i na slabe organske i anorganske kiseline. Ima široku mogućnost primjene, npr. u prehrambenoj industriji, proizvodnji ugostiteljske opreme, proizvodnji pića, mljekarstvu, pivovarama i podrumarstvu, farmaceutskoj i kozmetičkoj industriji, izradi kemijskih aparata, arhitekturi, automobilskoj industriji, za kućanske predmete i aparate, sanitarne uređaje, itd. Limovi proizvedeni od ovog čelika imaju širu primjenu od svih ostalih limova iz skupine austenitnih nehrđajućih čelika. Navedeni limovi najčešće se koriste kao hladno valjani do debljine od 6 mm, glatke mat površine. Koriste se za izradu konstrukcijskih dijelova, od vrlo jednostavnih do vrlo složenih, pri izradi kotlova, kao noseće konstrukcije i sl. Primjenjuju se u uvjetima gdje ne postoji doticaj s agresivnim medijima, kiselinama i solima, kao na primjer u prehrambenoj industriji i kod izrade onih proizvoda koji ne zahtijevaju posebnu površinsku obradu.[12,13] Na tržištu se može pronaći puno različitih oblika poluproizvoda od ove vrste čelika, a na slici 12 prikazan je primjer jednog od njih.



**Slika 12. Limovi od čelika X5CrNi18-8 (AISI 304) [14]**

Modifikacija ovog čelika sa smanjenim sadržajem ugljika oznake X2CrNi18-9, koja prema američkoj normi ima oznaku 304L, otporan je na kiseline, a zbog vrlo niskog sadržaja ima povišenu otpornost na interkristalnu koroziju. Zbog toga se limovi iznad 6 mm debljine ne moraju toplinski obrađivati nakon zavarivanja. Sposobnost zavarivanja dobra je kod većine

zavarivačkih postupaka, ali se ne smije primjenjivati plinsko zavarivanje. Čelik se vrlo dobro polira. Orijentacijski podatak za maksimalnu temperaturu primjene je 350°C. Zbog vrlo niskog sadržaja ugljika, tvrdoća, čvrstoća i granica razvlačenja u gašenom stanju posebno su niske, niže nego kod ostalih austenitnih Cr-Ni čelika. Time se postiže posebno dobra sposobnost hladnog oblikovanja. I kod ovog čelika preporuča se primjena alata od brzoreznog čelika ili tvrdog metala pri obradi odvajanjem čestica. [12,13]

Čelik je otporan na vodu, vodenu paru, vlažni zraka, konzumne kiseline, kao i na slabe organske i anorganske kiseline. Ima mnogostrane mogućnosti primjene, npr. u prehrambenoj industriji, u proizvodnji pića, u mljekarstvu, pivarstvu i podrumarstvu, u farmakološkoj i kozmetičkoj industriji, u izradi kemijskih aparata, arhitekturi, automobilskoj industriji, za kućanske predmete i aparate, za kirurške instrumente, sanitarne uređaje itd. [12]

X5CrNiMo17-12-2 (AISI 316) je austenitni nehrđajući čelik legiran molibdenom. Visoko je otporan na koroziju. Može se koristiti u medijima koji sadrže kloride i kiseline. Pogodan je za poliranje na visoki sjaj. Zadržava čvrstoću i žilavost na temperaturama ispod nule. Koristi se za cjevovode i armaturu u kemijskoj industriji, industriji papira i celuloze, filmskoj i foto industriji, u proizvodnji voćnih sokova, likera i alkoholnih pića. [12,13]

Postoji cijeli niz različitih vrsta nehrđajućih čelika proizašlih iz čelika AISI 316 kao što su 316Ti, 316L, 316N, 316H koji se koriste za različite svrhe.

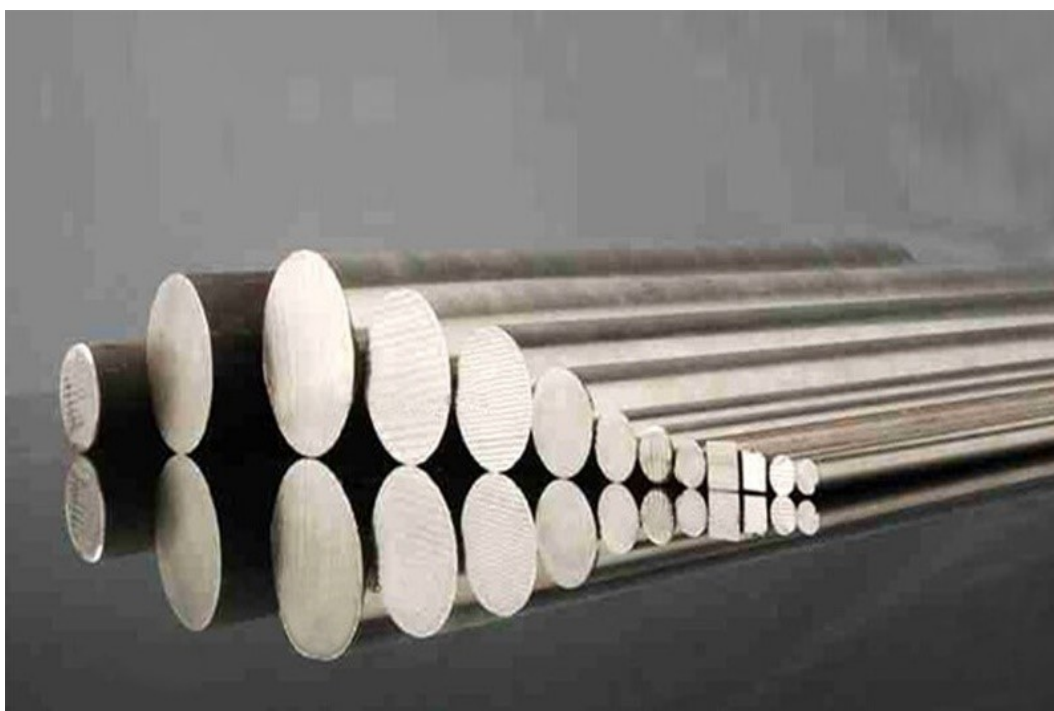
Nhrđajuću austenitni čelik oznake X6CrNiMoTi17-12-2 (AISI 316Ti) stabiliziran je titanijem. Veću otpornost na kiseline pokazuje uslijed dodatka molibdena, a zbog stabiliziranja s titanom nije potrebna toplinska obrada debljih limova nakon zavarivanja. Primjenom elektrolučnih postupaka ostvaruje se dobra zavarljivost, a plinsko zavarivanje ne smije se koristiti. Zbog dodatka titanija, kod ovog čelika poliranjem se ne može postići visoki sjaj površine. Oblikovanje dubokim vučenjem i valjanjem je dobro. Kod rezanja je potrebno koristiti alate od brzoreznog čelika ili tvrdog metala. [12,13]

Zbog legiranja molibdenom, prikladan je za izradu konstrukcijskih dijelova i uređaja za kemijsku industriju, koji su pri uporabi u kontaktu s medijima koji sadrže halogenide. Također je otporan na djelovanje neoksidirajućih kiselina. Zbog visoke granice razvlačenja ima prednost za izradu elemenata s višim mehaničkim zahtjevima. Područja primjene ovog čelika su industrija celuloze, tekstila, gnojiva, umjetnih materijala i goriva, fotoindustrija te farmaceutska industrija. [12,13]



Nehrđajući austenitni čelik oznake X2CrNiMo17-12-2 (AISI 316L) je austenitni Cr-Ni čelik legiran s molibdenom, ima vrlo niski sadržaj ugljika i relativno je dobro otporan na koroziju, naročito na interkristalnu, te se može polirati na visoki sjaj. Kolokvijalno se za ovu vrstu čelika koristi naziv „morski inox“ jer je vrlo otporan na medije koji sadrže kloride.

Upotrebljava se u kemijskoj, prehrambenoj i farmaceutskoj industriji. Koristi se za izradu opreme za postrojenja primjerice u mljekarstvu, proizvodnji voćnih sokova, likera. [12]. Primjer poluproizvoda izrađenog od čelika X2CrNiMo17-12-2 prikazan je na slici 13.



Slika 13. Šipke od čelika X2CrNiMo17-12-2 [15]

### 3. ZAVARLJIVOST AUSTENITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Austenitni nehrđajući čelici imaju vrlo dobru zavarljivost. Kemijski sastav, a pogotovo sadržaj sumpora i fosfora ima veliki utjecaj na zavarljivost. U zoni utjecaja topline mijenja se mikrostruktura osnovnog materijala zbog velikog unosa topline tijekom samog postupka zavarivanja. Po granicama austenitnih zrna mogu se izlučiti karbidi i druge štetne faze što je preduvjet za nastanak interkristalne korozije. U zavaru i oko zavara mogu se pojaviti zaostala naprezanja što može dovesti do napetosne korozije. [1,3]

Specifičnosti zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika:

- dobro su zavarljivi (iznimka su čelici koji sadrže veći udio sumpora)
- u određenim uvjetima, sklone su nastanku toplih pukotina
- ne smiju se predgrijavati

Problemi koji se javljaju kao posljedica zavarivanja:

- senzibilizacija
- tople pukotine
- zaostala naprezanja koja mogu dovesti do napetosne korozije
- toplinska obojenja
- deformacije

Najveći problem kod zavarivanja ovih čelika predstavlja mogućnost senzibilizacije tj. precipitacije kromovih karbida  $M_{23}C_6$  po granicama zrna. Kromovi karbidi nastaju u temperaturnom rasponu od 425 do 850 °C, a kritična temperatura je oko 650 °C. Kad dođe do senzibilizacije, većina ugljika nalazi se po granicama zrna i dolazi do osiromašivanja rubova austenitnih zrna kromom. Udio kroma u tom području smanji se ispod 12 % i u vrlo kratkom vremenu, ako se čelik nalazi u agresivnom mediju, može doći do interkristalne korozije i smanjena žilavosti te istežljivosti. Ako je već došlo do senzibilizacije, stanje se može popraviti toplinskom obradom. Senzibilizacija se može izbjeći izborom čelika s vrlo niskim udjelom ugljika ili stabiliziranog čelika.

Čelici koji su očvršnuti deformacijom u hladnom stanju, imaju veću izraženost ove pojave. Senzibilizacija između ostaloga smanjuje i otpornost na rupičastu, napetosnu i koroziju u procijepu. [3,6]

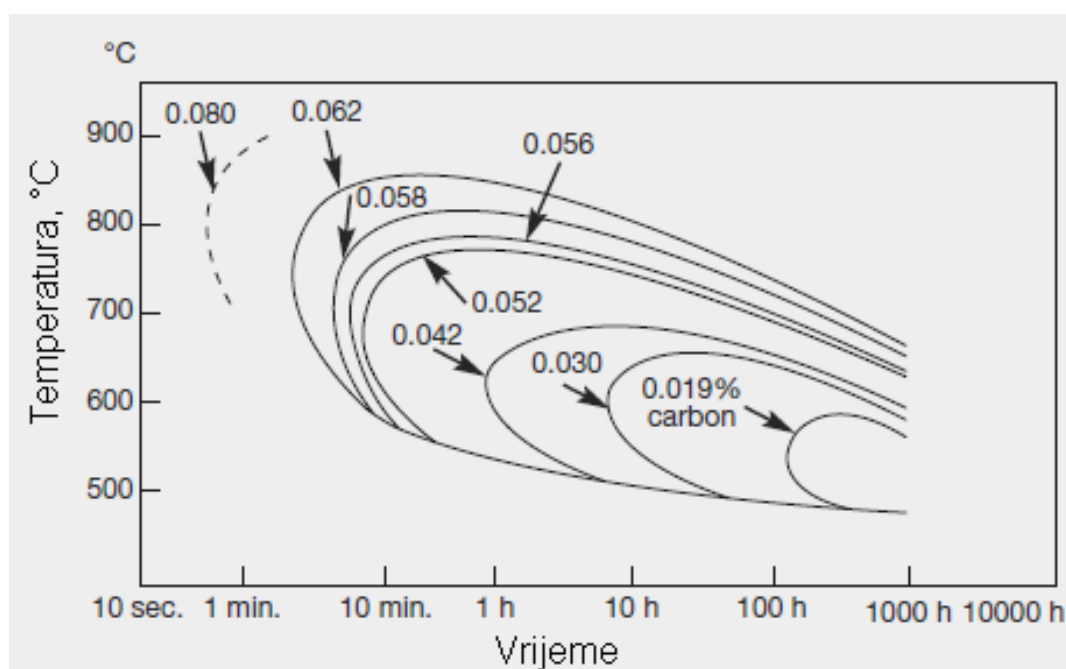


Stabilizirani austenitni nehrđajući čelici legirani su titanijem, tantalom i/ili niobijem. Sva tri elementa imaju viši afinitet prema ugljiku nego što to ima krom, pa će stvaranje TiC, TaC i NbC spriječiti nastajanje  $Cr_{23}C_6$  i time stabilizirati mikrostrukturu.

Kod austenitnih nehrđajućih čelika s niskim sadržajem ugljika ( $\leq 0,03$  % C) kao što su X2CrNi18-9 (AISI 304L) i X2CrNi19-9 (AISI 308L) čelici, mogućnost formiranja kromovih karbida svedena je na minimum.

Skлонost senzibilizaciji može se umanjiti i većom brzinom hlađenja kroz kritično temperaturno područje od 425 do 850 °C pri zavarivanju. Zato se preporučuje zavarivanje s nižim unosom topline ili uz odvođenje topline, na primjer primjenom bakrenih podložaka. [6,17]

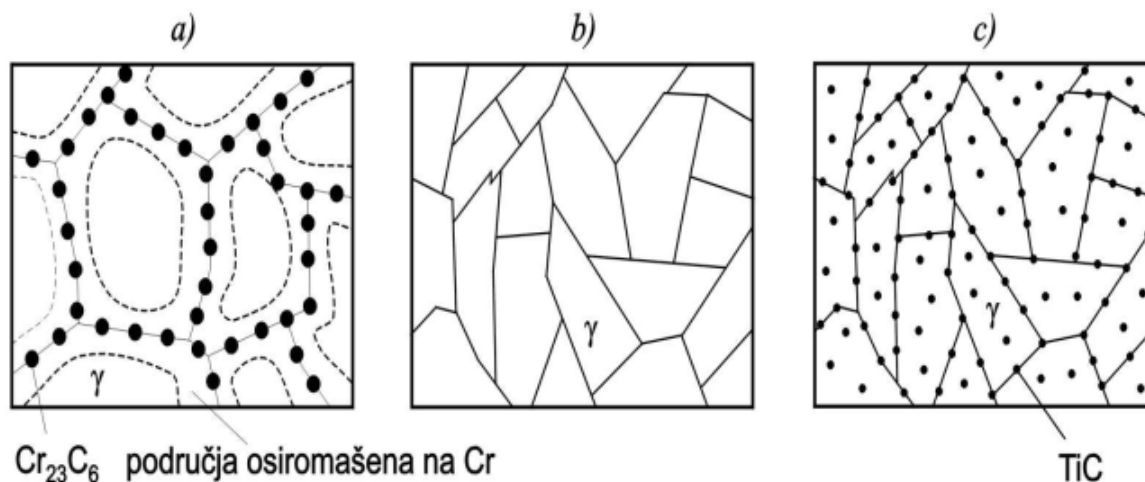
Na slici 14 vidi se kako udio C utječe na početak formiranja karbida za čelik X5CrNi18-10. Što je udio C veći, to je kraće vrijeme u kojem se može očekivati formiranje karbida. [3]



Slika 14. Utjecaj udjela ugljika na početak formiranja karbida u čeliku X5CrNi18-10 [3]

Senzibilizirani čelik moguće je 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].

Slika 15 shematski prikazuje senzibilizirani čelik (a), čelik sa smanjenim udjelom ugljika (b) i čelik stabiliziran titanijem (c). [3]



Slika 15. Shematski prikaz senzibiliziranog čelika, čelika sa smanjenim udjelom ugljika i stabiliziranog čelika [3]

Tople pukotine su pukotine koje nastaju pri kristalizaciji i hlađenju zavarenog spoja pri relativno visokim temperaturama. Tople pukotine se dijele u dvije osnovne grupe:

1. Kristalizacijske pukotine
2. Likvacijske pukotine

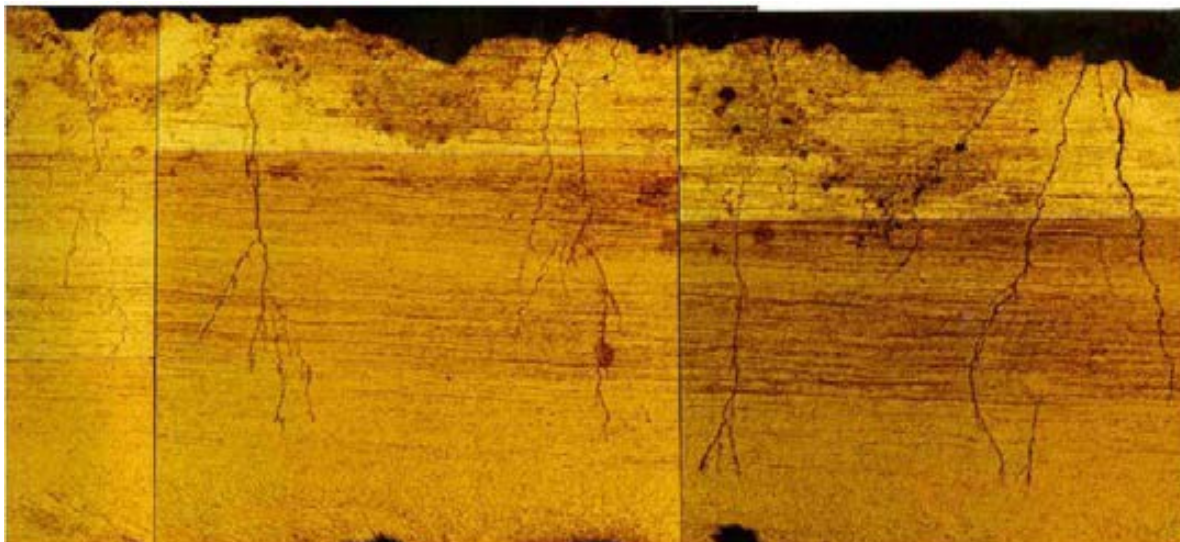
Kristalizacijske tople pukotine javljaju se u zoni taljenja. Prilikom hlađenja zavara, između kristala-dendrita nalaze se filmovi nečistoća (sumpora i fosfora). Hlađenjem zavara dolazi do njegovog skupljanja koje sprječava okolni osnovni materijal pa dolazi do vlačnog naprezanja koje uzrokuje nastanak pukotina na mjestima gdje su nečistoće prisutne. Tople pukotine mogu se spriječiti prilagođavanjem sastava osnovnog i dodatnog materijala kako bi se dobila mikrostruktura s malim udjelom ferita ( $FN \geq 4$ ). Ferit ima veću sposobnost otapanja sumpora i fosfora od austenita, pa ostaje manje tih elemenata za formaciju tekućih filmova na granicama zrna.

Likvacijske pukotine nastaju najčešće u zoni utjecaja topline kao posljedica strukturnih nehomogenosti materijala. Zbog utjecaja topline zavarivanja, nečistoće poput sumpora i fosfora koji se nalaze na granicama zrna rastale se pa dolazi do pada čvrstoće materijala. Ta pojava zajedno s naprezanjima dovodi do stvaranja pukotina likvacijskog tipa. [17]

Napetosna korozija je korozijski mehanizam u kojem kombinacija određenog materijala, prisutnih vlačnih naprezanja i značajke medija dovode do pojave pukotina na materijalu. Napetosna korozija je vrlo složena pojava podložna utjecajima brojnih čimbenika, a napreduje transkristalno ili interkristalno. Ovaj tip korozije nastupit će najčešće na mjestima gdje postoje zaostala naprezanja (napetosti) u materijalu, a to su hladno deformirani lokaliteti i

područja oko zavarenih spojeva. Austenitni Cr-Ni čelici posebno su osjetljivi na ovaj tip korozije. U slučaju napetosne korozije pukotine su najčešće transkristalne i šire se okomito na smjer vlačnog naprezanja. [6,17]

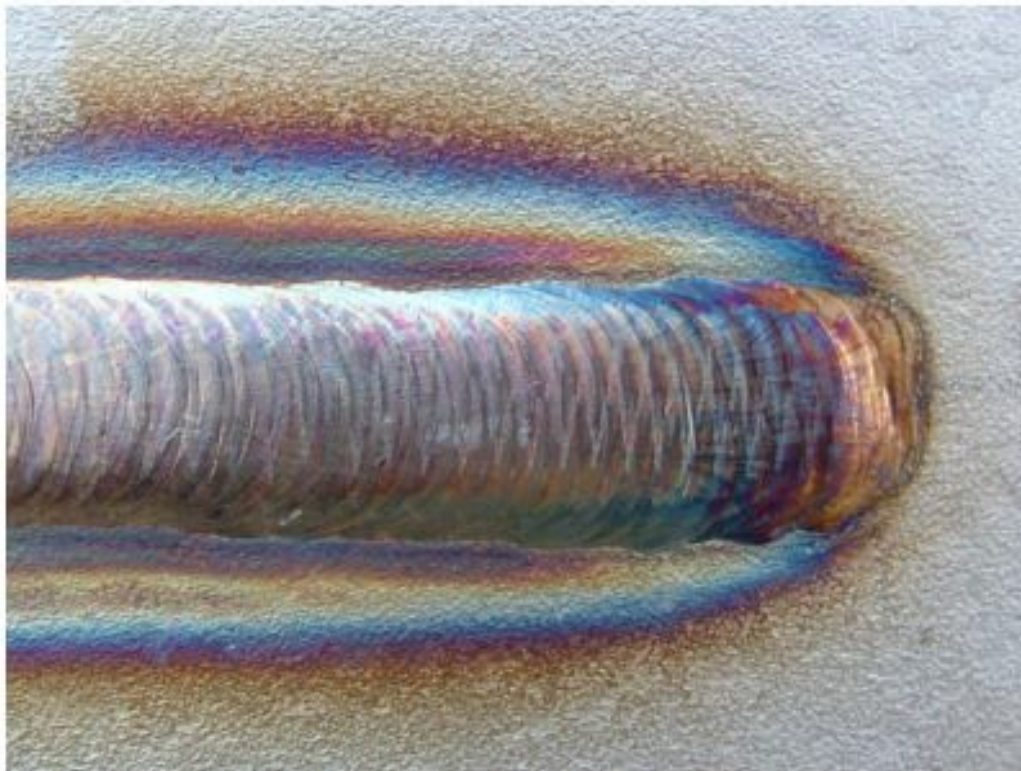
Na slici 16 prikazane su pukotine izazvane napetosnom korozijom.



**Slika 16. Transkristalna napetosna korozija austenitnog čelika X5CrNi18-8 [6]**

Napetosna korozija problematična je za predviđanje jer prije pojave pukotina na konstrukciji nema nikakvih naznaka po kojima bi se moglo naslutiti njeno nastajanje. Problemi koji nastaju zbog ove vrste korozije nerijetko uzrokuju visoke troškove.[6]

Kao posljedica zavarivanja, osim strukturnih promjena koje nastupaju u metalu zavora, zoni utjecaja topline te osnovnom materijalu, na površini nehrđajućih čelika dolazi do nastanka obojenosti. To su područja oksida različitog kemijskog sastava i debljine, a prikazane su na slici 17. S obzirom na mehanizam korozijske postojanosti ovih materijala, koji se zasniva na spontano formiranom pasivnom filmu kromovih oksida, ovakva područja obojenosti vrlo negativno utječu na korozijsku otpornost zavarenog spoja. Ova negativna pojava može se umanjiti uporabom pravilne plinske zaštite, odnosno zavarivanjem u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova poput argona, helija ili njihovih mješavina. Ako je već došlo do stvaranja obojenosti, postoje određene metode kojima se one mogu ukloniti. Te metode uključuju mehaničku, kemijsku ili elektrokemijsku obradu površine nakon zavarivanja, što vrlo pozitivno utječe na korozijsku postojanost zavarenog spoja, a time i na sigurnost konstrukcije u cjelini [4].



**Slika 17. Obojenja površine nastala unosom topline postupkom zavarivanja [6]**

Ako je ikako moguće, austenitni nehrđajući čelici se nakon zavarivanja toplinski obrađuju žarenjem na 1050 do 1100°C pri čemu se rastvaraju karbidi i druge intermetalne faze. Nakon homogenizacije brzim hlađenjem prolazi se kroz područje od 850 do 450 °C čime se izbjegava izlučivanje kromovih karbida po granicama austenitnog zrna. Za poboljšanje hlađenja ponekad se preporuča i dodatno hlađenje u nekom mediju, često vodom.

Zbog visokog koeficijenta toplinske istezljivosti i sniženog koeficijenta toplinske vodljivosti, povećana je sklonost deformacijama. [16]

Pri zavarivanju austenitnih čelika potrebno je slijediti općenite upute koje se odnose na zaštitu od vlage, čistoću i kvalitetu površina, temperaturu okoliša, itd.[16]

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Osnovni cilj rada bio je utvrđivanje optimalnih parametara toplinske obrade zavarenog spoja na cijevima od austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNi18-9.

Cijevi su izrađene iz lima koji se postupno oblikuje i zavaruje postupkom plazma zavarivanja. Cijevi se nakon toga namataju na kolutove, kalibriraju i toplinski obrađuju žarenjem na temperaturi od 1050 °C. Žarenje se provodi kontinuiranim prolaskom cijevi kroz peć pri čemu se cijevi zagrijavaju do temperature žarenja, progrijavaju i nakon toga hlade. Brzina zagrijavanja, trajanje žarenja i brzina ohlađivanja ovise o brzini prolaska cijevi kroz peć, odnosno o brzini namatanja cijevi na kolut ( $v$ ).

Sva planirana ispitivanja provedena su na sljedećim uzorcima:

1. Cijev nakon zavarivanja i kalibriranja
2. Cijev nakon toplinske obrade:  $v = 0,60$  m/min
3. Cijev nakon toplinske obrade:  $v = 0,85$  m/min
4. Cijev nakon toplinske obrade:  $v = 0,90$  m/min
5. Cijev nakon toplinske obrade:  $v = 1,00$  m/min
6. Cijev nakon toplinske obrade:  $v = 1,10$  m/min
7. Cijev nakon toplinske obrade:  $v = 1,20$  m/min.

Neka ispitivanja provedena su na uzorku polaznog lima i na cijevi nakon zavarivanja.

Da bi se odredila optimalna brzina prolaska cijevi kroz peć provedena su sljedeća ispitivanja:

1. Analiza mikrostrukture osnovnog materijala, metala zavara i zone utjecaja topline
2. Mjerenje mikrotvrdoće osnovnog materijala, metala zavara i zone utjecaja topline
3. Ispitivanje cijevi na savijanje.

Na temelju dobivenih rezultata, moći će se odrediti optimalna brzina prolaska cijevi kroz peć za toplinsku obradu.

#### 4.2. Proces proizvodnje cijevi

Kako je već prije navedeno, cijevi se izrađuju od austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNi18-9, isporučenog u obliku lima vrlo velike duljine, debljine 0,5 mm i širine 30 mm. Srednje vrijednosti masenih udjela pojedinih elemenata (osim za P, S i N) u kemijskom sastavu čelika prikazani su u tablici 7, a minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava zajamčenih od strane proizvođača lima prikazane su u tablici 8.

Te cijevi se ugrađuju u rashladnu komoru aparata za hlađenje pića prikazanog na slici 18.

**Tablica 7. Kemijski sastav čelika X2CrNi18-9, % mase**

C	Si	Mn	P (max)	S (max)	Cr	Ni	N (max)	Fe
0,020	0,410	1,550	0,030	0,001	18,3	9	0,051	ostatak

**Tablica 8. Mehanička svojstva čelika X2CrNi18-9**

$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$A$ %	HV
279	657	62	156



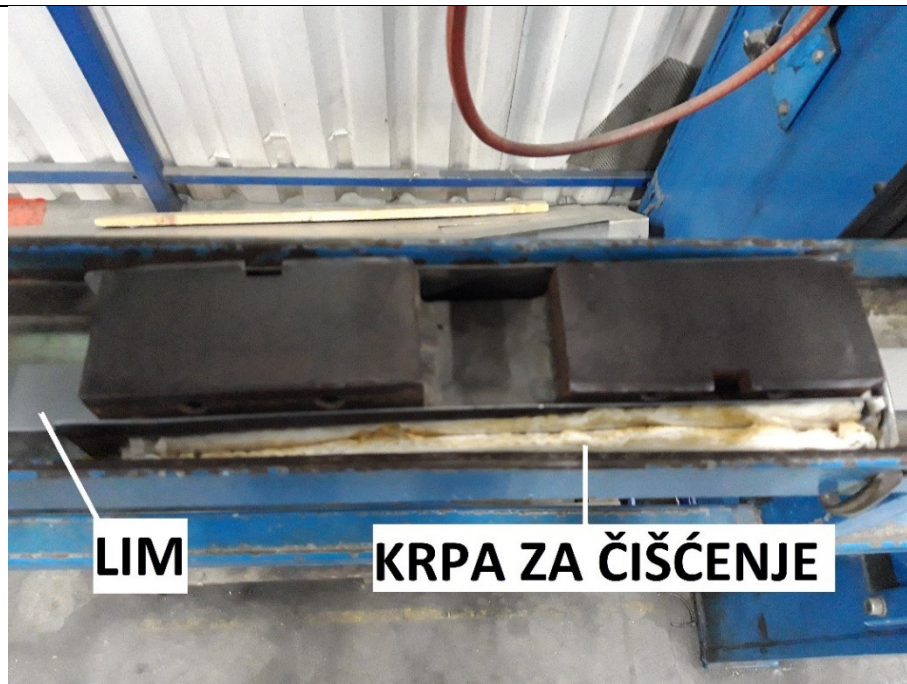
**Slika 18. Uredaj za točenje piva - BERG NB1002T70 MOBI [7]**



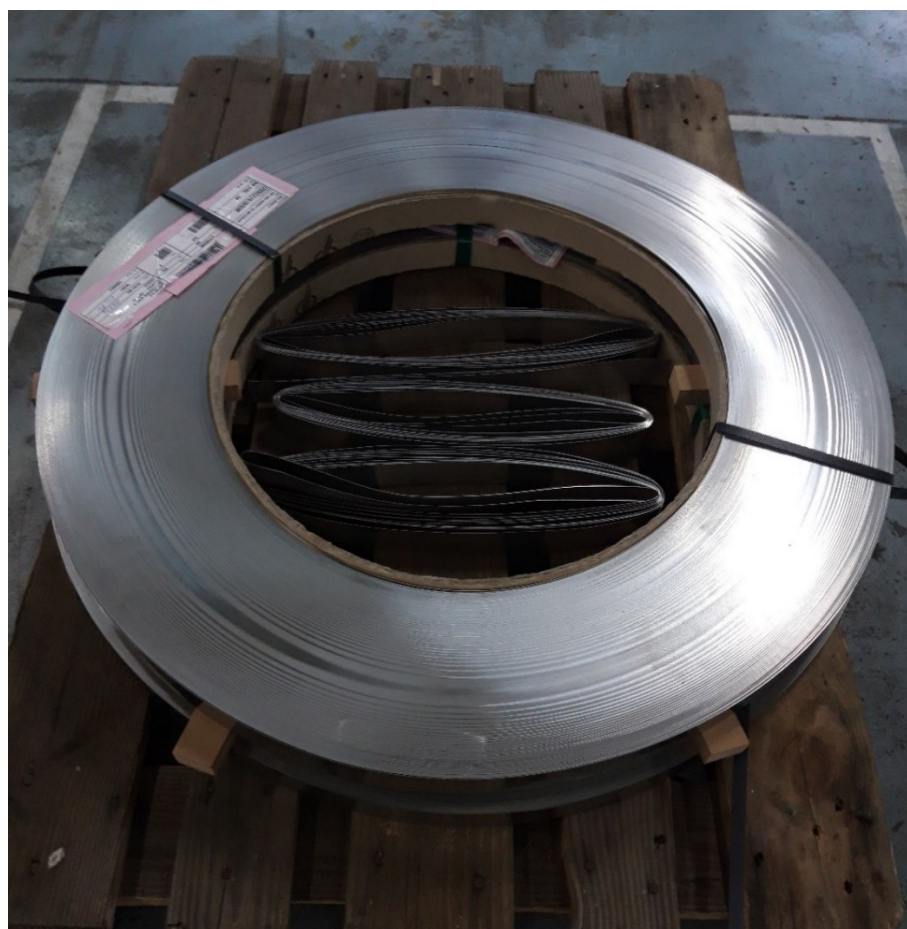
Proizvodnja šavne cijevi kreće od odmatanja na kolut namotanog lima, kao što je prikazano na slici 19. Sam kolut ima ukupnu masu oko 300 kg. Lim nakon toga prolazi kroz čišćenje između krpa natopljenih acetonom, u cilju skidanja nečistoće s površine. Slika 20 prikazuje proces čišćenja lima. Na slici 21 prikazan je polazni kolut lima od kojeg u konačnici nastaje gotovi proizvod.



**Slika 19. Odmatanje koluta**



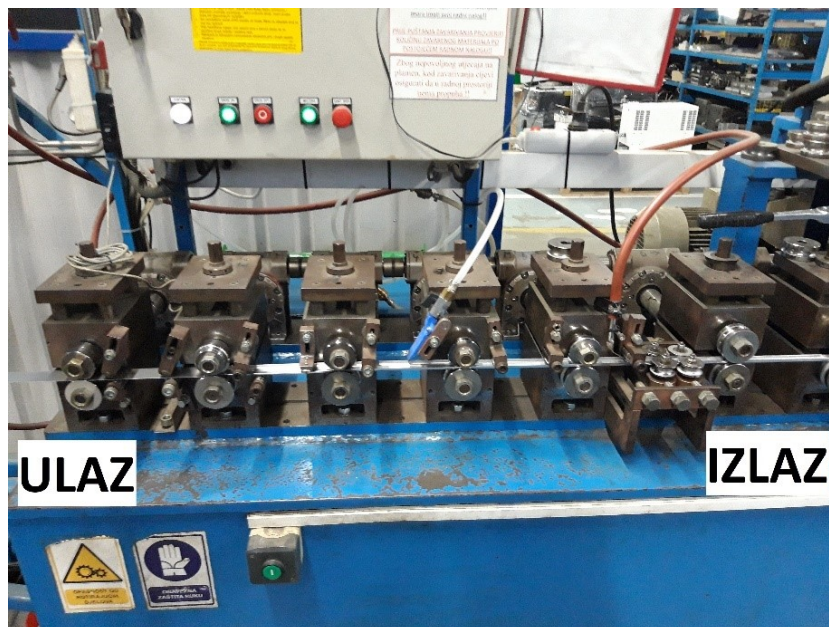
Slika 20. Čišćenje lima



Slika 21. Polazni kolut lima za izradu cijevi



Očišćeni lim formira se u oblik cijevi pomoću sustava profiliranih valjaka, prikazanih na slici 22. Početni dobiveni promjer cijevi iznosi približno 10 mm. Ukupno se koristi 4 seta valjaka za oblikovanje kružnog presjeka. Brzina procesa je 3,5 m/min.



Slika 22. Sustav profiliranih valjaka za oblikovanje cijevi

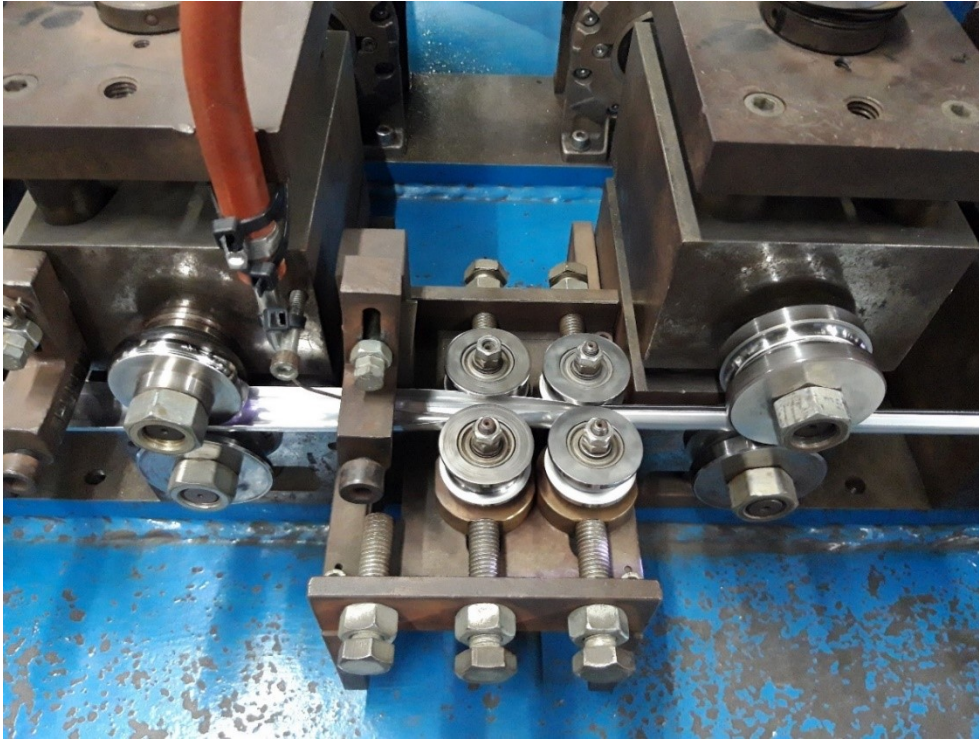
Nakon oblikovanja lima u oblik cijevi slijedi plazma zavarivanje. Profilirani lim ulazi u vodom hladenu komoru za zavarivanje gdje se krajevi lima spajaju bez dodatnog materijala. Koriste se dva zaštitna plina, s vanjske i unutarnje strane cijevi. S vanjske strane cijevi koristi se mješavina plinova naziva VARIGON. To je mješavina sastavljena od 80 do 97 % argona i 3 do 20 % vodika. S unutarnje strane koristi se mješavina FORMIR koja se upuhuje pomoću kapilare. Plin se sastoji od 80 do 94,3 % dušika i 5,7 do 20 % vodika.

U tablici 9 navedeni su parametri plazma zavarivanja.

Tablica 9. Parametri plazma zavarivanja

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

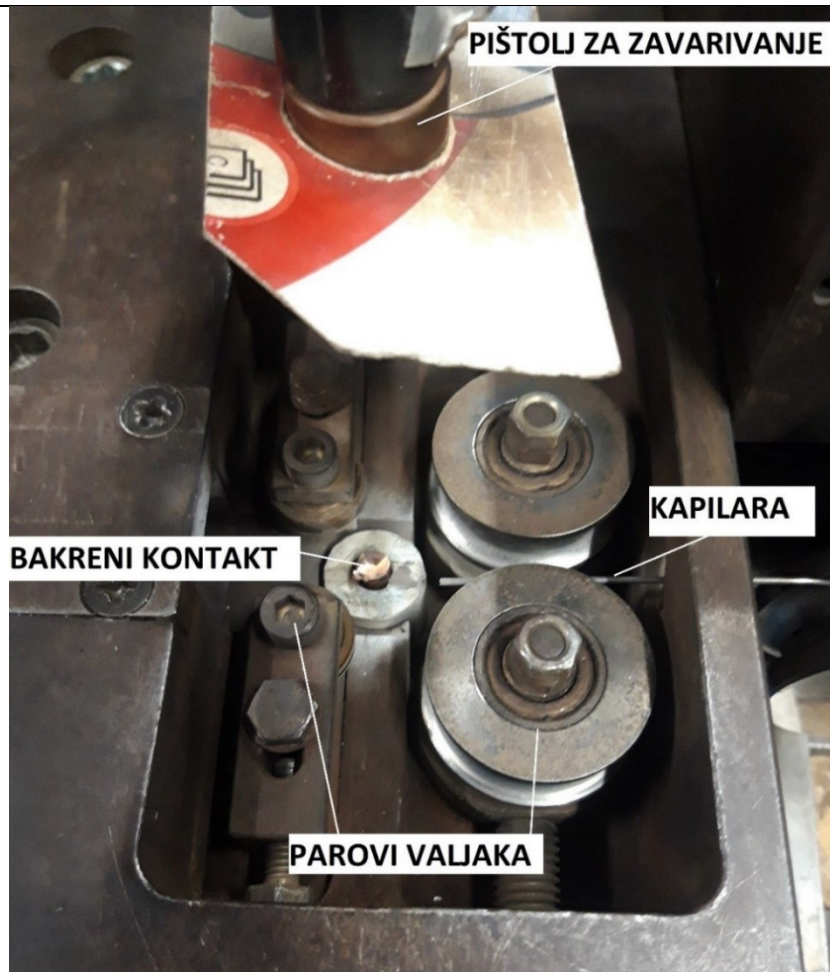
Na slici 23 prikazan je način upuhivanja plina s unutarnje strane cijevi.



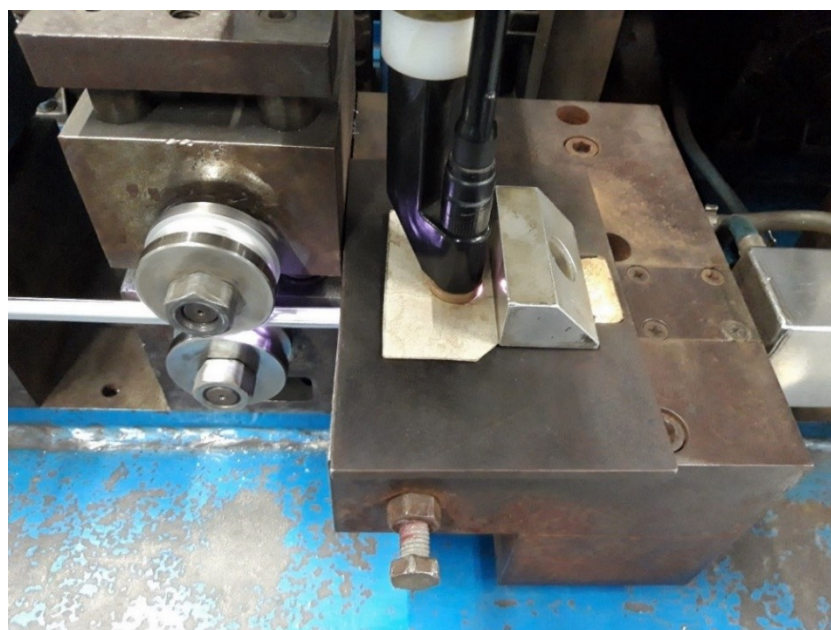
**Slika 23. Upuhivanje zaštitnog plina FORMIRA pomoću kapilare**

Komora za zavarivanje ima bitnu ulogu u sprječavanju otpuhivanja zaštitnog plina. Također ima i ulogu zaštite radnika od UV zračenja. Unutar komore se nalaze dva para valjaka za vođenje lima, jedan par je smješten prije i jedan nakon mjesta zavarivanja. Uz njih, postoji i bakreni kontakt koji služi za uspostavljanje strujnog kruga, blizu kojeg se nalazi i kapilara. Otvorena komora za zavarivanje prikazana je na slici 24. Iznad komore je postavljen zavarivački pištolj koji ima mogućnost podešavanja po sve 3 osi.

Vizualna kontrola zavara vrši se pomoću leće i zavarivačkog stakla preko otvora na poklopcu komore. Sam proces zavarivanja prikazan je na slici 25.



Slika 24. Otvorena komora za zavarivanje

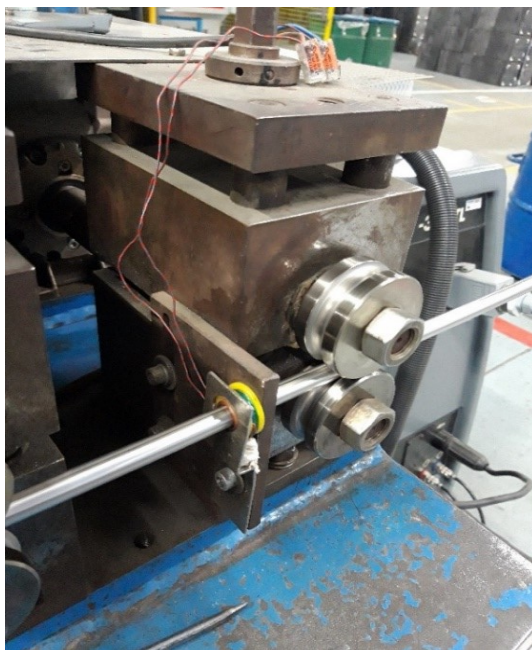


Slika 25. Proces zavarivanja cijevi



Nakon izlaska iz komore, zavarena cijev prolazi kroz još 3 para valjaka. Hlađenje cijevi odvija se na zraku. Provjera nepropusnosti cijevi i zavara obavlja se prije namatanja cijevi kako bi se pravovremeno mogli uočiti eventualni nedostaci. Ukoliko nema nedostataka, cijev se namata pomoću namatalice u nove kolutove.

Na slici 26 prikazan je uređaj za kontrolu zavara, a na slici 27 prikazana je namatalica cijevi.

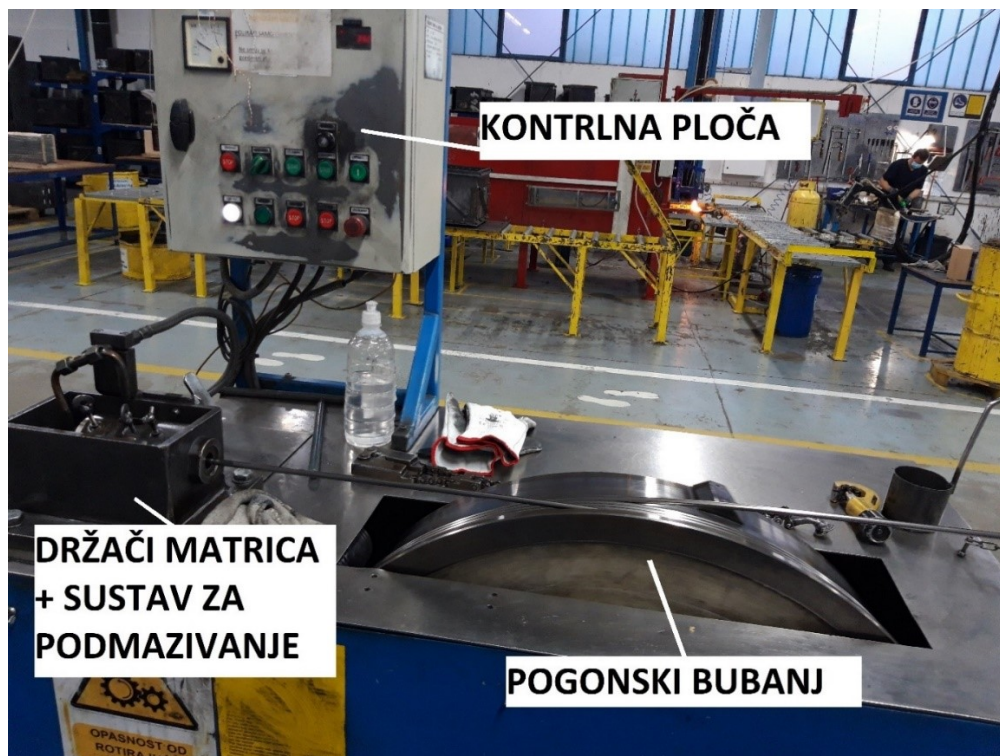


**Slika 26. Kontrola zavara**



**Slika 27. Namatalica cijevi**

Cijev namotana u novi kolot premješta se na sljedeću fazu – provlačenje odnosno kalibriranje. Sustav za provlačenje sastoji se od pogonskog bubnja, matrice i držača, sustava za podmazivanje i kontrolne ploče, slika 28.



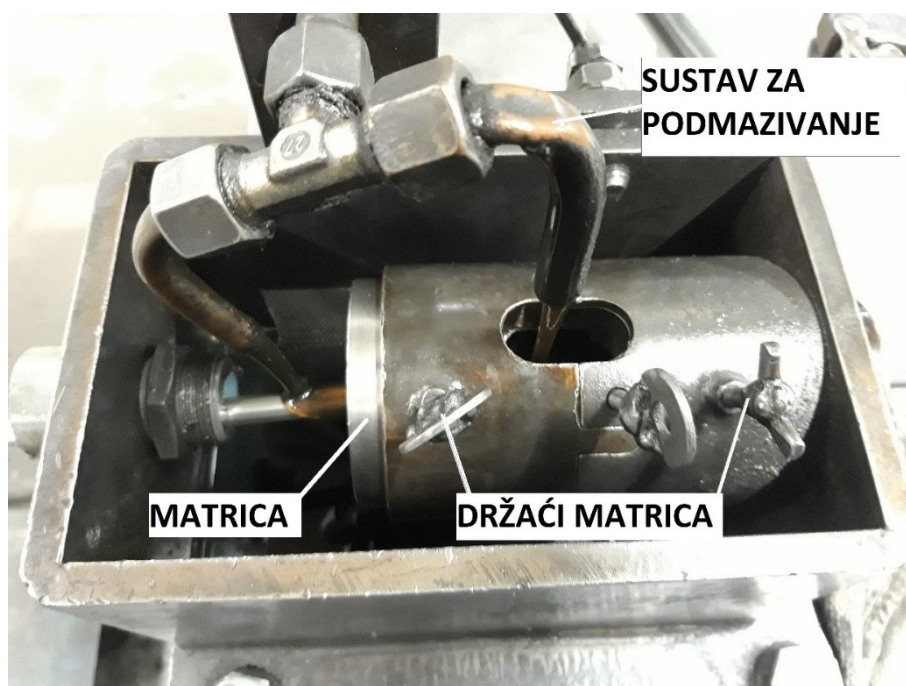
Slika 28. Sustav za provlačenje

Vanjski promjer cijevi smanjuje se u dva koraka. Početni promjer od okvirno 10 mm, dobiven plazma zavarivanjem, smanjuje se prolaskom kroz matrice na promjer 9,5 mm i nakon toga na konačnih 8 mm. Cijevi se mogu kalibrirati i na razne druge promjere: 5, 6, 7, 11 ili 12 mm. Konusne matrice prevučene su tvrdim prevlakama na bazi ugljika (eng. Diamond Like Carbon - DLC) što doprinosi smanjenju trošenja alata. S ciljem smanjenja trenja, cijev se prije kalibriranja zalijeva mazivom.

Na slici 29 prikazana je matrica za izradu cijevi promjera 8 mm, a na slici 30 prikazani su držači matrice i sustav za podmazivanje.



Slika 29. Matrica za provlačenje



Slika 30. Sustav za podmazivanje i držači matrica

Pogonski bubanj povlači cijev kroz matrice silom od 4 kN uz brzinu od 7 m/min. Sila vučenja ovisi o razlici promjera kalibriranja te može biti u rasponu od 1 do 6 kN.

Prije namatanja na kolut, kalibrirane cijevi brišu se spužvama natopljenim u sredstvo za odmašćivanje. Ova operacija prikazana je na slici 31.





**Slika 31. Odmaščivanje cijevi**

Kalibrirane cijevi dodatno se propuhuju zaštitnih plinom. Propuhivanje traje 8 minuta, a izvodi se pod tlakom od 4 bara. Nakon propuhivanja cijevi se zatvaraju da zaštitni plin ostane u njima te da se postigne inertna atmosfera neposredno prije odžarivanja. Privremeno skladištene cijevi prikazane su na slici 32.



**Slika 32. Privremeno skladištenje cijevi**

Posljednja faza u proizvodnji cijevi je toplinska obrada koja se sastoji od rastvornog žarenja i naglog hlađenja. Kroz peć, čija duljina iznosi 2 m i temperatura 1050 °C, istodobno se povlači 6 do 10 cijevi koje se odmataju s kolutova. Na peć se nastavlja 4 m dugačak bazen s vodovodnom vodom čija temperatura ne prelazi 50 °C i u kojoj se cijevi hlade. Hlađenje cijevi mora biti dovoljno brzo da se spriječi zadržavanje austenitnog čelika u temperaturnom rasponu gdje postoji opasnost od nastanka nepoželjnih strukturnih faza, prije svega karbida. Trenutna brzina prolaska cijevi kroz peć iznosi 0,85 m/min. S obzirom na to, vrijeme žarenja iznosi oko 140 s, a vrijeme hlađenja oko 280 s. Zaštitna atmosfera u peći je sastavljena od vodika i dušika (% H<sub>2</sub> = 75 i % N<sub>2</sub> = 25).

Peć može biti u tri režima rada:

1. sigurnosni režim (SAFETY) – temperatura peći iznosi 20 °C, samo je puštena pod napon i sve funkcije su izvan upotrebe
2. pripremni režim (WAITING) – temperatura peći iznosi 690 °C, u peći nema zaštitnih plinova
3. radni režim (THREATMENT) – temperatura peći 1050 °C.

Nakon izlaska iz bazena i hlađenja, na cijevi se pomoću pisača ispisuju podaci o materijalu, dimenzijama, datumu proizvodnje i proizvođaču.

Na slici 33 prikazana je peć u kojoj se obavlja toplinska obrada cijevi, a na slici 34 prikazan je ulaz cijevi u peć (a) te pisač za ispisivanje osnovnih podataka (b).





Slika 33. Peć [8]



a)



b)

Slika 34. Ulaz cijevi u peć (a) te pisač (b) [10]

Nakon toplinske obrade i označavanja, cijevi se namataju u kolutove, ispituje se njihova nepropusnost propuhivanjem zraka pod pritiskom 7,5 bara, a nakon toga se skladište do početka savijanja.

Na slici 35 prikazane su namatalice cijevi.



**Slika 35. Namatalice cijevi**

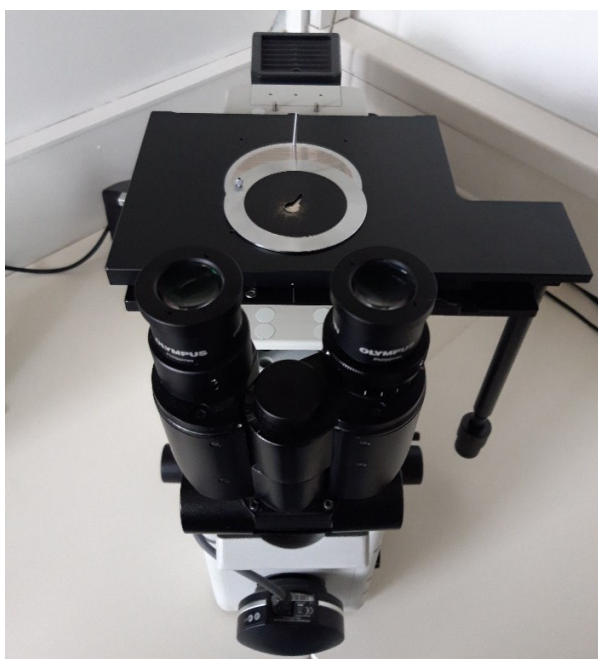
### 4.3. Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture

Analiza mikrostrukture svih uzoraka provedena je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagreb, na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS GX51, prikazanom na slici 36.

Uzorci su analizirani u poliranom i nagriženom stanju, pri različitim povećanjima od 50 do 1000 $\times$ .

Za potrebe planiranog istraživanja, za analizu mikrostrukture, pripremljeni su sljedeći uzorci:

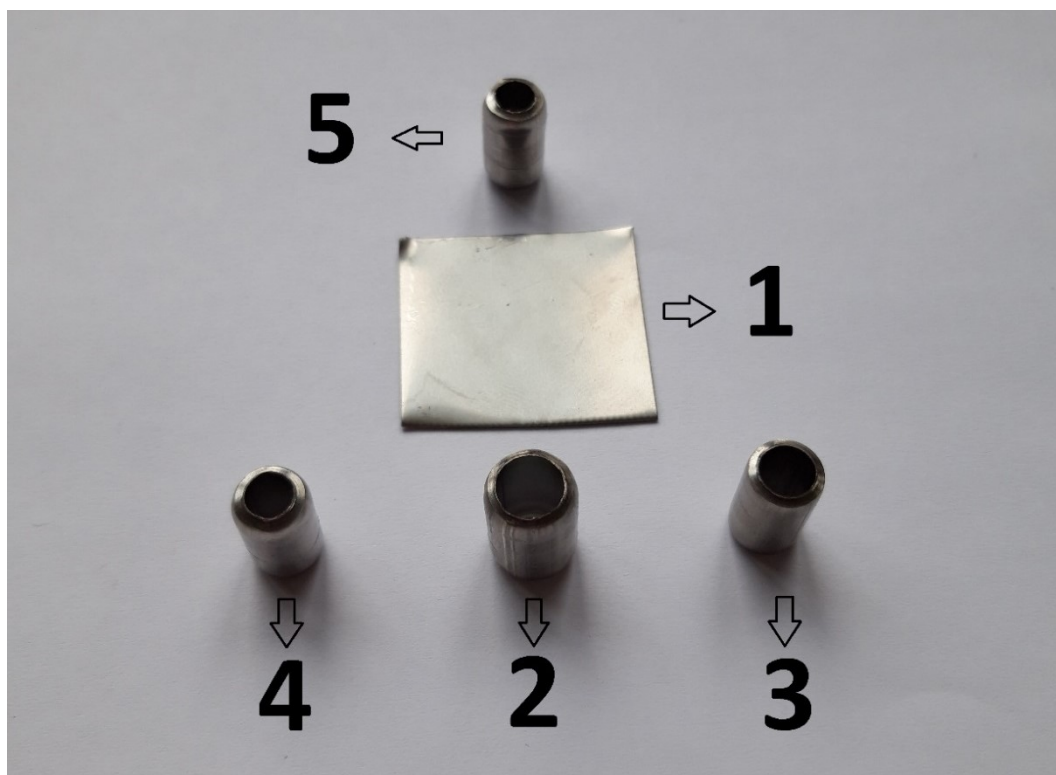
1. polazni lim
2. cijev nakon zavarivanja
3. cijev nakon zavarivanja i kalibriranja
4. toplinski obrađena cijev pri brzini prolaska kroz peć od 0,60 m/min
5. toplinski obrađena cijev pri brzini prolaska kroz peć od 0,85 m/min
6. toplinski obrađena cijev pri brzini prolaska kroz peć od 0,90 m/min
7. toplinski obrađena cijev pri brzini prolaska kroz peć od 1,00 m/min
8. toplinski obrađena cijev pri brzini prolaska kroz peć od 1,10 m/min
9. toplinski obrađena cijev pri brzini prolaska kroz peć od 1,20 m/min



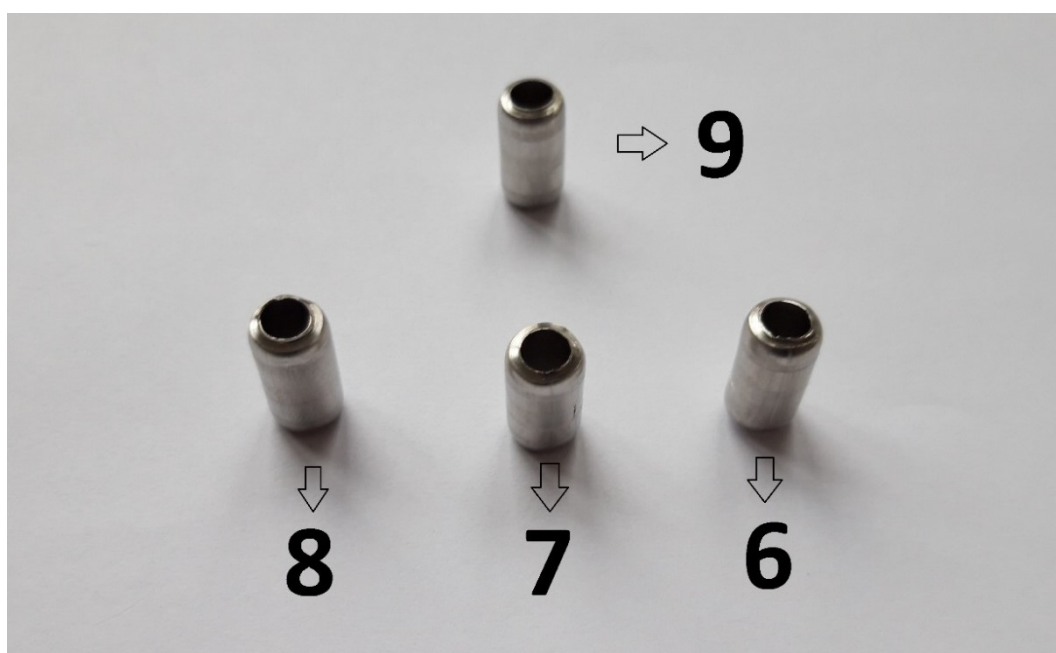
Slika 36. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51



Na slikama 37 i 38 prikazani su izrezani uzorci prije zalijeivanja u masu.



Slika 37. Uzorci 1, 2, 3, 4 i 5 prije zalijeivanja u masu



Slika 38. Uzorci 6, 7, 8 i 9 prije zalijeivanja u masu

Svi navedeni uzorci raspoređeni su u dva kalupa i toplo zaliveni u polimernu masu.

Na slici 39 prikazani su zaliveni uzorci sa slike 37 i 38, nakon skrućivanja mase.



**Slika 39. Uzorci zaliveni u polimernu masu**

Slika 40 prikazuje uređaj BUEHLER LTD u kojem su uzorci zaliveni u polimernu masu.



**Slika 40. Uređaj BUEHLER LTD**

Nakon zalijevanja, slijedila je mehanička priprema – brušenje i poliranje.

Brušenje uzoraka provedeno je na uređaju za brušenje MINITECH 233, koji je prikazan na slici 41. Brušenje se provodi u šest koraka primjenom brusnih papira od P120 do P4000 u pojedinačnom trajanju od 15 do 20 sekundi.

U tablici 10 prikazani su parametri brušenja za svaki pojedini korak.

**Tablica 10. Parametri brušenja**

Korak	Oznaka brusnog papira	Hlađenje	Sila pritiska, N	Orijentacija uzorka	Brzina rotacije ploče, okr./min
1.	P120	vodeno	ručna	0°	300
2.	P320	vodeno	ručna	+ 90°	300
3.	P500	vodeno	ručna	0°	300
4.	P1000	vodeno	ručna	+ 90°	300
5.	P2000	vodeno	ručna	0°	300
6.	P4000	vodeno	ručna	+ 90°	300



**Slika 41. Uređaj za brušenje MINITECH 233**

Poliranje se provodi u dva koraka, na uređaju STRUERS DAP-V, prikazanom na slici 42. Dijamantna pasta nanosi se direktno na uzorak koji se stavlja u prihvatač uređaja te se polira u trajanju od dvije minute. Parametri poliranja navedeni su u tablici 11.

**Tablica 11. Parametri poliranja**

Korak	Veličina zrna, $\mu\text{m}$	Hlađenje / mazivo	Sila, N	Vrijeme poliranja, min	Brzina rotacije ploče, okr./min
1.	3	voda + alkohol	30	2	150
2.	1	voda + alkohol	30	2	150



**Slika 42. Poliranje uzoraka**

Nakon poliranja uzorci su promatrani na svjetlosnom mikroskopu pri različitim povećanjima. Na poliranoj površini nisu uočene nikakve nepravilnosti ni na jednom uzorku.

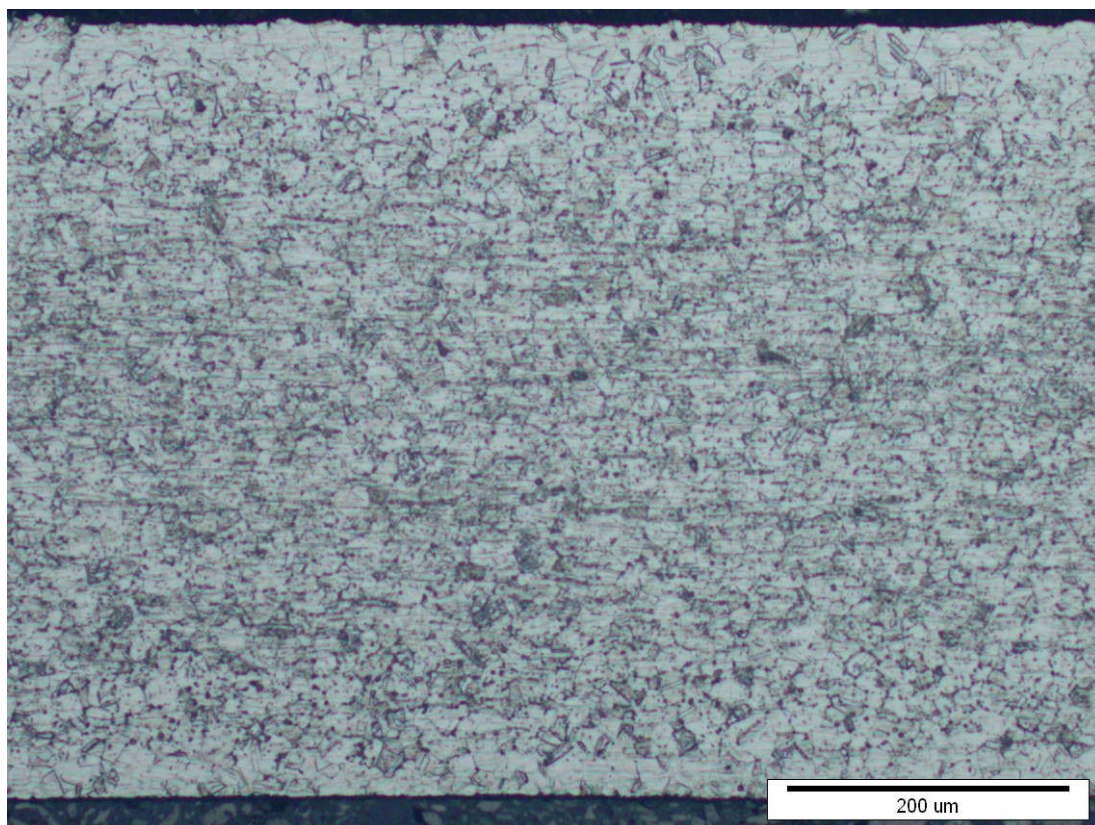
Da bi se otkrila mikrostruktura uzoraka, oni se moraju nagrizzati. Ovi uzorci nagrizeni su elektrokemijski u 10 %-tnoj oksalnoj kiselini pri jakosti struje 4 A i pod naponu od 7 V. Trajanje nagrizzanja određeno je vizualnom kontrolom. Nakon postizanja zadovoljavajuće nagrizenosti, uzorci su isprani vodom da se zaustavi proces nagrizzanja.



#### 4.4. Analiza mikrostrukture

##### 4.4.1. Analiza mikrostrukture polaznog lima

Na slici 43 prikazana je mikrostruktura nagriženog uzorka poprečnog presjeka polaznog lima snimljena pri povećanju  $100\times$ . Na površini uzorka nisu uočene nepravilnosti. Mikrostruktura lima je austenitna, relativno sitnozrnata. Austenitna zrna su pravilnog oblika i ujednačene veličine.



Slika 43. Mikrostruktura lima u nagriženom stanju, poprečni presjek

##### 4.4.2. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja cijevi nakon zavarivanja

Na slici 44 prikazana je fotografija makrostrukture zavarenog spoja cijevi snimljena pri povećanju  $100\times$  na kojoj se vidi geometrija i oblik zavarenog spoja. Jasno je vidljivo da s korijene strane zavar nije provaren. Do ove greške došlo je vjerojatno zbog pomaka u visini između dvije strane savijenog lima. U odnosu na debljinu stijenke cijevi, dubina neprovarenog dijela nije kritična. Zbog svega navedenog, ni geometrija zavara nije idealna. Linija staljivanja jasno je izražena po cijeloj visini zavara, a vidi se i širina zone utjecaja topline.



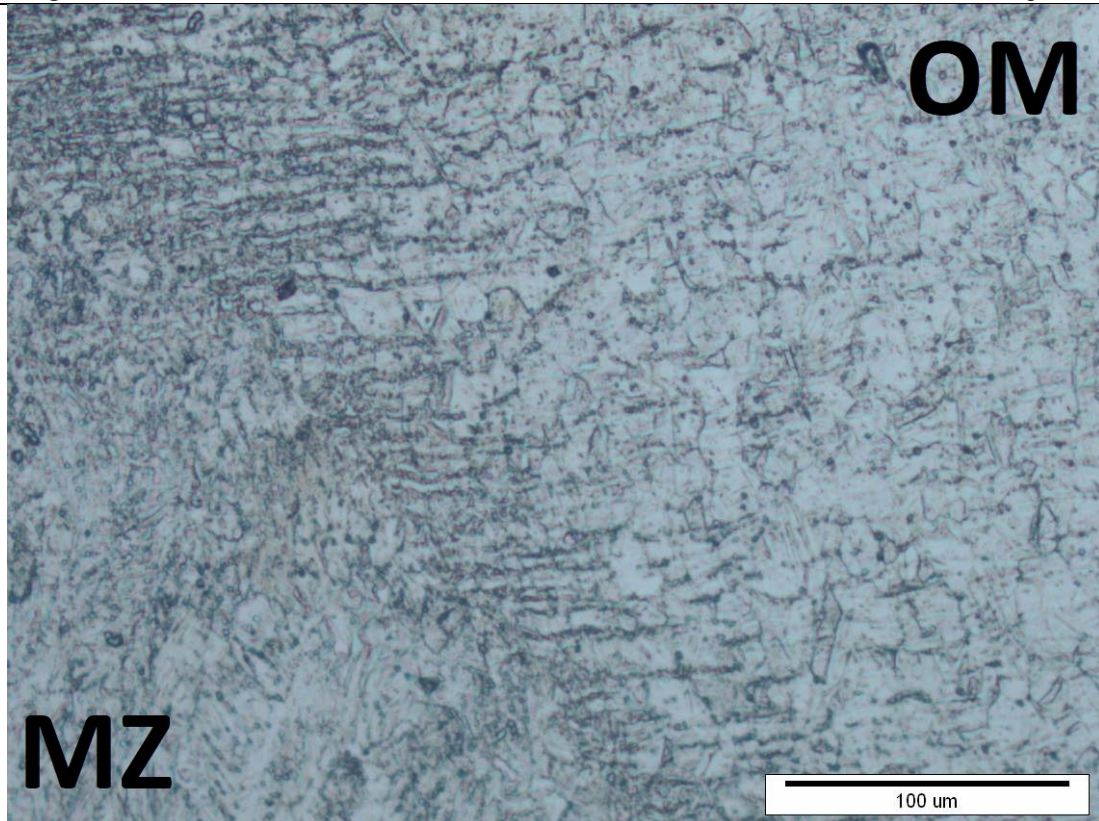


**Slika 44. Makrostruktura zavarenog spoja**

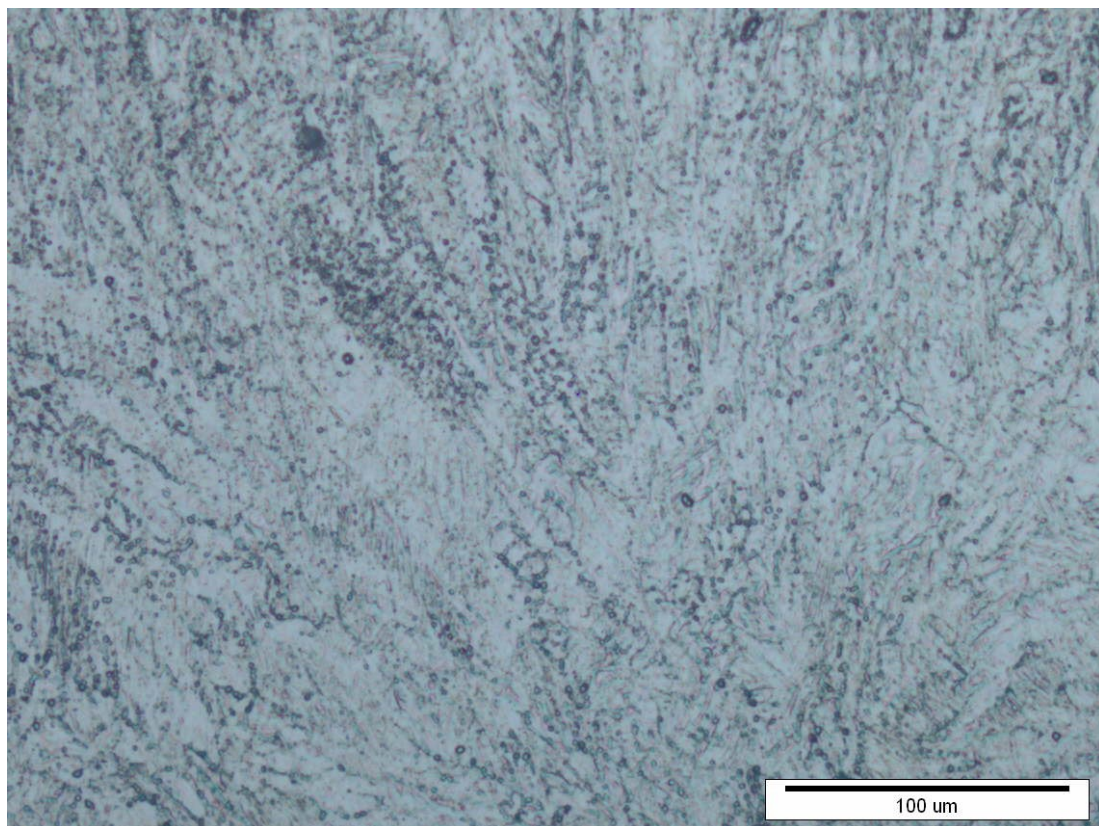
Na slici 45 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline, u sredini s desne strane zavara, snimljena pri povećanju 200 $\times$ . Linija staljivanja je relativno jasno izražena, a zona utjecaja topline je relativno uska. Lijevo od linije staljivanja vidi se mikrostruktura metala zavara, a desno se vidi mikrostruktura osnovnog materijala. U zoni utjecaja topline, mogu se uočiti sitne nakupine koje bi mogle upućivati na izlučene karbide. Slične nakupine mogu se vidjeti po cijeloj površini, ali su znatno prorijeđene. S obzirom da je maseni udio ugljika u čeliku vrlo nizak, mala je vjerojatnost da se radi o izlučenim karbidima, a veća vjerojatnost je da se radi o prevelikom nagrizanju.

Mikrostruktura metala zavara snimljena u sredini zavara pri povećanju 200 $\times$ , prikazana je na slici 46. Mikrostruktura je tipična ljevačka bez uočenih nepravilnosti, nema veće razlike između korijena, sredine i tjemena zavara.





Slika 45. Mikrostruktura zone utjecaja topline



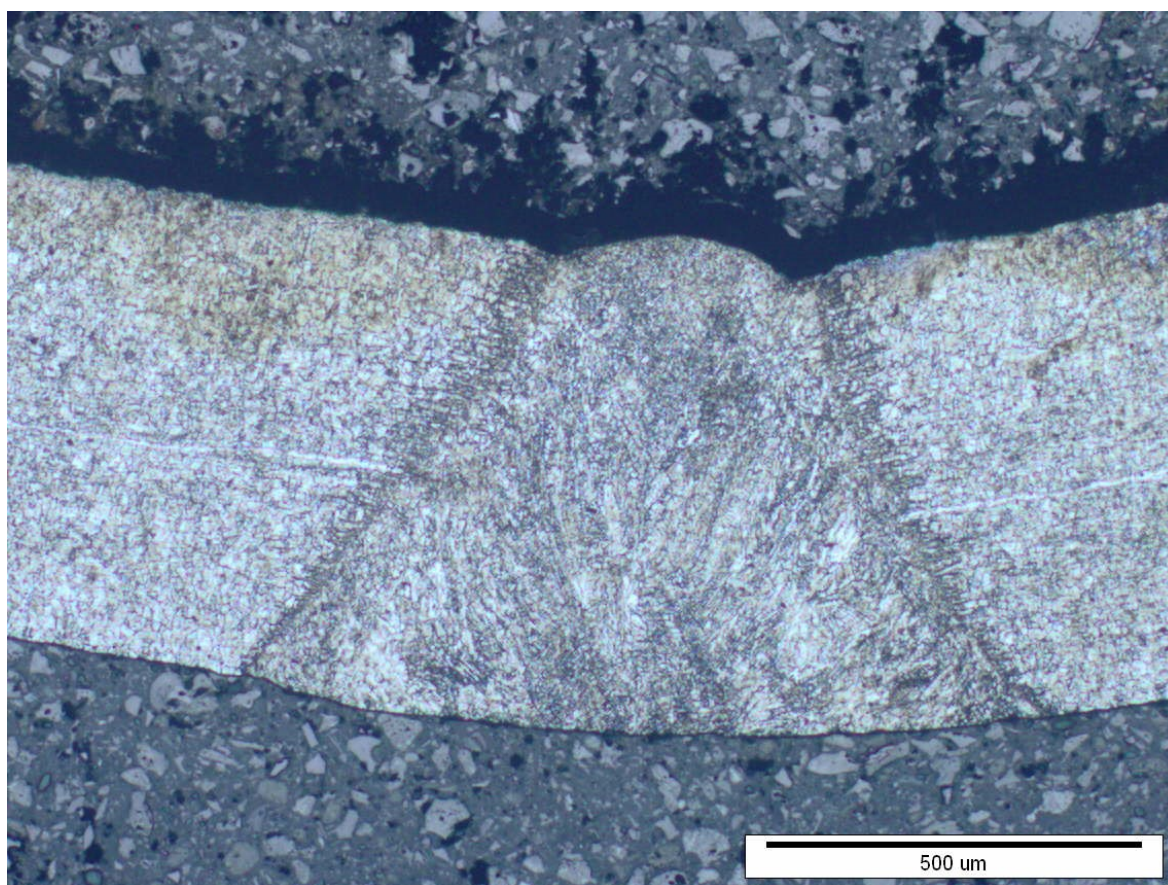
Slika 46. Mikrostruktura metala zavora



#### 4.4.3. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja nakon provlačenja (kalibriranja)

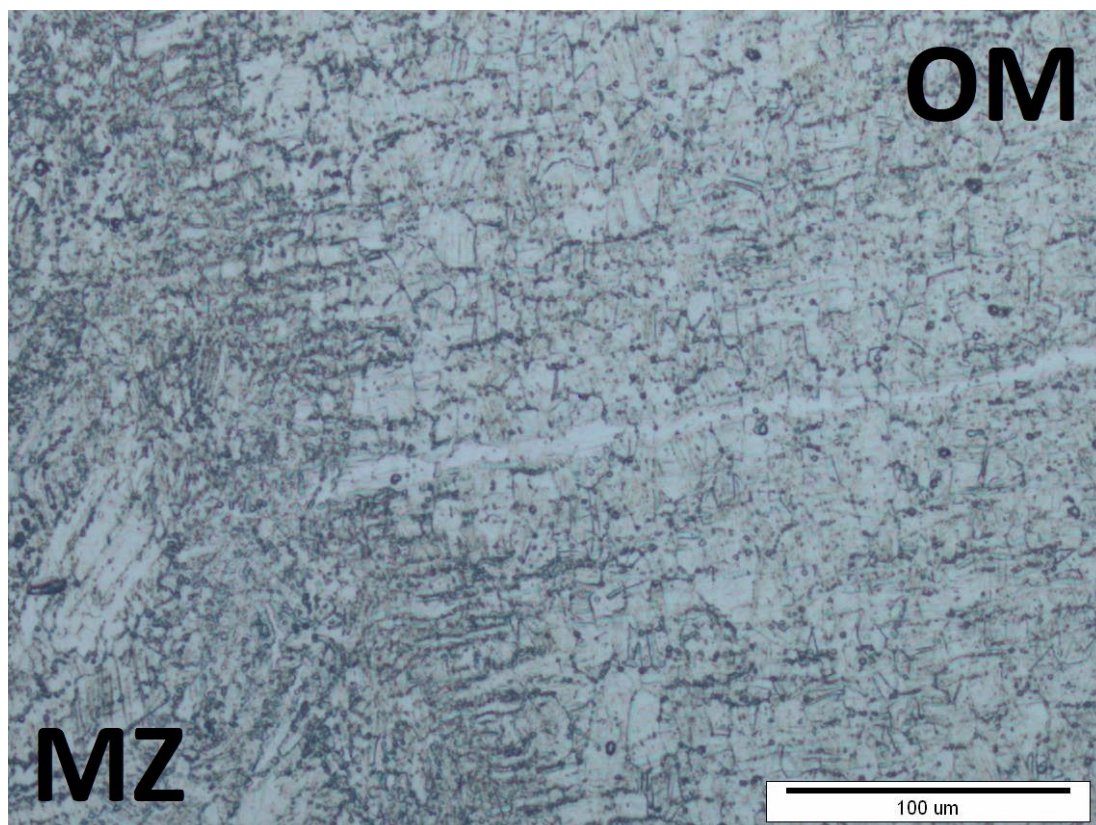
Na slici 47 prikazana je makrostruktura zavarenog spoja nakon postupka provlačenja odnosno kalibriranja, snimljena pri povećanju 50×. Svrha postupka provlačenja je smanjenje vanjskog promjera cijevi i poboljšanje kružnosti vanjskog profila cijevi. Vanjski promjer se smanjuje s 10 na 8 mm, a stijenka cijevi ostaje približno iste debljine. Tijekom ovog postupka dolazi do ugnječenja mikrostrukture, izraženije u vanjskom dijelu presjeka cijevi. Pri provlačenju dolazi i do promjene oblika zavarenog spoja. Uslijed sabijanja materijala, djelomično se smanjuje širina zavarenog spoja, zakrivljenost tjemena zavara se približava zakrivljenosti cijevi, a korijen zavara se obično izboči prema središtu cijevi.

U odnosu na stanje prije provlačenja jasno je vidljivo poboljšanje kružnosti vanjskog dijela profila cijevi, a unutarnji dio cijevi je većeg stupnja nepravilnosti u odnosu na vanjski. Geometrija i oblika zavara su puno bolji nego prije provlačenja.



Slika 47. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon provlačenja

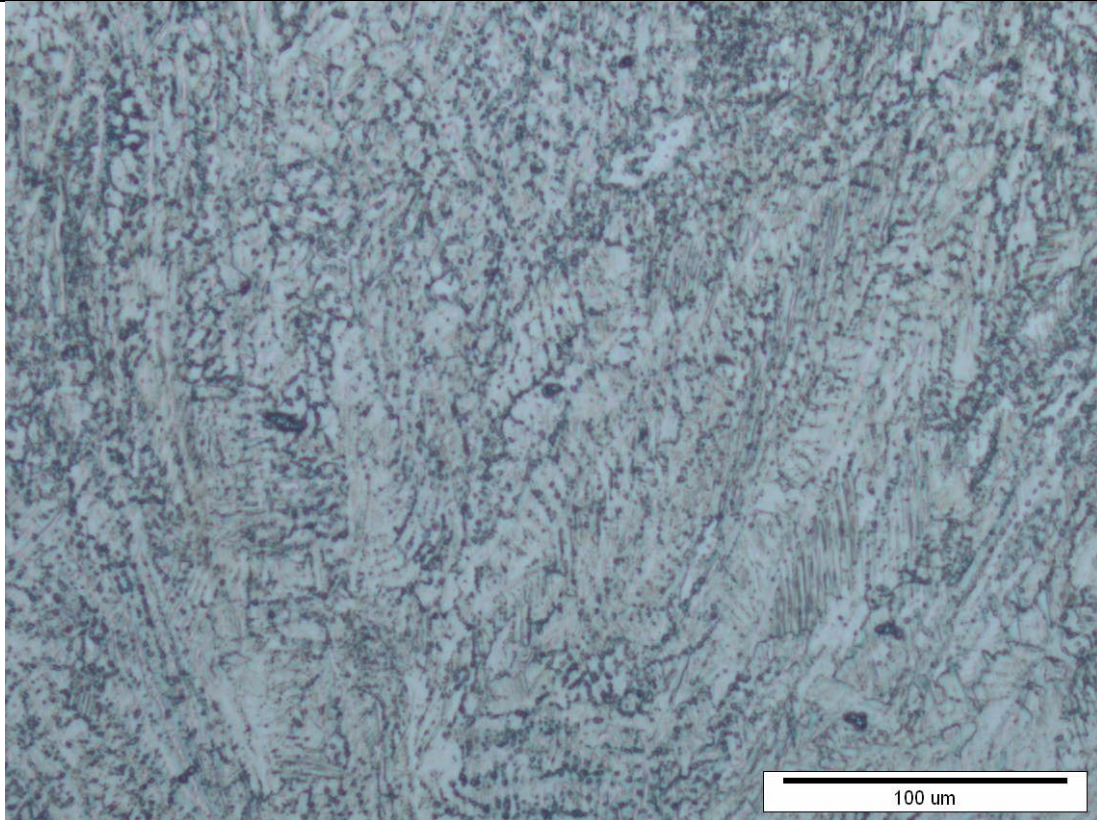
Na slici 48 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavara s desne strane, snimljena pri povećanju od 200×. Zbog hladne deformacije austenitna zrna osnovnog materijala i ZUT-a ugnječena su po cijelom presjeku cijevi, a osobito u njezinom vanjskom dijelu.



**Slika 48. Mikrostruktura ZUT-a nakon provlačenja**

Na slici 49 prikazana je mikrostruktura metala zavara snimljena pri povećanju 200× u sredini zavara. I ovdje su vidljive posljedice plastične deformacije.





**Slika 49. Mikrostruktura metala zavara nakon provlačenja**

#### 4.4.4. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja nakon toplinske obrade

Svrha rastvornog žarenja je homogenizacija mikrostrukture i smanjenje zaostalih naprezanja nastalih uslijed zavarivanja i provlačenja u hladnom stanju. Svi uzorci su žareni na temperaturi od 1050 °C, a brzina zagrijavanja, trajanje žarenja i brzina hlađenja ovisili su o brzini namatanja cijevi koja se mijenjala od 0,6 m/min do 1,2 m/min.

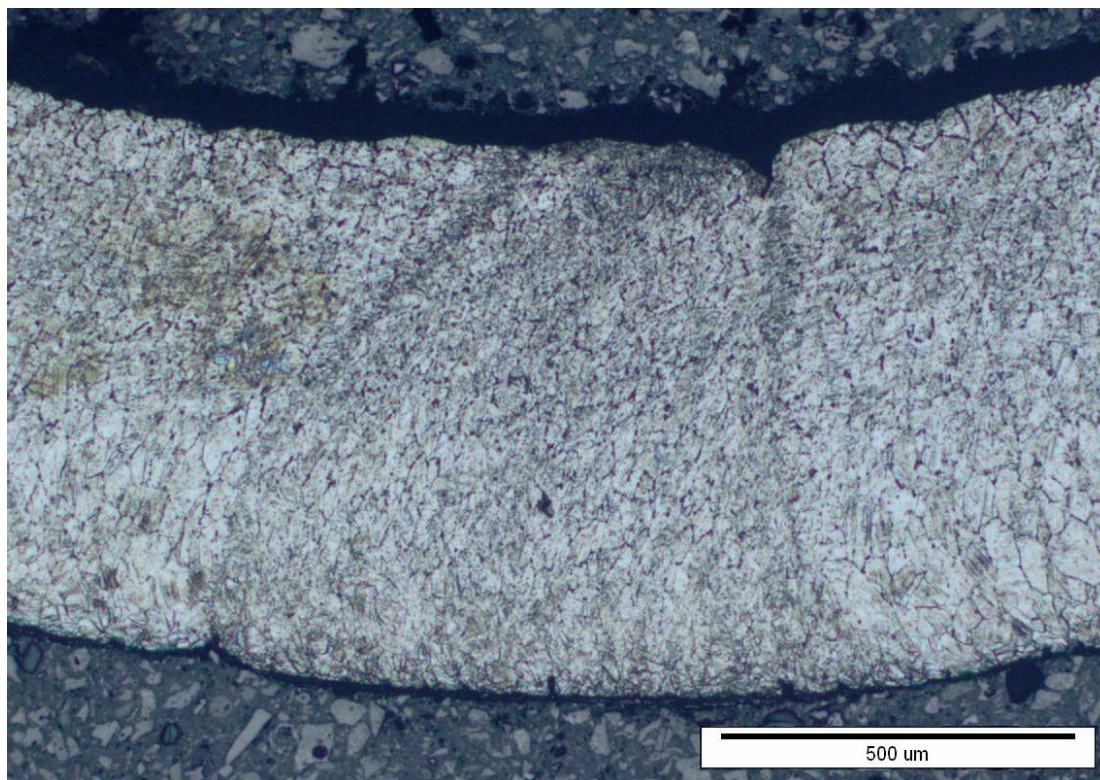
Svi uzorci su metalografski pripremani i nagrizeni u identičnim uvjetima.

##### Mikrostruktura zavarenog spoja za brzinu namatanja cijevi od 0,6 m/min

Na slici 50 prikazana je makrostruktura zavarenog spoja snimljena pri povećanju 50×. U odnosu na stanje prije toplinske obrade puno manje je izražena linija staljivanja, zona utjecaja topline te razlika između mikrostrukture metala zavara i osnovnog materijala, iako su identično nagrizeni. Usmjerenost mikrostrukture osnovnog materijala potpuno je nestala, a znatno je izmijenjena i dendritna mikrostruktura metala zavara. Austenitna zrna u osnovnom materijalu su izrazito krupna. Sve navedeno je posljedica dugog trajanja homogenizacijskog žarenja.

Na slici 51 vidi se isti zavareni spoj, snimljen pri većem povećanju.

Na slici 52 prikazana je mikrostruktura ZUT-a, a na slici 53 mikrostruktura metala zavara. Obje su snimljene pri povećanju 200×.



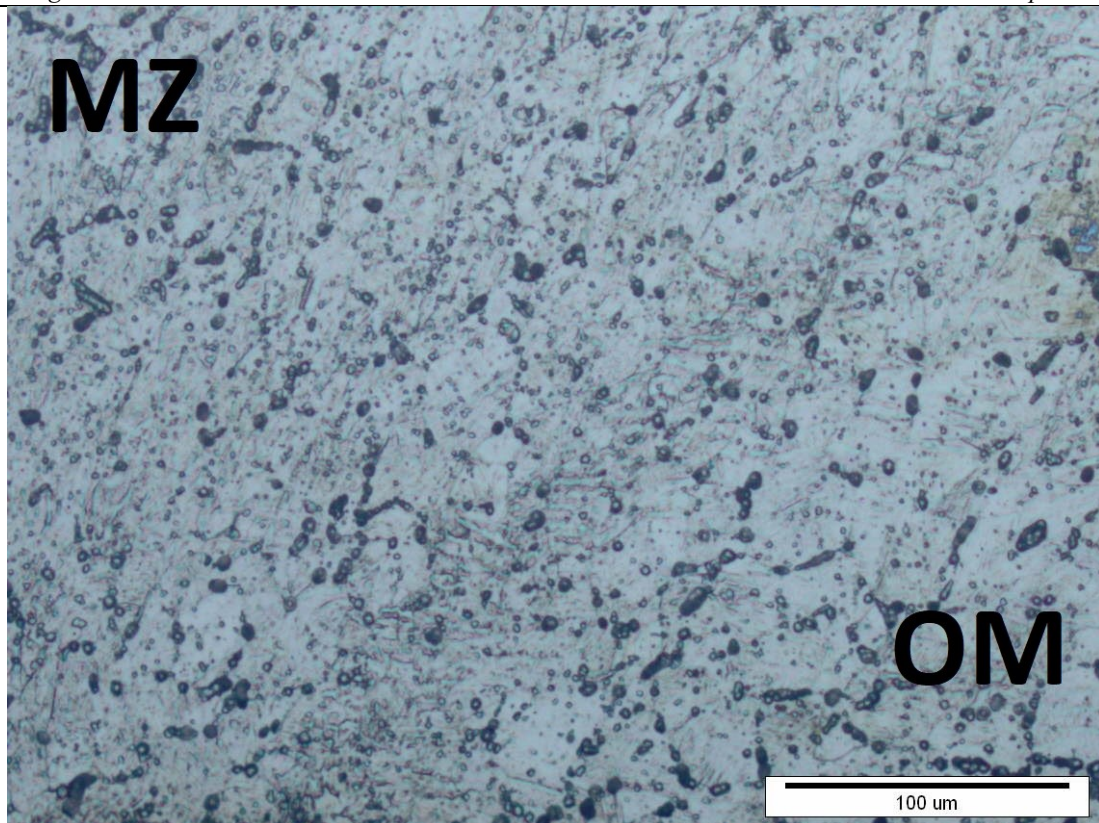
**Slika 50. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja;  $v=0,6$  m/min**



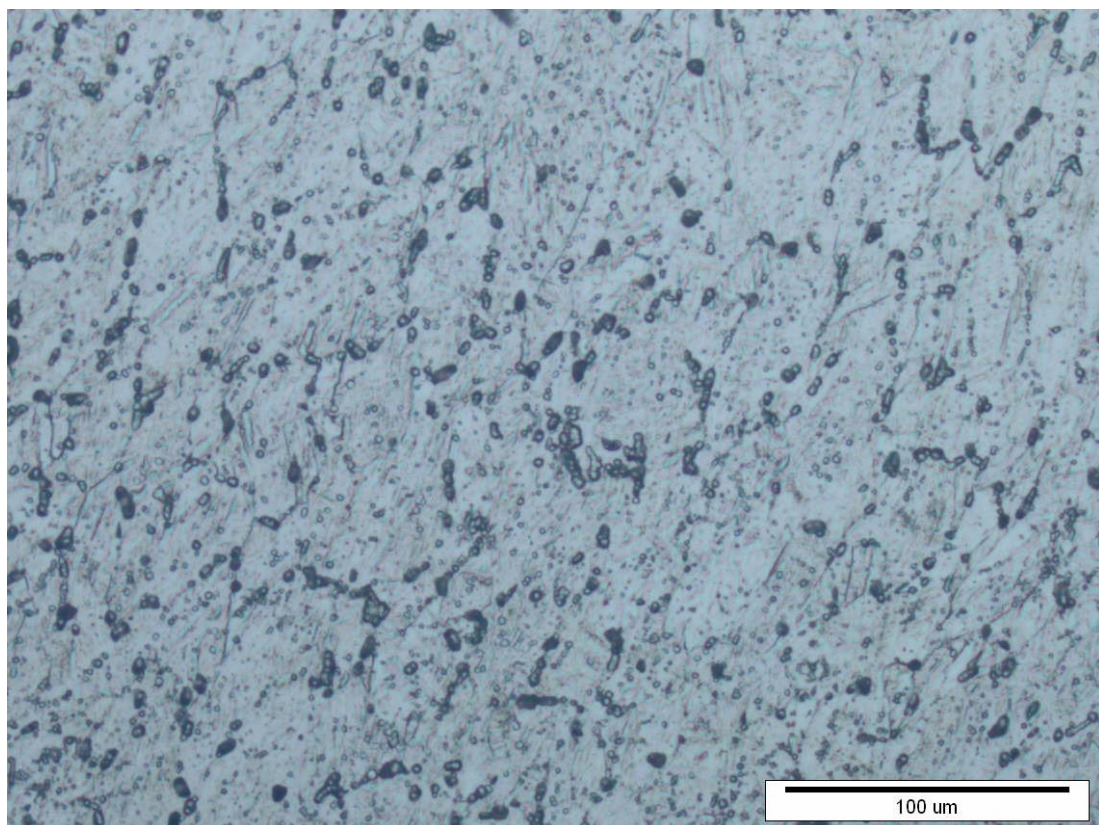


**Slika 51. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja;  $v=0,6$  m/min pri većem povećanju**





Slika 52. Mikrostruktura ZUT-a nakon rastvornog žarenja;  $v=0,6$  m/min



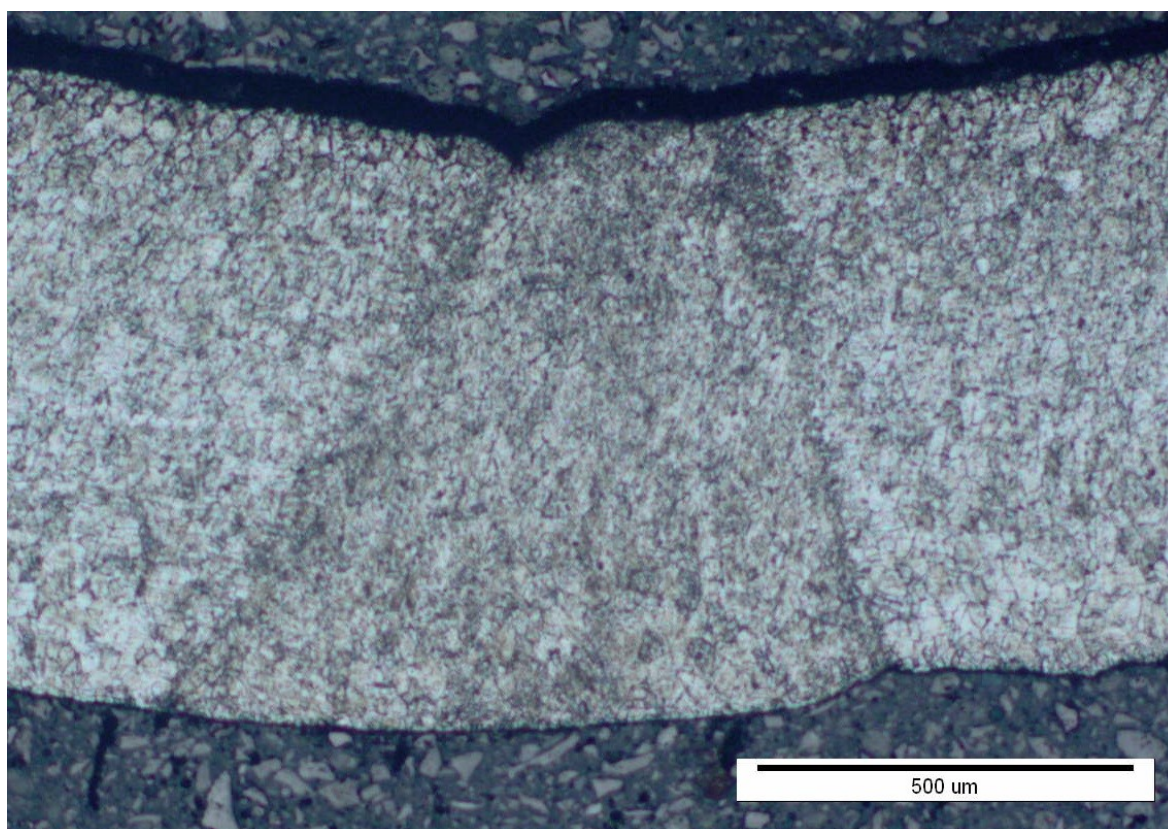
Slika 53. Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja;  $v=0,6$  m/min



Brzina namatanja od 0,85 m/min je brzina pri kojoj se trenutno obavlja toplinska obrada cijevi u pogonu.

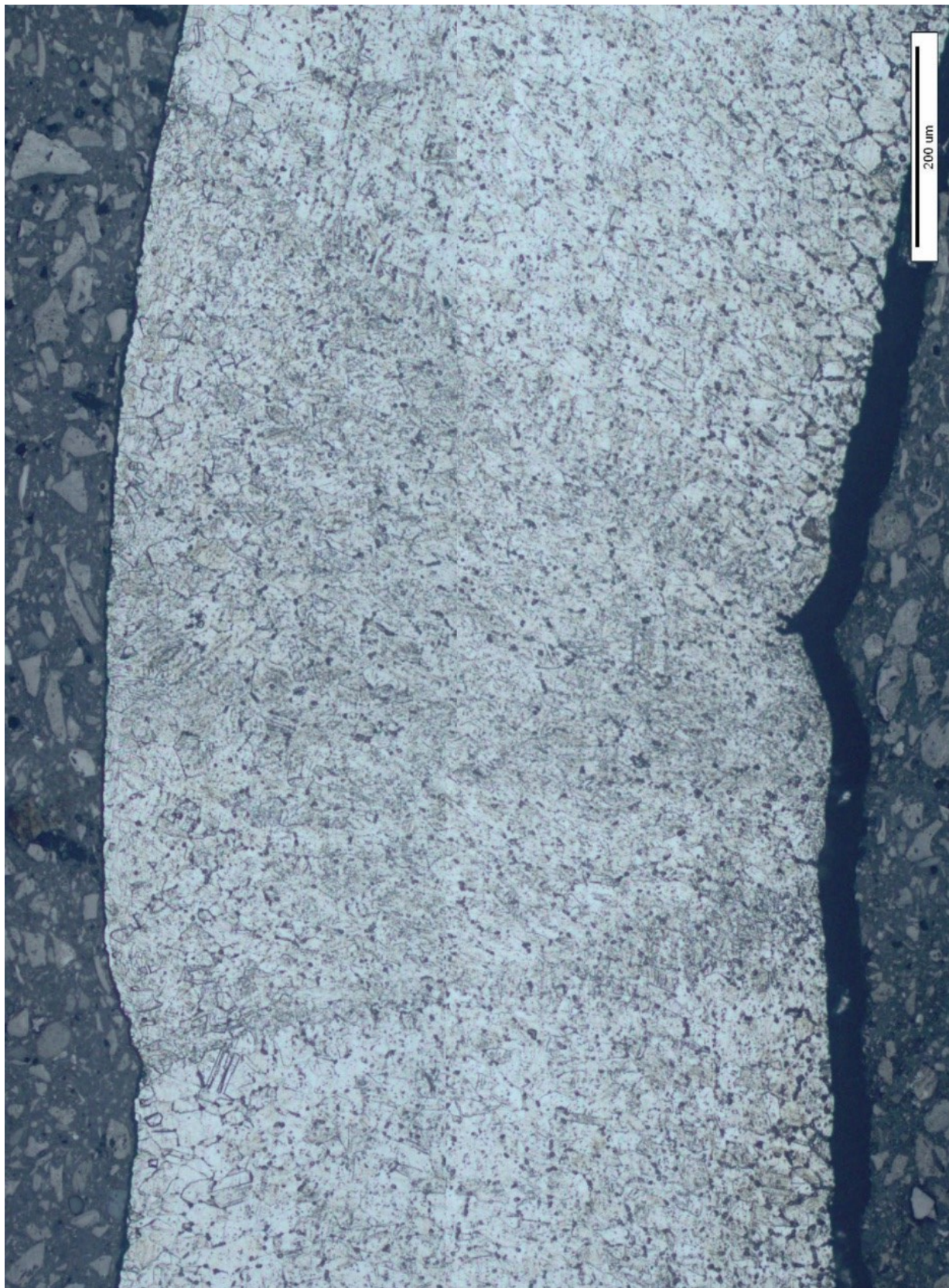
Na slici 54 vidi se makrostruktura zavarenog spoja snimljena pri povećanju 50×. I kod ovog uzorka manje je izražena linija staljivanja i zona utjecaja topline, a granice austenitnih zrna su slabije izražene, u odnosu na stanje nakon zavarivanja i provlačenja. To bi mogla biti posljedica smanjenja zaostalih naprezanja koja su nastala uslijed hladne deformacije. U odnosu na prethodni uzorak kod kojeg je brzina namatanja 0,6 m/min, ovaj uzorak ima sitnija austenitna zrna u osnovnom materijalu. Razlog tome vjerojatno je kraće zadržavanje na temperaturi žarenja, s obzirom da je brzina namatanja veća. Također, u odnosu na prethodi, ovaj uzorak ima malo jasnije izraženu zonu utjecaja topline. Na slici 55 vidi se isti zavareni spoj, snimljen pri većem povećanju.

Na slici 56 prikazana je mikrostruktura ZUT-a, a na slici 57 mikrostruktura metala zavara. Obje su snimljene pri povećanju 200×.



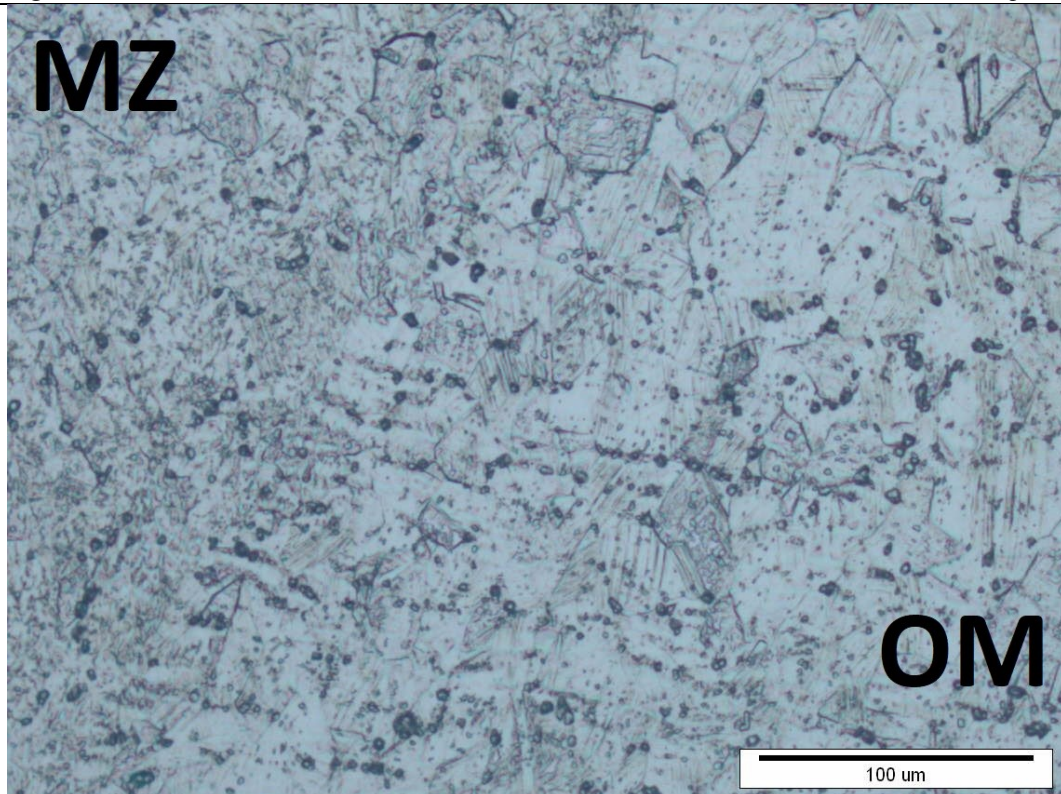
**Slika 54. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja;  $v=0,85$  m/min**



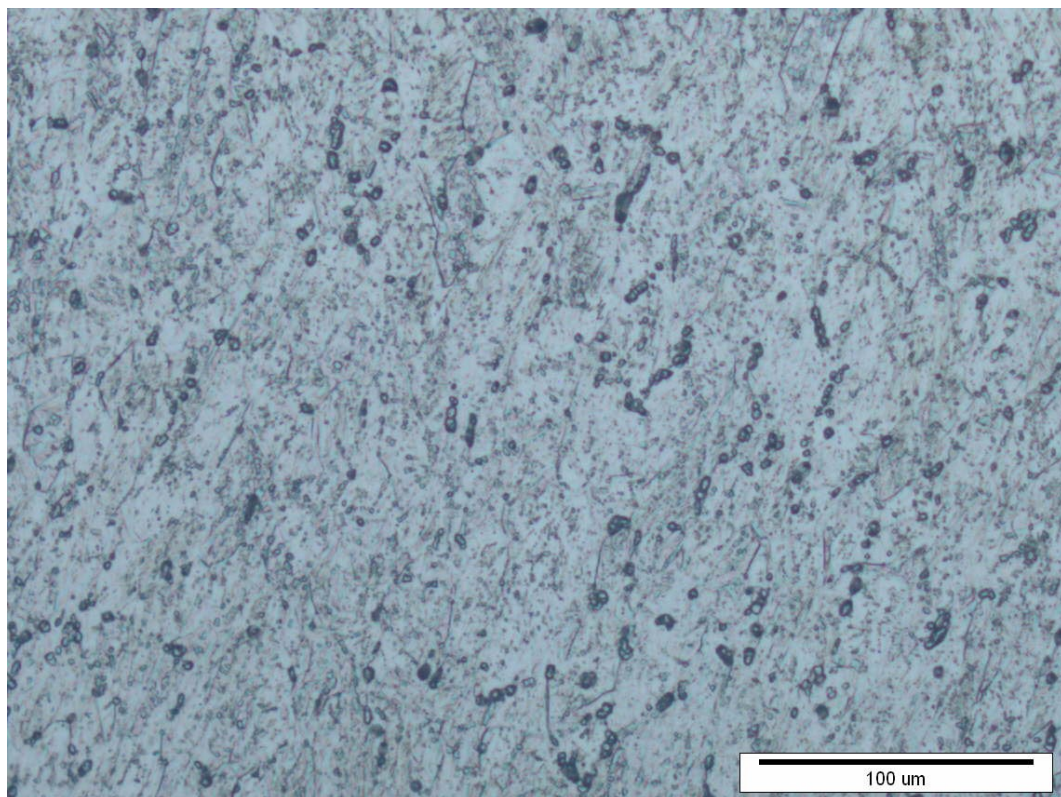


**Slika 55. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja;  $v=0,85$  m/min pri većem povećanju**





Slika 56. Mikrostruktura ZUT-a nakon rastvornog žarenja;  $v=0,85$  m/min



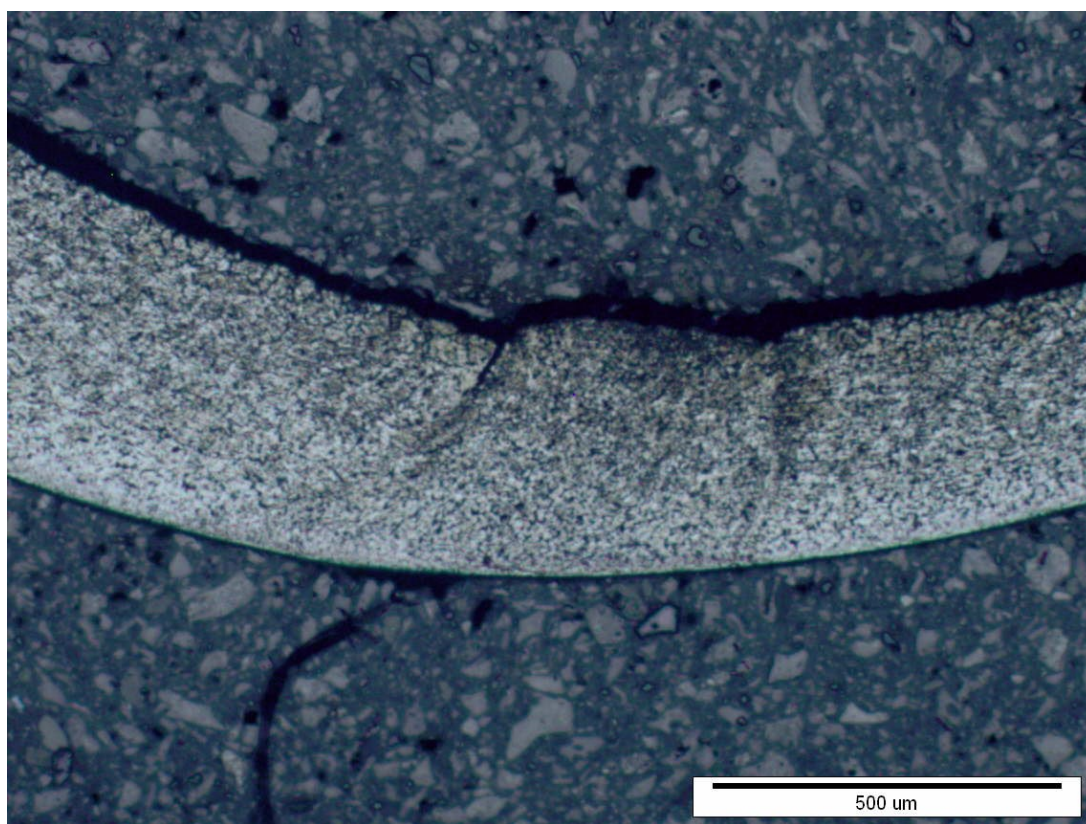
Slika 57. Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja;  $v=0,85$  m/min



Mikrostruktura zavarenog spoja za brzinu namatanja cijevi od 0,90 m/min

Na slici 58 prikazan je zavareni spoj uzorka kod kojeg je brzina namatanja cijevi iznosila 0,90 m/min, snimljen pri povećanju 50×. Oblik zavara je potpuno nepravilan, a stijenka cijevi je puno tanja od debljine početnog lima. Do ovih grešaka došlo je vrlo vjerojatno u fazi kalibriranja cijevi.

Zbog velikog stupnja ugnječenja kojemu je materijal bio izložen, nije moguće usporediti mikrostrukturu ovog uzorka sa ostalim uzorcima.



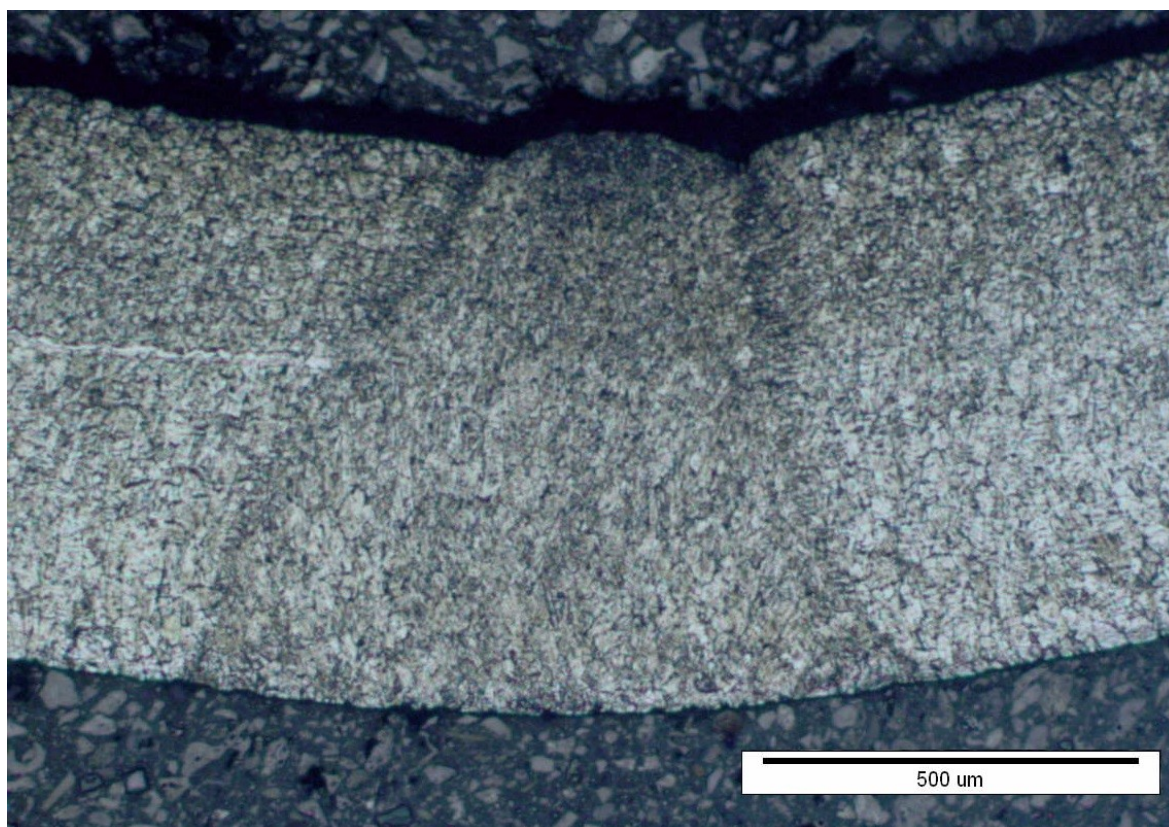
**Slika 58. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja  $v=0,9$  m/min**

Mikrostruktura zavarenog spoja za brzinu namatanja cijevi od 1,00 m/min

Na slici 59 prikazana je makrostruktura zavarenog spoja snimljena pri povećanju 50×. U odnosu na uzorak s brzinom namatanja 0,85 m/min, ovaj uzorak ima jače izraženu liniju staljivanja i zonu utjecaja topline. Uzrok tome mogao bi biti kraće zadržavanje na temperaturi žarenja s obzirom na veću brzinu namatanja.

Na slici 60 vidi se isti zavareni spoj, snimljen pri većem povećanju.

Na slici 61 prikazana je mikrostruktura ZUT-a, a na slici 62 mikrostruktura metala zavara. Obje su snimljene pri povećanju 200×.



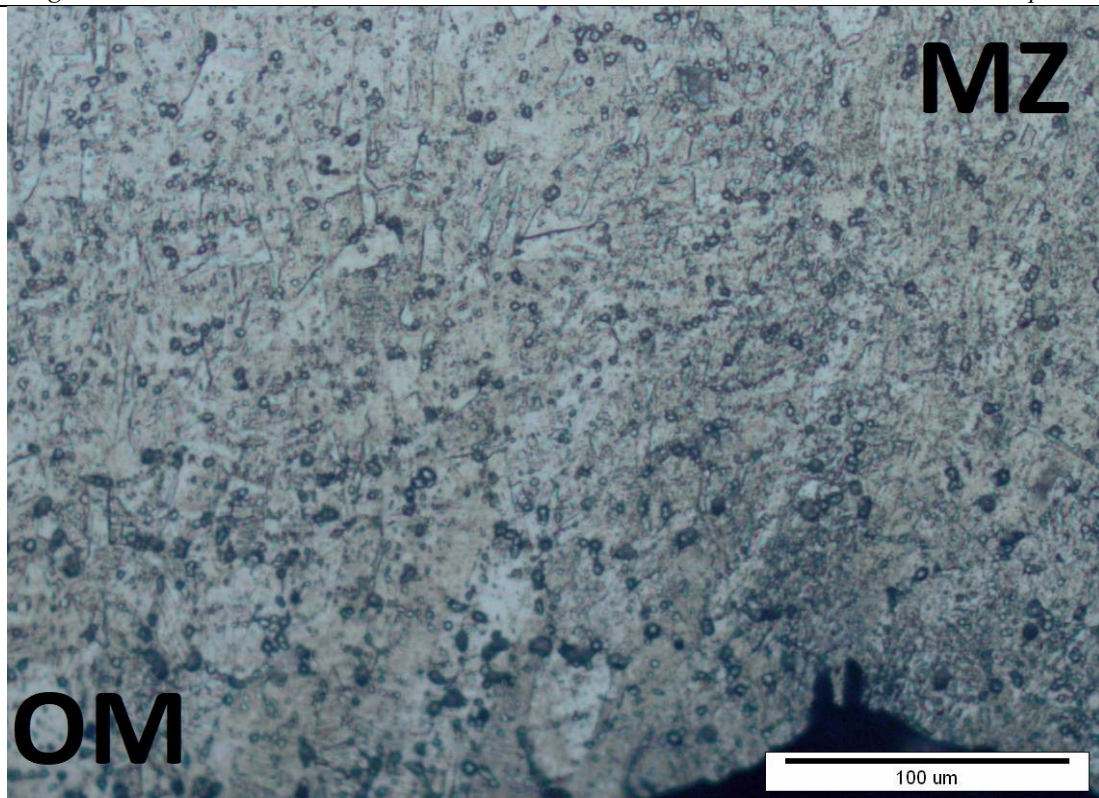
**Slika 59. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja;  $v=1,00$  m/min**



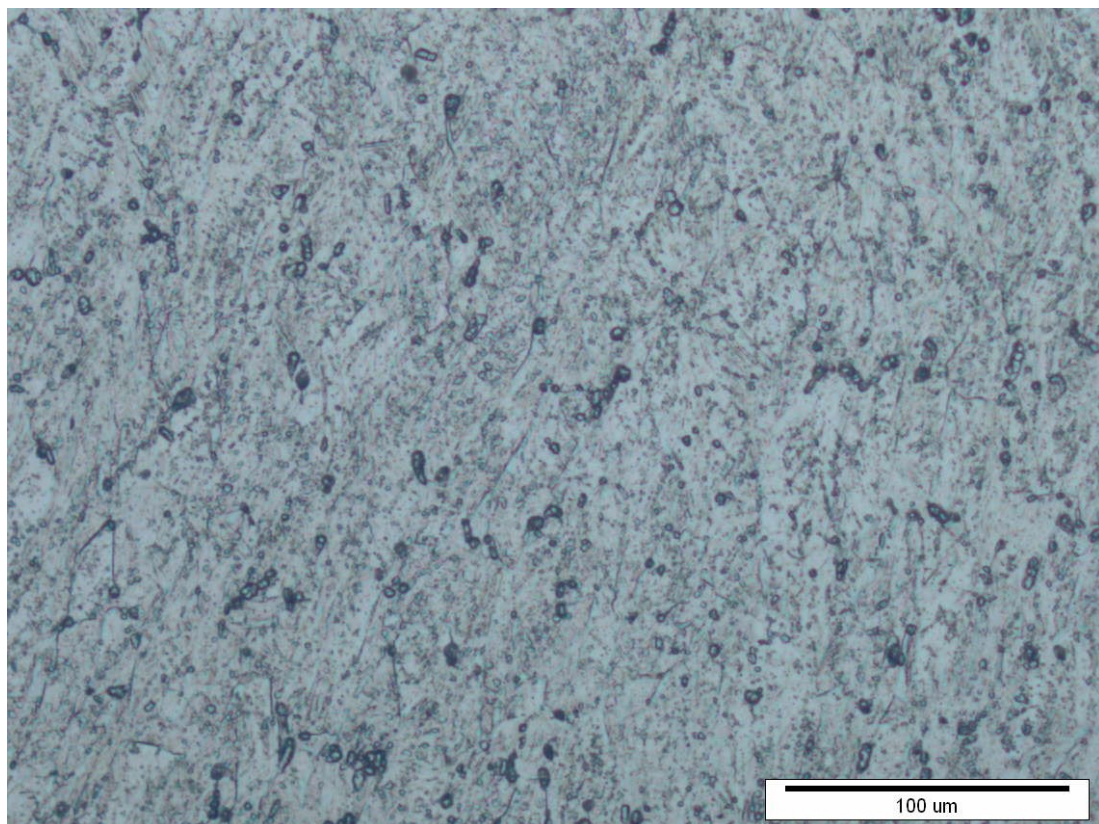


**Slika 60. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja;  $v=1,00$  m/min pri većem povećanju**





Slika 61. Mikrostruktura ZUT-a nakon rastvornog žarenja; v=1,00 m/min



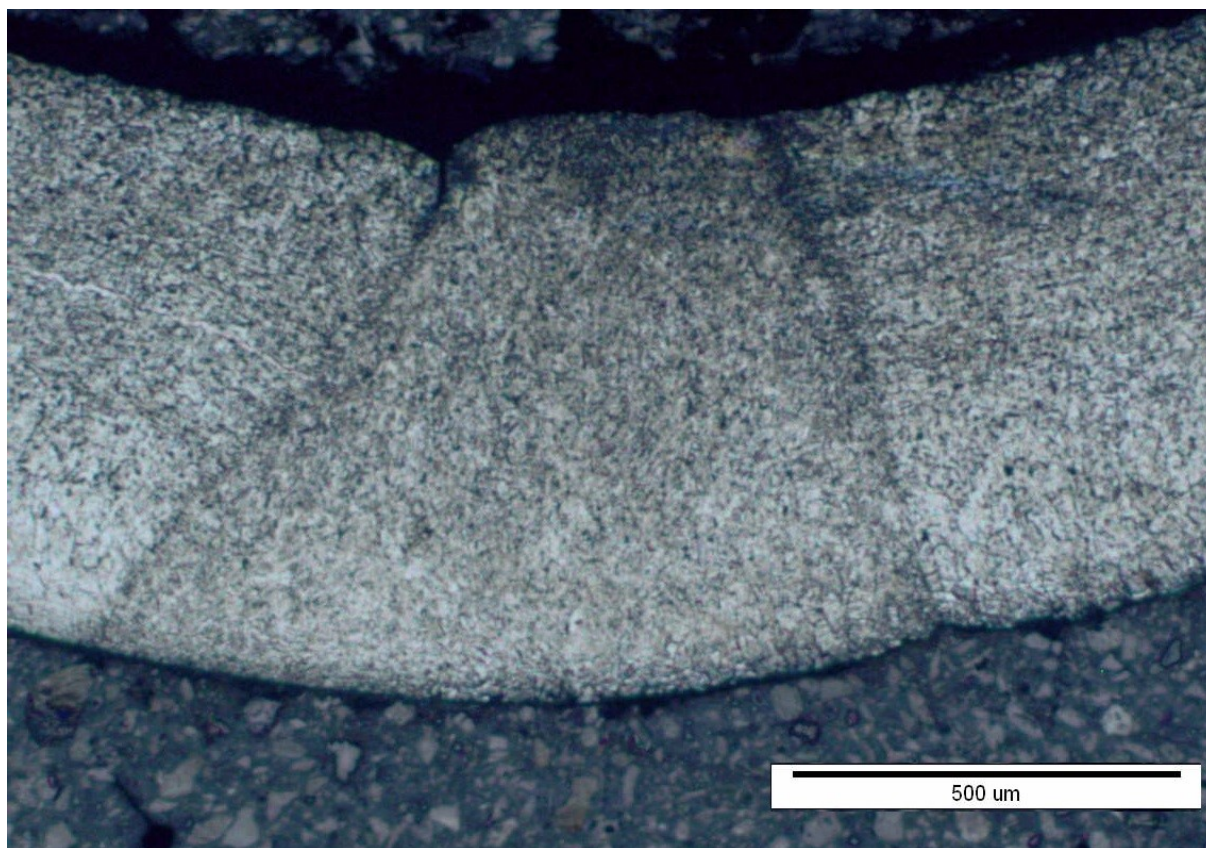
Slika 62. Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja; v=1,00 m/min



Mikrostruktura zavarenog spoja za brzinu namatanja cijevi od 1,10 m/min

Kod ovog uzorka, brzina namatanja cijevi povećala se u odnosu na prethodni uzorak, a to znači da je vrijeme žarenja i homogenizacije mikrostrukture bilo kraće. Posljedica toga je izraženija zona utjecaja topline i linija staljivanja. Makrostruktura zavarenog spoja snimljena pri povećanju 50× vidi se na slici 63, a na slici 64 prikazan je isti zavareni spoj snimljen pri većem povećanju.

Na slici 65 prikazana je mikrostruktura ZUT-a, a na slici 66 mikrostruktura metala zavara. Obje su snimljene pri povećanju 200×.



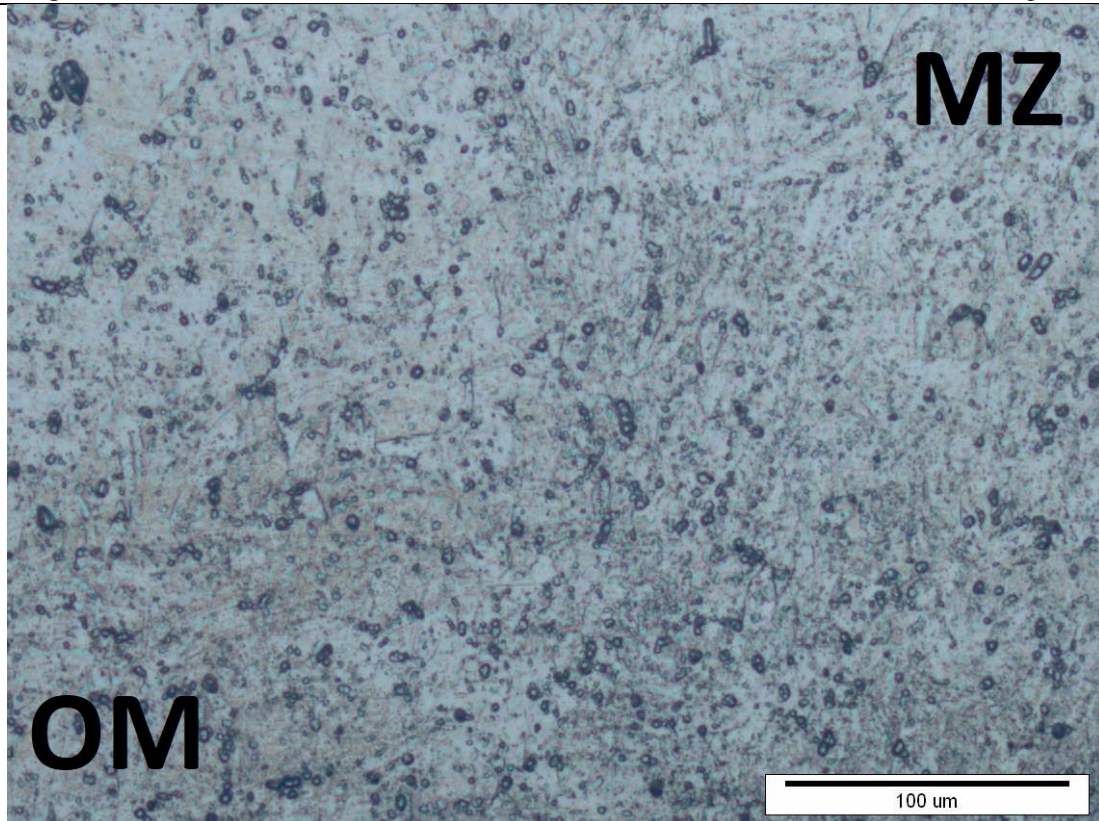
**Slika 63. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja;  $v=1,10$  m/min**



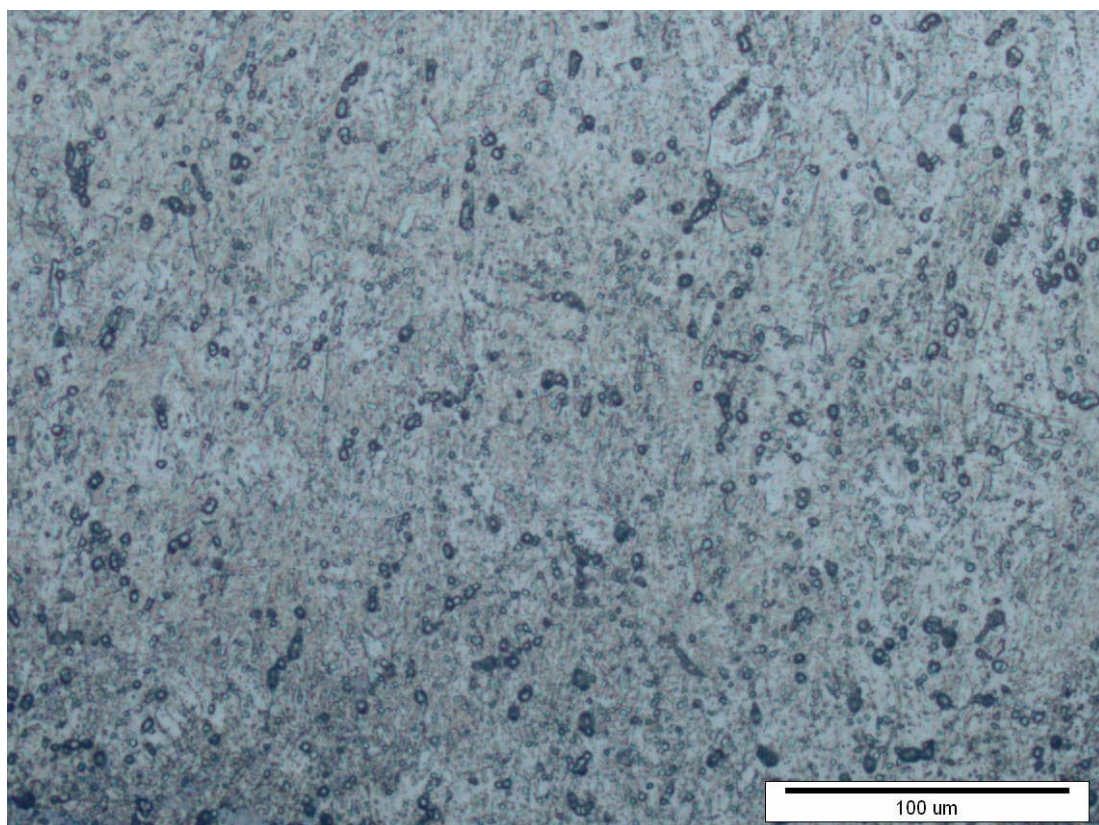


**Slika 64. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja;  $v=1,10$  m/min pri većem povećanju**





Slika 65. Mikrostruktura ZUT-a nakon rastvornog žarenja;  $v=1,10$  m/min



Slika 66. Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja;  $v=1,10$  m/min

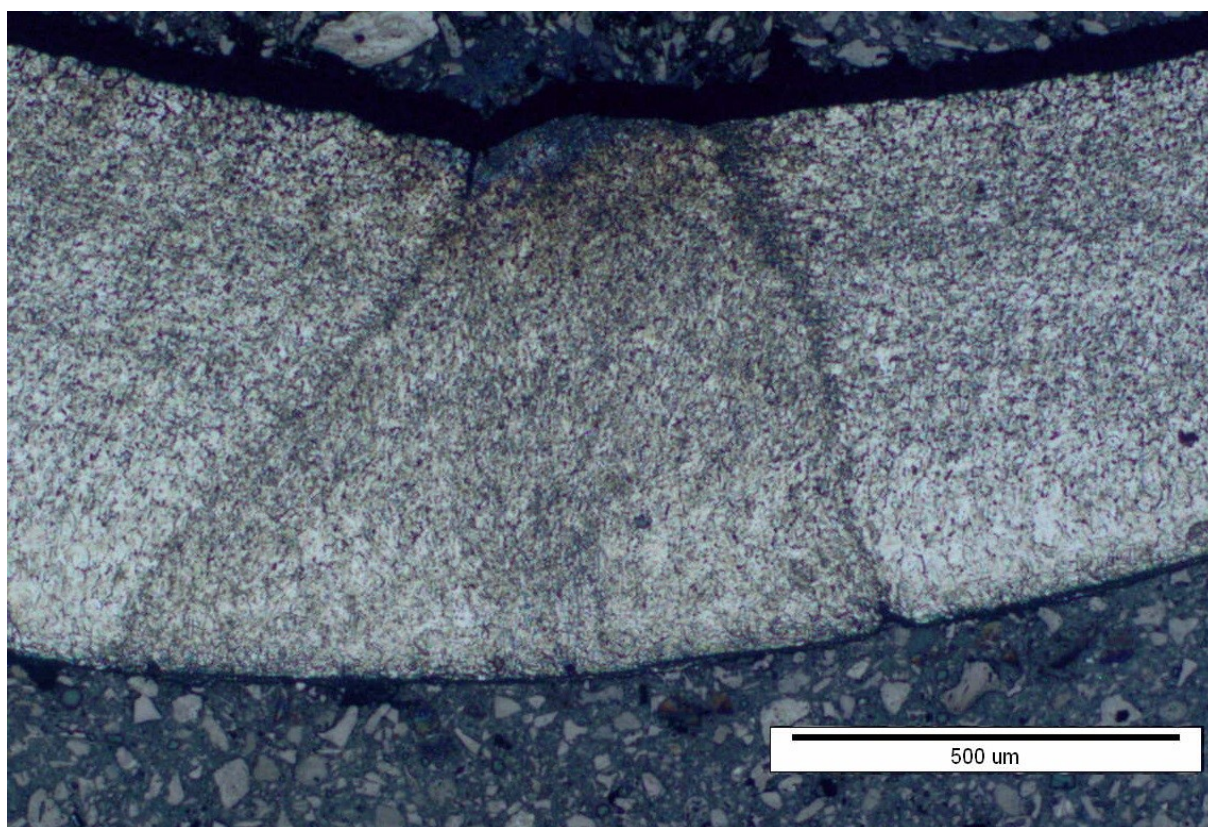


Mikrostruktura zavarenog spoja za brzinu namatanja cijevi od 1,20 m/min

Na slici 67 prikazana je makrostruktura zavarenog spoja uzorka cijevi kod koje je brzina namatanja pri toplinskoj obradi bila najveća, odnosno kod koje je vrijeme žarenja i homogenizacije mikrostrukture bilo najkraće. Zato je u odnosu na prethodne uzorke linija staljivanja i zona utjecaja topline, kao i razlika između mikrostrukture metala zavara i osnovnog materijala, puno jače izražena. U određenoj mjeri očuvana je usmjerenost mikrostrukture osnovnog materijala i metala zavara.

Na slici 68 vidi se mikrostruktura istog zavarenog spoj snimljena pri većem povećanju.

Na slici 69 prikazana je mikrostruktura ZUT-a, a na slici 70 mikrostruktura metala zavara. Obje su snimljene pri povećanju 200×.



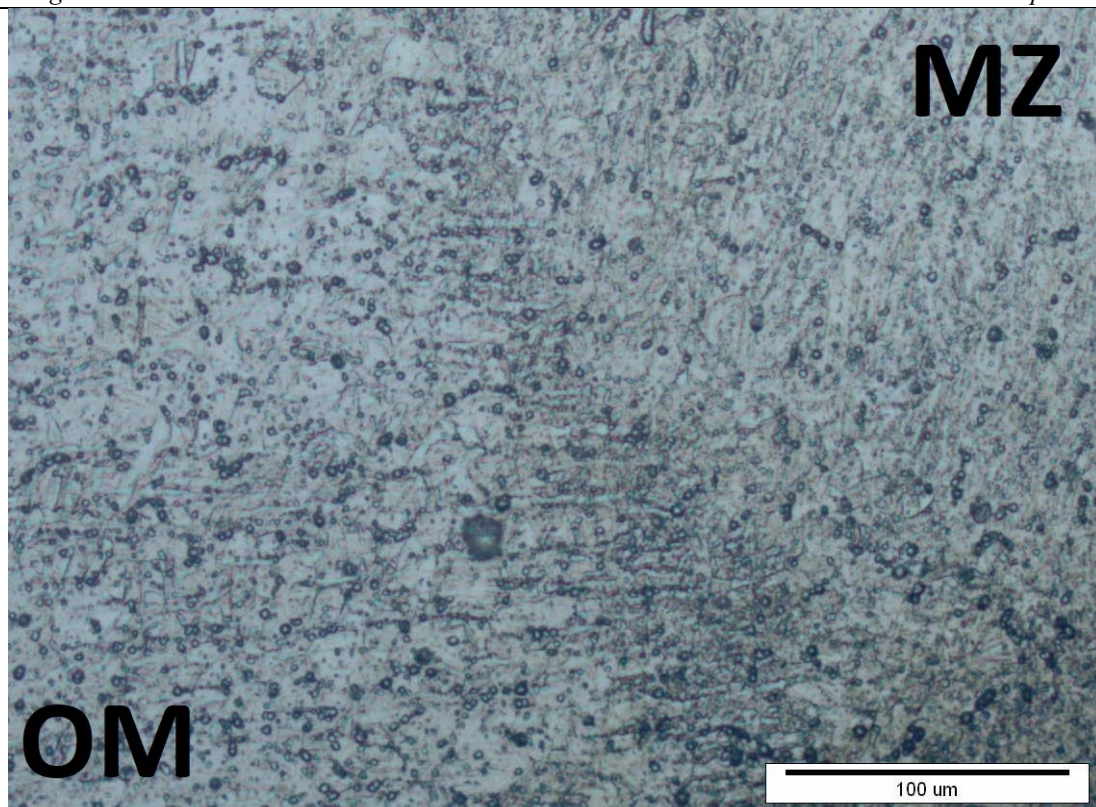
**Slika 67. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja;  $v=1,20$  m/min**



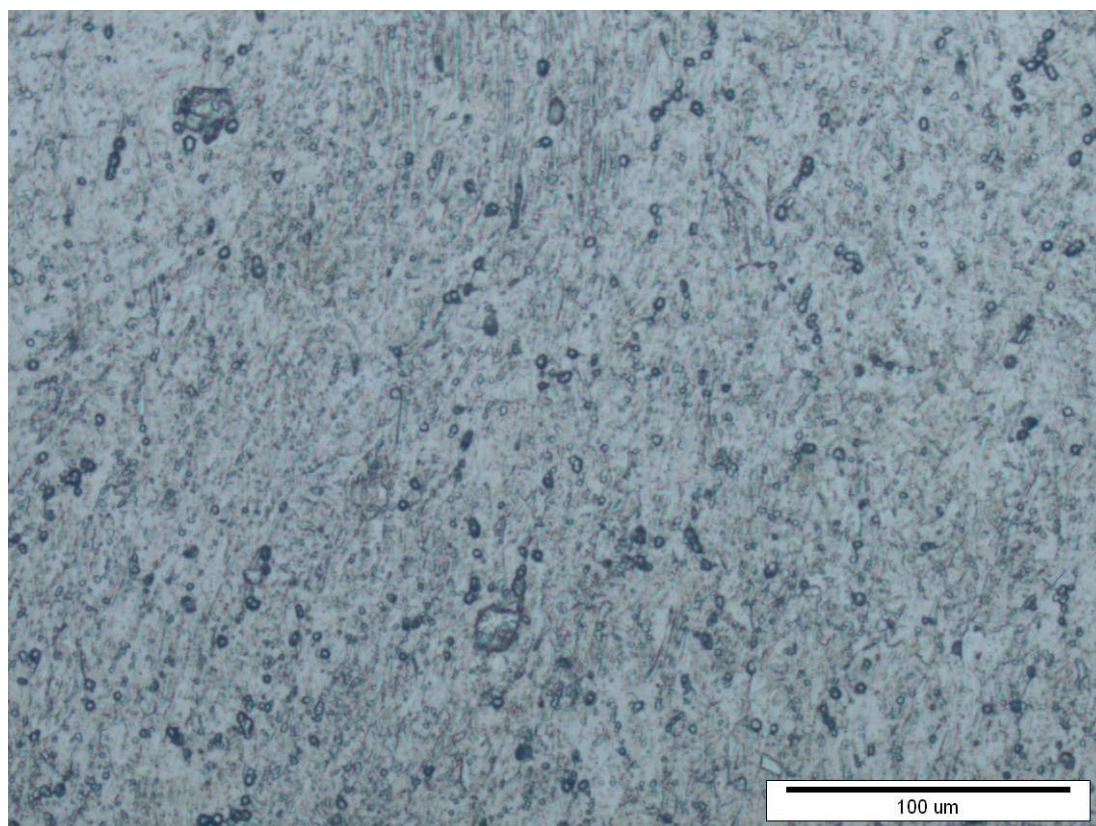


**Slika 68. Mikrostruktura zavarenog spoja nakon rastvornog žarenja;  $v=1,20$  m/min pri većem povećanju**





Slika 69. Mikrostruktura ZUT-a nakon rastvornog žarenja;  $v=1,20$  m/min



Slika 70. Mikrostruktura metala zavara nakon rastvornog žarenja;  $v=1,20$  m/min

#### 4.5. Kvantitativna analiza mikrostrukture zavarenog spoja – mjerenje tvrdoće HV 0,1

Mjerenje mikrotvrdoće provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje na mikrotvrdomjeru PMT3 metodom po Vickersu uz opterećenje od 0,9 N (HV 0,1).

Promjene u mikrostrukтури materijala uvijek se odražavaju na svojstva materijala. Za potrebe ovog rada, mjerenjem mikrotvrdoće kvantificirale su se promjene u mikrostrukтури nastale uslijed zavarivanja i kalibriranja, te posebice uslijed toplinske obrade pri različitim brzinama prolaska cijevi kroz peć. Mikrotvrdoća je mjerena na polaznom limu i na zavarenim spojevima cijevi u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara. Po tri mjerenja napravljena su na svakoj navedenoj poziciji u tjemenu, sredini i korijenu zavara. U tablicama od 12 do 20 prikazane su pojedinačne vrijednosti izmjerenih mikrotvrdoća te srednje vrijednosti svih pozicija.

Na slici 71 je prikazan uređaj za mjerenje mikrotvrdoće.



Slika 71. Mikrotvrdomjer PMT3

Tablica 12. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće lima (HV 0,1)

POZICIJA		mjerenje			aritmetička sredina
		1	2	3	
LIM	sredina	213	216	203	<b>211</b>



**Tablica 13. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon zavarivanja**

POZICIJA		mjerenje			aritmetička sredina
		1	2	3	
OM	sredina	287	283	297	<b>289</b>
ZUT	tjeme	327	270	232	<b>276</b>
	sredina	279	287	232	<b>266</b>
	korijen	394	394	383	<b>390</b>
METAL ZAVARA	tjeme	283	270	279	<b>277</b>
	sredina	242	270	345	<b>286</b>
	korijen	268	258	268	<b>265</b>

**Tablica 14. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon kalibriranja**

POZICIJA		mjerenje			aritmetička sredina
		1	2	3	
OM	sredina	287	354	401	<b>347</b>
ZUT	tjeme	345	327	363	<b>345</b>
	sredina	297	287	270	<b>285</b>
	korijen	417	383	394	<b>398</b>
METAL ZAVARA	tjeme	360	311	360	<b>344</b>
	sredina	302	309	279	<b>297</b>
	korijen	401	383	383	<b>389</b>

**Tablica 15. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 0,60 m/min**

POZICIJA		mjerenje			aritmetička sredina
		1	2	3	
OM	sredina	317	373	373	<b>354</b>
ZUT	tjeme	325	360	360	<b>348</b>
	sredina	425	450	373	<b>416</b>
	korijen	437	417	394	<b>416</b>
METAL ZAVARA	tjeme	370	345	370	<b>362</b>
	sredina	437	413	401	<b>417</b>
	korijen	363	437	425	<b>408</b>

**Tablica 16. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 0,85 m/min**

POZICIJA		mjerenje			aritmetička sredina
		1	2	3	
OM	sredina	302	309	309	<b>307</b>
	tjeme	333	317	327	<b>326</b>
ZUT	sredina	283	317	270	<b>290</b>
	korijen	327	425	373	<b>375</b>
	tjeme	283	297	309	<b>296</b>
METAL ZAVARA	sredina	258	333	258	<b>283</b>
	korijen	394	345	360	<b>366</b>

**Tablica 17. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 0,90 m/min**

POZICIJA		mjerenje			aritmetička sredina
		1	2	3	
OM	sredina	283	287	287	<b>286</b>
	tjeme	270	270	276	<b>272</b>
ZUT	sredina	309	302	283	<b>298</b>
	korijen	297	354	302	<b>318</b>
	tjeme	242	232	227	<b>234</b>
METAL ZAVARA	sredina	287	297	283	<b>289</b>
	korijen	330	317	283	<b>310</b>

**Tablica 18. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 1,00 m/min**

POZICIJA		mjerenje			aritmetička sredina
		1	2	3	
OM	sredina	276	264	283	<b>274</b>
	tjeme	317	270	253	<b>280</b>
ZUT	sredina	317	297	290	<b>301</b>
	korijen	363	327	317	<b>336</b>
	tjeme	270	294	283	<b>282</b>
METAL ZAVARA	sredina	287	276	317	<b>293</b>
	korijen	317	309	297	<b>308</b>

**Tablica 19. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 1,10 m/min**

POZICIJA		mjerenje			aritmetička sredina
		1	2	3	
OM	sredina	351	370	336	<b>352</b>
ZUT	tjeme	425	383	413	<b>407</b>
	sredina	373	348	311	<b>344</b>
	korijen	317	360	390	<b>356</b>
METAL ZAVARA	tjeme	437	437	401	<b>425</b>
	sredina	360	336	345	<b>347</b>
	korijen	370	437	413	<b>407</b>

**Tablica 20. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće (HV 0,1) zavarenog spoja nakon toplinske obrade uz brzinu namatanja cijevi od 1,20 m/min**

POZICIJA		mjerenje			aritmetička sredina
		1	2	3	
OM	sredina	383	437	425	<b>415</b>
ZUT	tjeme	413	401	425	<b>413</b>
	sredina	336	390	363	<b>363</b>
	korijen	336	360	370	<b>355</b>
METAL ZAVARA	tjeme	468	454	493	<b>472</b>
	sredina	304	333	333	<b>323</b>
	korijen	454	441	376	<b>424</b>



#### 4.6. Ispitivanje cijevi savijanjem

Ispitivanje cijevi savijanjem provedeno je u poduzeću „Oprema d.d. Ludbreg“. S obzirom da se većina ovako proizvedenih cijevi koristi za proizvode koji se savijanjem pod kutom od 90 ° oblikuju u zavojnice, na ispitnim uzorcima također je provedeno ispitivanje na savijanje. Zavojnice se savijaju na stroju s automatskim pomicanjem cijevi i automatskim hidrauličkim zakretanjem. S obzirom na nemogućnost ispitivanja savijanja direktno na navedenom stroju, ispitivanja uzoraka provedena su na napravi na kojoj se savijanje obavlja ručno. Naprava se sastoji od postolja, hidrauličkog cilindra, rolice te ručne poluge. Završetak ručne poluge ima kružni nastavak unutar kojeg naližeže cijev te se bez vanjske mehaničke deformacije savija ručnom silom. Rolica ima ulogu vođenja cijevi tokom savijanja, dok cilindar pridržava cijev u nepomičnom položaju.

Na slici 72 prikazane su cijevi oblikovane u zavojnice, na slici 73 prikazana je naprava na kojoj su ispitani uzorci na savijanje.



Slika 72. Primjer proizvoda od cijevi



Slika 73. Naprava za ručno savijanje cijevi

Tijekom savojnog ispitivanja uzoraka nastojalo se da uvjeti ispitivanja budu što sličniji uvjetima koji vladaju pri automatiziranom savijanju cijevi. Pri postavljanju cijevi u prihvat, pažnja je usredotočena na položaj zavora koji je uvijek bio na vrhu cijevi. Na taj način jedan dio zavarenog spoja bio je pri savijanju opterećen vlačno, a drugi dio tlačno. Mjerena je maksimalna sila potrebna za savijanje pod kutom od  $90^\circ$ . Za svaki uzorak ispitane su po tri cijevi duljine 400 mm.

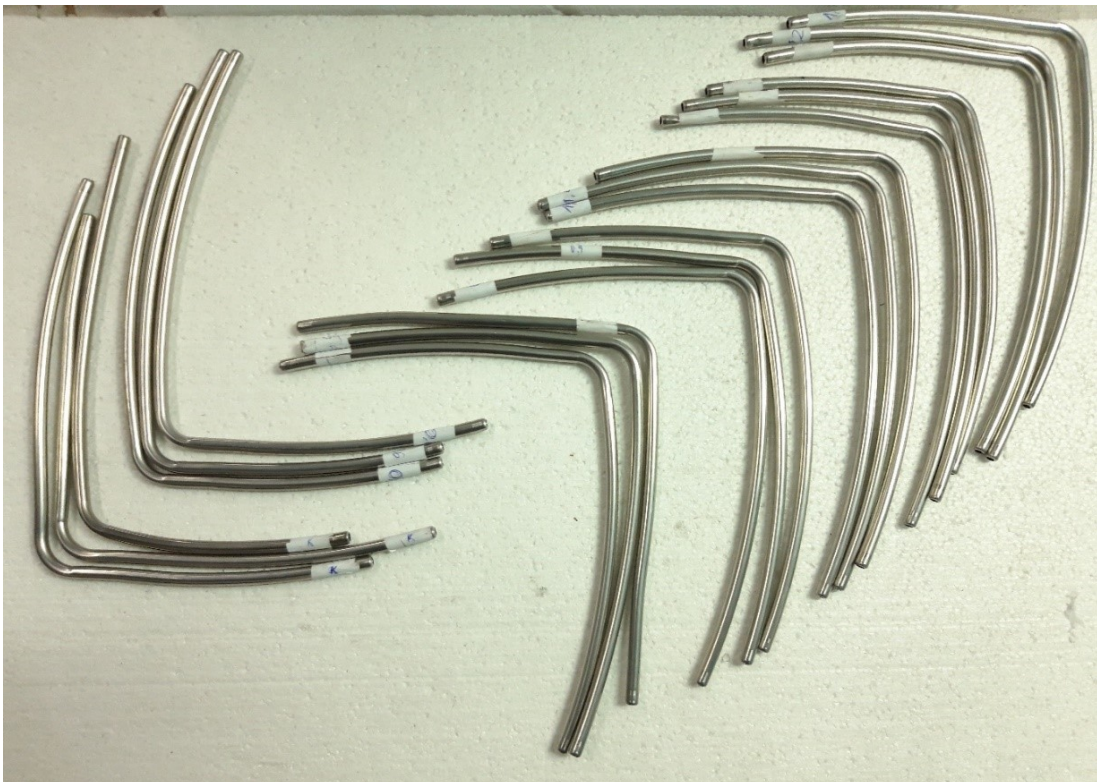
Na slici 74 prikazani su uzorci za ispitivanje prije savijanja, a na slici 75 uzorci nakon provedenog ispitivanja. Uzorci cijevi prije savijanja blago su zakrivljeni jer su izrezani iz namotanog koluta.

U tablici 21 prikazani su rezultati dobiveni pri ispitivanju.





**Slika 74. Uzorci za ispitivanje prije savijanja**



**Slika 75. Uzorci nakon ispitivanja savijanjem**



Tablica 21. Izmjerene vrijednosti kod savijanja

UZORAK	MJERENJE	SILA, N	
			srednja vr.
NAKON ZAVARIVANJA I KALIBRIRANJA	1	164,50	<b>167,33</b>
	2	169,00	
	3	168,50	
NAKON ŽARENJA $v = 0,60$ m/min	1	94,75	<b>94,48</b>
	2	91,95	
	3	96,85	
NAKON ŽARENJA $v = 0,85$ m/min	1	90,15	<b>87,27</b>
	2	88,25	
	3	83,40	
NAKON ŽARENJA $v = 0,90$ m/min	1	88,15	<b>90,58</b>
	2	93,50	
	3	90,10	
NAKON ŽARENJA $v = 1,00$ m/min	1	90,90	<b>89,70</b>
	2	88,25	
	3	89,95	
NAKON ŽARENJA $v = 1,10$ m/min	1	96,30	<b>95,45</b>
	2	95,35	
	3	94,70	
NAKON ŽARENJA $v = 1,20$ m/min	1	101,50	<b>99,73</b>
	2	96,70	
	3	101,10	

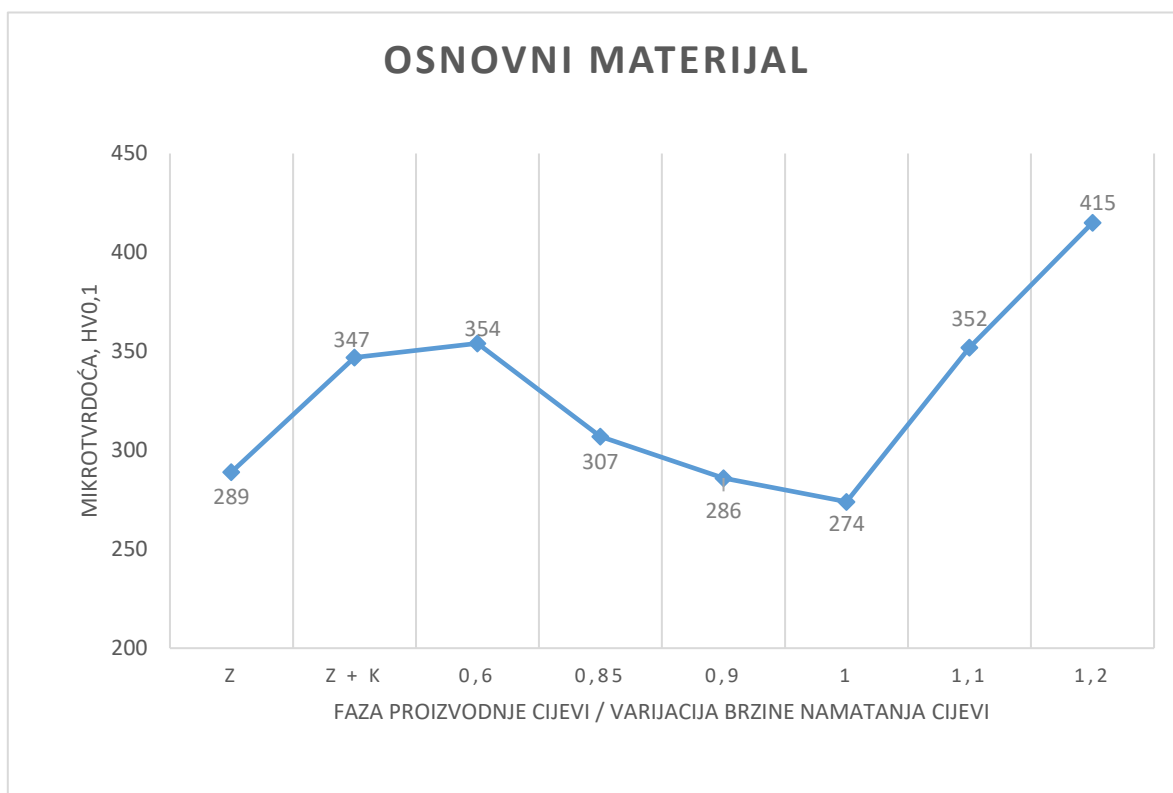
Vizualnim pregledom nisu uočene nikakve pukotine niti druge nepravilnosti na mjestu savijanja cijevi, kako s vlačno tako i s tlačno napregnute strane zavara.

## 5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

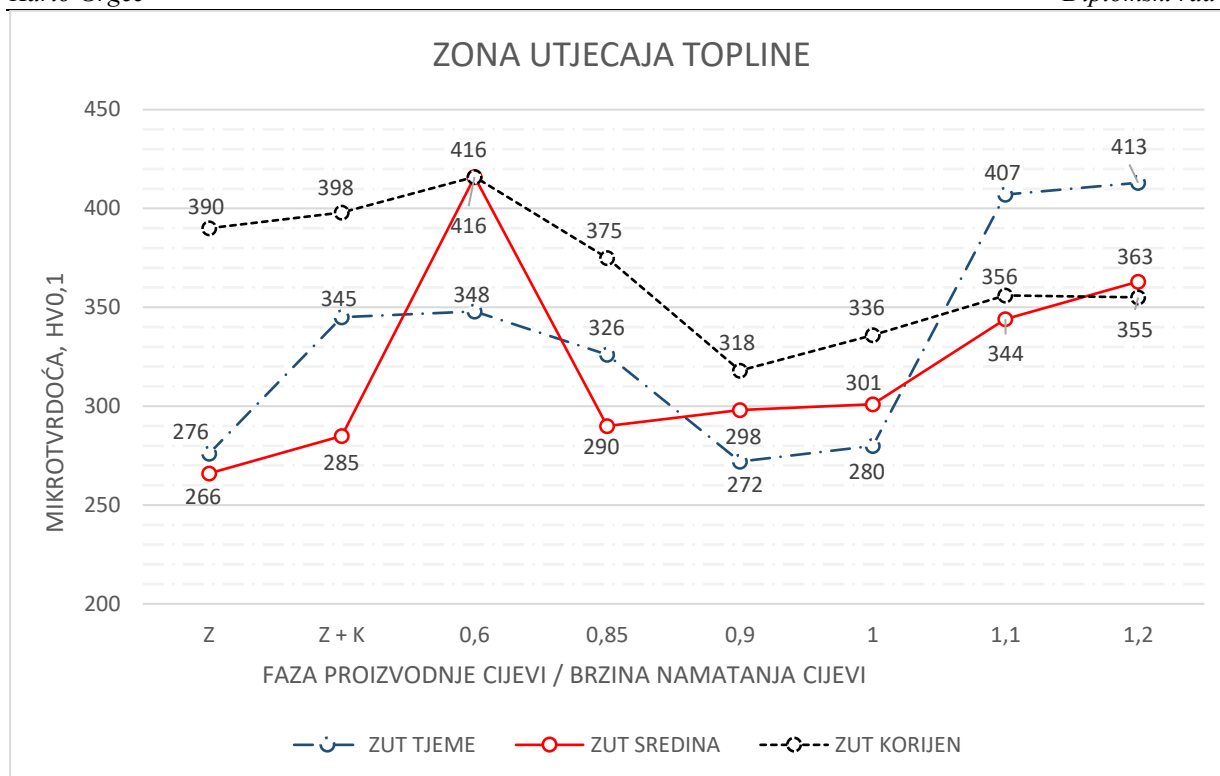
### 5.1. Osvrt na rezultate mjerenja mikrotvrdoće

Na slici 76 prikazana je promjena mikrotvrdoće osnovnog materijala nakon zavarivanja, kalibriranja i toplinske obrade pri različitim brzinama namatanja cijevi. Nakon kalibriranja mikrotvrdoća osnovnog materijala povisila se u odnosu na stanje nakon zavarivanja, što je i očekivano zbog određenog stupnja plastične deformacije u hladnom stanju.

Nakon kalibriranja, cijevi su žarene pri čemu je varirana brzina prolaska cijevi kroz peć za toplinsku obradu. Temperatura u peći je cijelo vrijeme bila na 1050°C. Zbog različite brzine prolaska cijevi kroz peć, trajanje homogenizacijskog žarenja razlikovalo se za različite uzorke i to se odrazilo na mikrostrukturu i mikrotvrdoću uzoraka. Najniže vrijednosti mikrotvrdoće postignute su za brzinu između 0,85 m/min i 1,00 m/min. Kod brzina izvan ovog raspona, mikrotvrdoća je bila viša vjerojatno zbog kraćeg trajanja homogenizacijskog žarenja (kod viših brzina) ili sporijeg ohlađivanja (kod najniže brzine). Na vrijednosti mikrotvrdoće mogla je utjecati i veličina austenitnog zrna koja se mijenjala zbog trajanja homogenizacijskog žarenja, što se vidjelo pri analizi mikrostrukture uzoraka.



Slika 76. Promjena mikrotvrdoće za osnovni materijal

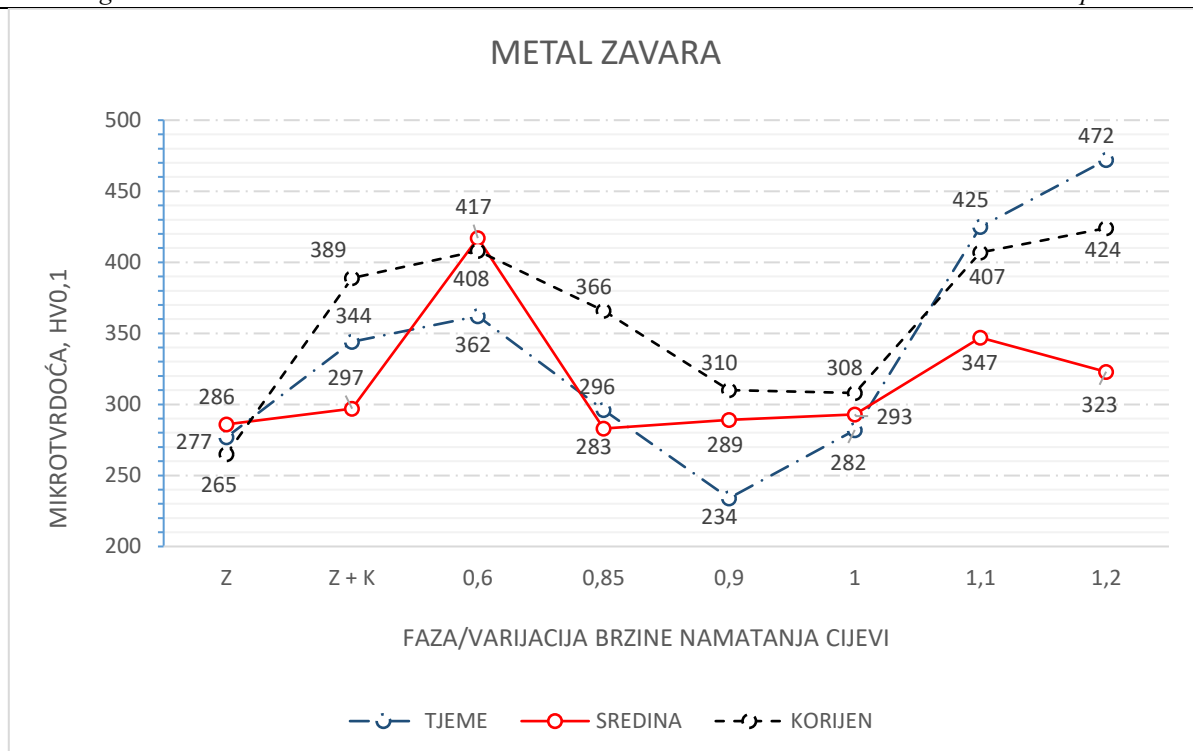


**Slika 77. Promjene mikrotvrdoće u zoni utjecaja topline**

Na slici 77 prikazana je promjena mikrotvrdoće zone utjecaja topline nakon zavarivanja, kalibriranja i toplinske obrade pri različitim brzinama namatanja cijevi, u tjemenu, sredini i korijenu zavara. Trend promjene mikrotvrdoće vrlo je sličan promjeni kod osnovnog materijala. Kalibriranjem se mikrotvrdoća u zoni utjecaja topline povećava, a optimalni parametri toplinske obrade, kojima se postiže najniža mikrotvrdoća, nalaze se kod brzina namatanja cijevi od 0,90 i 1,00 m/min. Kod većine uzoraka najviše vrijednosti tvrdoće izmjerene su u korijenu zavara.

Na slici 78 grafički je prikazana promjena mikrotvrdoće u metalu zavara nakon zavarivanja, kalibriranja i toplinske obrade pri različitim brzinama namatanja cijevi, u tjemenu, sredini i korijenu zavara. I u ovom slučaju, trend promjene mikrotvrdoće podudara se s promjenom u osnovnom materijalu i zoni utjecaja topline. Najniže tvrdoće postižu se pri brzinama između 0,85 i 1,00 m/min. Povećanjem brzine namatanja cijevi i promjenom parametara žarenja, rastu i vrijednosti mikrotvrdoće u tjemenu, sredini i korijenu metala zavara. Uzrok tome treba ponajprije tražiti u skraćanju vremena žarenja, čime se onemogućila potpuna homogenizacija mikrostrukture. Kod najmanje brzine od 0,6 m/min, izmjerene su relativno visoke vrijednosti mikrotvrdoće, što može biti povezano s duljim vremenom ohlađivanja i eventualnim formiranjem neželjenih mikrostrukturnih faza.

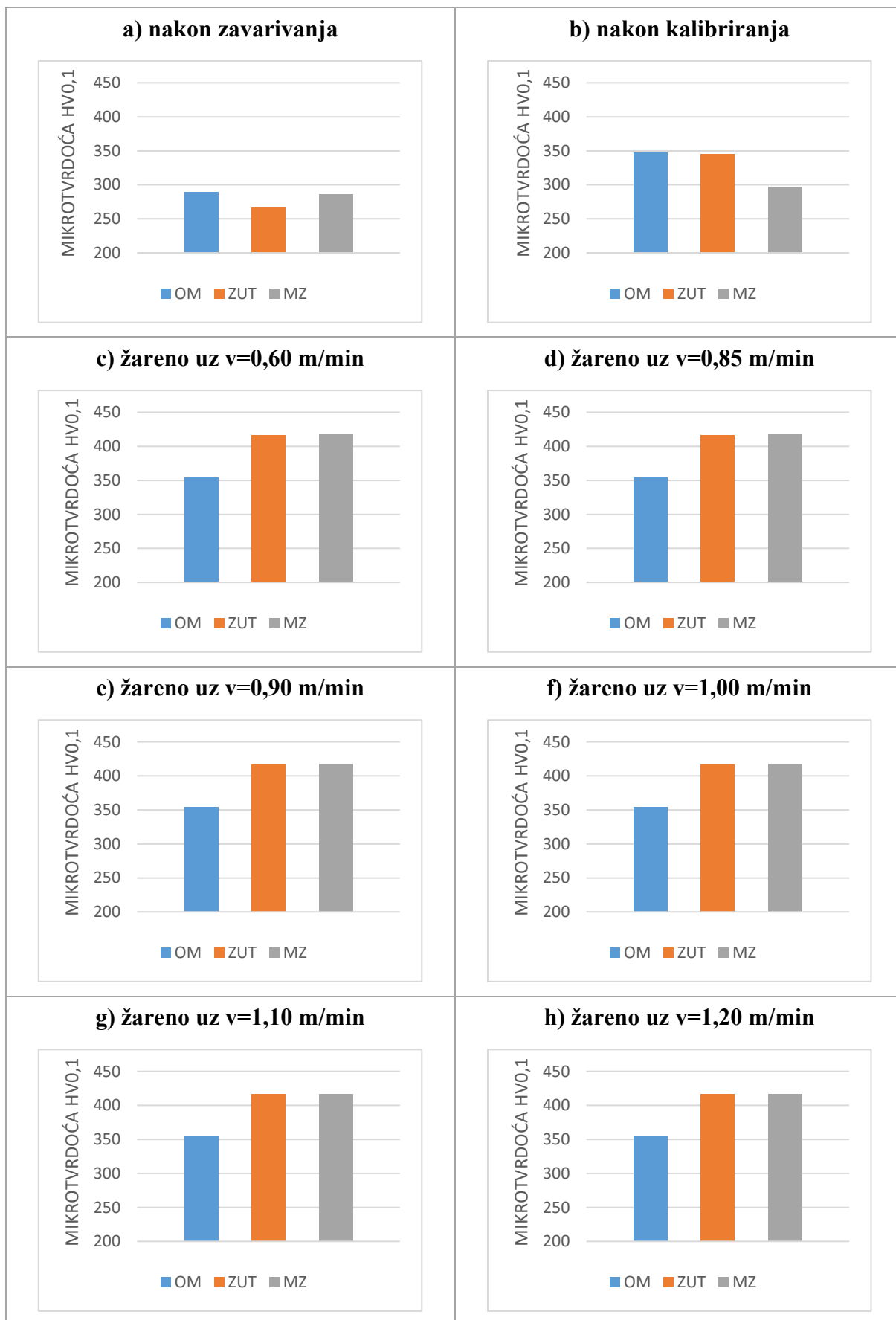




**Slika 78. Promjena mikrotvrdoće u metalu zavara**

Na slici 79 prikazan je odnos mikrotvrdoća u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara, pojedinačno za svaki uzorak. Na slici se vidi mikrotvrdoća zavarenog spoja nakon zavarivanja (a) koja je nešto niža od mikrotvrdoće uzorka nakon kalibriranja (b). I na ovom prikazu jasno se vidi da najnižu mikrotvrdoću imaju uzorci čija je toplinska obrada provedena pri brzini namatanja cijevi od 0,85, 0,90 i 1,00 m/min (d, e, f). Također je važno istaknuti da su vrijednosti mikrotvrdoće podjednake za osnovni materijal, zonu utjecaja topline i metal zavara. Sve navedeno je posljedica mikrostrukturnih promjena nastalih tijekom toplinske obrade u smislu homogenizacije mikrostrukture zavarenog spoja. Na slikama 55 i 60 prikazana je mikrostrutura zavara ovih uzoraka, gdje je jasno vidljivo da nema velike razlike u mikrostrukтури između osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavara. Ujednačene vrijednosti mikrotvrdoće ima i uzorak s brzinom 1,10 m/min (g). Vrijednosti mikrotvrdoće su nešto veće od tri prethodna uzorka, ali ni ovaj uzorak ne bi trebalo isključiti iz daljnjih eventualnih istraživanja u smislu određivanja optimalne brzine namatanja cijevi. Rezultati dobiveni na uzorcima (c) i (h) nisu zadovoljavajući.

Na temelju provedene analize, može se zaključiti da je optimalna brzina namatanja cijevi 1,00 m/min. Povećanje brzine s trenutne 0,85 m/min na 1,00 m/min, dovest će do povećanja produktivnosti proizvodnje u iznosu od 17% uz istu kvalitetu proizvoda.

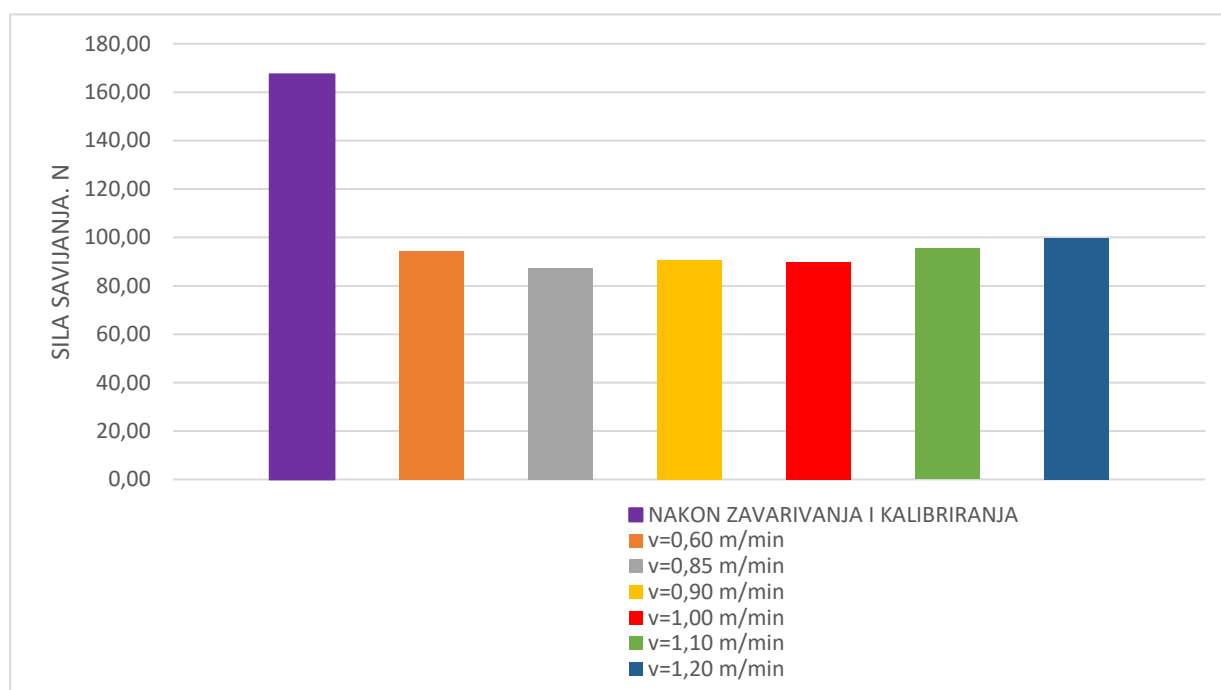


Slika 79. Mikrotvrdoća OM, ZUT-a i MZ za pojedinačne uzorke

## 5.2. Osvrt na rezultate savojnog ispitivanja

Na slici 80 prikazane su srednje vrijednosti sile potrebne za savijanje cijevi pod kutom od 90°. Najveća sila bila je potrebna za savijanje toplinski neobrađene kalibrirane cijevi. Kod svih toplinski obrađenih uzoraka, za savijanje je bila potrebna puno manja sila. Najmanja sila za savijanje cijevi pod kutom od 90° izmjerena je kod uzoraka s brzinom namatanja od 0,85, 0,90 i 1,00 m/min. Svi drugi režimi toplinske obrade dali su lošije rezultate, odnosno sila potrebna na savijanje bila je viša.

I na temelju rezultata savojnog ispitivanja, može se potvrditi da je optimalna brzina namatanja cijevi 1,00 m/min.



Slika 80. Maksimalna sila savijanja za sve uzorke

Trenutni kapacitet proizvodnje u poduzeću „Oprema d.d. Ludbreg“ jednog koluta za namatanje iznosi 1224 m/danu (51m/h) pri brzini namatanja od 0,85 m/min. Ukoliko se u peći nalazi osam koluta, ukupna produktivnost iznosi 9792 m/danu, uz pretpostavku da peć radi 24 sata dnevno, u tri smjene.

U ovom diplomskom radom utvrđeno je da se povećanjem brzine namatanja koluta s trenutnih 0,85 m/min na 1,00 m/min, produktivnost u fazi toplinske obrade može sigurno povećati za približno 18%, uz istu kvalitetu proizvoda.



## 6. ZAKLJUČAK

Sva ispitivanja u ovom radu provedena su s ciljem da se ispita mogućnost povećanja brzine toplinske obrade zavarenih cijevi koje se koriste u rashladnim komorama. Parametri toplinske obrade direktno ovise o brzini prolaska cijevi kroz peć, tj. o brzini namatanja cijevi na kolut, koja trenutno iznosi 0,85 m/min. Kraćim žarenjem i većom brzinom ohlađivanja povećala bi se produktivnost cjelokupne proizvodnje cijevi.

Na temelju rezultata analize mikrostrukture i mjerenja mikrotvrdoće zavarenog spoja te rezultata savojnog ispitivanja zavarenih cijevi, može se zaključiti sljedeće:

- nakon zavarivanja i kalibriranja, zavarene cijevi nužno je podvrgnuti rastvornom žarenju na 1050°C čime se popravljaju njihova mikrostruktura, kao i svojstva
- povećanjem brzine namatanja cijevi od 0,85 na vrijednosti do 1,00 m/min, postiže se slična mikrostruktura te mikrotvrdoća i oblikovljivost u smislu savijanja
- kako se produktivnost proizvodnje povećava s povećanjem brzine namatanja cijevi, optimalna brzina iznosi 1,00 m/min
- pri optimalnoj brzini postiže se homogena mikrostruktura, dovoljno niska i ujednačena mikrotvrdoća zavarenog spoja te izvrsna savitljivost cijevi
- daljnjim povećanjem brzine postižu se lošiji efekti toplinske obrade – viša tvrdoća i lošija savitljivost
- lošiji efekti toplinske obrade postižu se i smanjenjem brzine namatanja cijevi od 0,85 na 0,60 m/min.

Povećanjem brzine toplinske obrade, odnosno povećanjem brzine namatanja cijevi na kolut s trenutnih 0,85 m/min na 1,00 m/min, povećala bi se produktivnost u fazi toplinske obrade za oko 18%, uz istu kvalitetu proizvoda.

**LITERATURA**

- [1] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2013.
- [2] <https://www.statista.com/statistics/223028/world-stainless-steel-production/>  
(pristupljeno: 04.11.2020)
- [3] Rede, V.: Struktura i svojstva nehrđajućih čelika, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
- [4] I. Juraga, V. Alar, V. Šimunović, I. Stojanović: Korozija i metode zaštite od korozije, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu.
- [5] Juraga I., Šimunović V., Stojanović I.: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje, Pula, 2007
- [6] <https://www.oprema.com/?L=HR#tabPRO1200> (pristupljeno: 04.11.2020)
- [7] Afsaf I. Juraga, V. Alar, V. Šimunović, I. Stojanović: Korozija i metode zaštite od korozije, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
- [8] <https://www.soloswiss.com/products/> (pristupljeno: 06.11.2020 )
- [9] <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-data-viewer/> (pristupljeno: 06.11.2020)
- [10] Petek M. :*Diplomski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [11] <https://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/894-microstructure-of-ferrous-alloys.html> (pristupljeno: 28.11.2020)
- [12] <http://www.serto-bel.hr/inox-opcenito/glavne-karakteristike-najznacajnijih-nehrdjajucih-celika-inoxa.html> (pristupljeno: 28.11.2020)
- [13] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/austenitic-stainless-steel>  
(pristupljeno: 28.11.2020)
- [14] <https://www.bhansalioverseas.com/img/sheets-plates.jpg> (pristupljeno: 05.12.2020)
- [15] <https://www.steelquote3prices.com/materials/316-316l-stainless-steel/> (pristupljeno: 05.12.2020)
- [16] Vidranski D. :*Diplomski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [17] Juraga, I.: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju (dio II.), Zavarivanje, 37 3/4, 67–68, 1994.

---

**PRILOZI**

- I. CD-R disc