

Karakterizacija dupleks strukture dobivene aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom

Lemezina, Ante

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:235:672194>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ante Lemezina

Zagreb, 2021. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Ante Lemezina

Zagreb, 2021. godina.

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

Zahvaljujem se prof. Veri Rede na pruženoj pomoći tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem se i asistentu Ivanu Juriću na pruženoj pomoći tijekom izrade rada. Također se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj pomoći tijekom studiranja.

Ante Lemezina



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: 2. 12. 2021.	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21-386	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: ANTE LEMEZINA

Mat. br.: 0035211859

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija dupleks strukture dobivene aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of duplex structure obtained by wire arc additive manufacturing**

Opis zadatka:

Dupleks čelici su posebna skupina nehrđajućih čelika koja se od drugih izdvaja po dvofaznoj mikrostrukturi sastavljenoj od ferita i austenita. Ako se želi postići najbolja kombinacija korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava, volumni udjeli ferita i austenita trebaju biti u omjeru 50:50. U praksi je dopušten omjer faza 60:40. Osim ferita i austenita u mikrostrukturi ne smiju biti prisutne druge faze. Takva mikrostruktura postiže se vrlo kontroliranim kemijskim sastavom i vrlo strogo definiranim režimom hlađenja. Kod nekih posebnih postupaka, poput aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM), teško je upravljati režimom hlađenja, a ograničena je i mogućnost kontrole unosa topline. Zbog toga je teško postići optimalnu mikrostrukturu, a time i tražena svojstva dupleks čelika.

U diplomskom radu potrebno je analizirati mikrostrukturu i izmjeriti mikrotvrdoću uzoraka dupleks čelika izrađenih aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom koji su nakon izrade bili podvrgnuti različitim režimima toplinske obrade. Mjerenje mikrotvrdoće provesti metodom po Vickersu s različitim opterećenjima. Na temelju dobivenih rezultata odrediti optimalni režim toplinske obrade.

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

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

Predsjednica Povjerenstva:
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. DUPLEKS ČELICI	2
2.1. Povijesni razvoj i podjela dupleks čelika	2
2.2. Mikrostruktura dupleks čelika	4
2.3. Sastav	10
2.4. Svojstva.....	12
2.5. Zavarivanje dupleks čelika.....	14
2.6. Primjena	15
3. ADITIVNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM	16
3.1. Aditivna proizvodnja.....	16
3.2. WAAM postupak	17
3.2.1. Greške pri zavarivanju	20
3.3. Zavarivanje MIG/MAG postupak	21
3.4. Zavarivanje TIG postupak	23
3.5. Primjena WAAM metode	25
4. MJERENJE TVRDOĆE.....	26
4.1. Vickers	26
5. EKSPERIMENTALNI DIO	28
5.1. Cilj rada.....	28
5.2. Materijal za ispitivanje.....	28
5.3. Analiza mikrostrukture	31
5.4. Ispitivanje mikrotvrdoće	49
6. ANALIZA REZULTATA	56
6.1. Osvrt na rezultate kvalitativne i kvantitativne analize mikrostrukture	56
6.2. Osvrt na rezultate mjerenja tvrdoće	57
7. ZAKLJUČAK.....	65
LITERATURA.....	66

POPIS SLIKA

Slika 1.	Mikrostruktura dupleks čelika (A-austenit, F-ferit) [2].....	2
Slika 2.	Mikrostruktura dupleks čelika, tamno obojan ferit, a svijetlo obojan austenit [8]..	5
Slika 3.	Mikrostruktura dupleks čelika u a) toplo valjanom stanju i u b) lijevanom stanju [5]	5
Slika 4.	Trodimenzionalni prikaz Fe-Cr-Ni ravnotežnog dijagrama [6]	6
Slika 5.	Schaefflerov dijagram [6].....	7
Slika 6.	Dio Fe-Cr-Ni dijagrama s 19% Cr i četiri modela skrućivanja [6]	8
Slika 7.	Prikaz faza, karbida, nitrda i intermetalnih spojeva u dupleks čeliku [9]	9
Slika 8.	SEM fotografije a) mikrostruktura nakon žarenja na 800 °C u trajanju od 30 min gdje se vidi ferit ispunjen sigma fazom i Widmanstattenovim sekundarnim austenitom; b) na istom uzorku sigma-faza i γ_2 ; c) prikaz malih bijelih čestica chi-faze [10].....	10
Slika 9.	Utjecaj temperature i legiranih elemenata na raspodjelu faza [6].....	11
Slika 10.	Utjecaj dušika na R_m i $R_{p0,2}$ [5].....	13
Slika 11.	Armatura proizvedena od dupleks čelika [6]	15
Slika 12.	Silosi [6]	15
Slika 13.	Podjela aditivnih tehnologija za metale [16]	16
Slika 14.	Faze aditivne proizvodnje [17].....	17
Slika 15.	WAAM sustav [14]	18
Slika 16.	Shema WAAM postupka [19].....	18
Slika 17.	Proizvodi proizvedeni WAAM postupkom [20]	19
Slika 18.	Deformacije nastale uslijed velikog unosa topline [9]	20
Slika 19.	Pukotina u zavaru [7]	21
Slika 20.	Shema postupka zavarivanja MIG/MAG [23]	22
Slika 21.	Shema opreme za TIG postupak zavarivanja [16]	24
Slika 22.	Most od nehrđajućeg čelika proizveden WAAM postupkom [27]	25
Slika 23.	Indentor i otisak mjerenja kod Vickersove metode [28]	27
Slika 24.	Navareni zid dupleks čelika	29
Slika 25.	Dio izrezan iz navarenog zida	29
Slika 26.	Položaj uzoraka u navarenom zidu.....	30
Slika 27.	Metalografski uzorak.....	31
Slika 28.	Nagrizanje uzoraka.....	32
Slika 29.	Olympus GX51.....	32
Slika 30.	Mikrostruktura uzorka 1 B snimljena pri povećanju od 100×.....	33
Slika 31.	Mikrostruktura uzorka 1 B snimljena pri povećanju od 500×.....	33
Slika 32.	Mikrostruktura uzorka 1 B3 snimljena pri povećanju od 100×.....	34
Slika 33.	Mikrostruktura uzorka 1 B3 snimljena pri povećanju od 500×.....	35
Slika 34.	Mikrostruktura uzorka 2 B snimljena pri povećanju od 100×.....	36
Slika 35.	Mikrostruktura uzorka 2 B snimljena pri povećanju od 500×.....	36
Slika 36.	Mikrostruktura uzorka 2 B3 snimljena pri povećanju od 100×.....	37
Slika 37.	Mikrostruktura uzorka 2 B3 snimljena pri povećanju od 500×.....	37
Slika 38.	Mikrostruktura uzorka 3 B snimljena pri povećanju od 100×.....	38
Slika 39.	Mikrostruktura uzorka 3 B snimljena pri povećanju od 500×.....	39
Slika 40.	Mikrostruktura uzorka 3 B3 snimljena pri povećanju od 100×.....	40
Slika 41.	Mikrostruktura uzorka 3 B3 snimljena pri povećanju od 500×.....	40
Slika 42.	Mikrostruktura uzorka 4 B snimljena pri povećanju od 100×.....	41
Slika 43.	Mikrostruktura uzorka 4 B snimljena pri povećanju od 500×.....	41
Slika 44.	Mikrostruktura uzorka 4 B3 snimljena pri povećanju od 100×.....	42

Slika 45.	Mikrostruktura uzorka 4 B3 snimljena pri povećanju od 500×.....	42
Slika 46.	Mikrostruktura uzorka 5 B snimljena pri povećanju od 100×.....	43
Slika 47.	Mikrostruktura uzorka 5 B snimljena pri povećanju od 500×.....	44
Slika 48.	Mikrostruktura uzorka 5 B3 snimljena pri povećanju od 100×.....	45
Slika 49.	Mikrostruktura uzorka 5 B3 snimljena pri povećanju od 500×.....	45
Slika 50.	Mikrostruktura uzorka 6 B snimljena pri povećanju od 100×.....	46
Slika 51.	Mikrostruktura uzorka 6 B snimljena pri povećanju od 500×.....	46
Slika 52.	Mikrostruktura uzorka 6 B3 snimljena pri povećanju od 100×.....	47
Slika 53.	Mikrostruktura uzorka 6 B3 snimljena pri povećanju od 500×.....	47
Slika 54.	Mikrotvrdomjer „PMT-3“	49
Slika 55.	Odnos ferita i austenita po uzorcima	56
Slika 56.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,2 za uzorke uz rub navara (B)	57
Slika 57.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,2 za uzorke u sredini navara (B3).....	58
Slika 58.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,1 za uzorke uz rub navara (B)	59
Slika 59.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,1 za uzorke u sredini navara (B3).....	60
Slika 60.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,05 za uzorke uz rub navara (B)	60
Slika 61.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,05 za uzorke u sredini navara (B3)	61
Slika 62.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,02 za uzorke uz rub navara (B)	61
Slika 63.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,02 za uzorke u sredini navara (B3)	62
Slika 64.	Ovisnost tvrdoće o opterećenju za sve uzorke	63

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela nehrđajućih čelika [4]	3
Tablica 2. Razredi dupleks čelika [7]	4
Tablica 3. Kemijski sastav dupleks čelika sa slike 2 [8]	5
Tablica 4. Svojstva nekih dupleks čelika [5], [11]	12
Tablica 5. Vrijednosti sila koje se primjenjuju kod Vickersove metode [28]	27
Tablica 6. Kemijski sastav žice dupleks čelika	28
Tablica 7. Volumni udjeli ferita i austenita u uzorcima	48
Tablica 8. Tvrdće uzorka 1	50
Tablica 9. Tvrdće uzorka 2	51
Tablica 10. Tvrdće uzorka 3	52
Tablica 11. Tvrdće uzorka 4	53
Tablica 12. Tvrdće uzorka 5	54
Tablica 13. Tvrdće uzorka 6	55

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
HV		Tvrdoća po Vickersu
A	%	Istezljivost
KV	J	Udarni rad loma
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
BCC		Prostorno centrirana kubična rešetka
FCC		Plošno centrirana kubična rešetka

SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je odrediti optimalni režim toplinske obrade dupleks nehrđajućeg čelika dobivenog aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture i mjerenje tvrdoće različitim opterećenjima (HV0,2, HV0,1, HV0,05 i HV0,02). Uzorci dupleks čelika bili su podvrgnuti različitim režimima toplinske obrade kako bi se vidio utjecaj pojedine toplinske obrade na mikrostrukturu i tvrdoću.

Rezultati ispitivanja pokazuju da provedene toplinske obrade utječu na mikrostrukturu i tvrdoću dupleks čelika. Toplinski obrađeni uzorci imaju viši volumni udio austenita od toplinski neobrađenog uzorka, a kod većine uzoraka udio austenita je viši u sredini nego uz stijenkicu navara. Toplinski obrađeni uzorci imaju nižu tvrdoću od toplinski neobrađenog uzorka bez obzira na opterećenje pri mjerenju. Kod nižih opterećenja veća su rasipanja rezultata izmjenjenih tvrdoća.

Kod svih uzoraka uočena je značajna ovisnost tvrdoće o primijenjenom opterećenju. Tijekom promjene tvrdoće s povećanjem opterećenja kod većine uzoraka podudarano je na rubu i sredini zida navara.

Ključne riječi: dupleks nehrđajući čelici, aditivna proizvodnja, WAAM, tvrdoća

SUMMARY

The aim of this work was to determine the optimal heat treatment regime of duplex stainless steel obtained by wire and arc additive manufacturing.

In the experimental part of the master thesis, qualitative and quantitative analysis of the microstructure and hardness measurements with different loads (HV0.2, HV0.1, HV0.05 and HV0.02) were performed.

Duplex steel samples were exposed to different heat treatment regimes to observe the impact of individual heat treatments on the microstructure and hardness.

The test results show that the performed heat treatments affect the microstructure and hardness of duplex steel. Heat-treated samples have a higher volume fraction of austenite than sample without heat-treatment, and in most samples the share of austenite is higher in the middle than along the welded wall. Heat-treated samples have a lower hardness than unheated sample regardless of the measurement load. At lower loads, the scatter of the results of the measured hardnesses is higher.

In all samples, the measured hardnesses were significantly depended on the load. The course of the change in hardness with increasing load in most samples coincided at the edge and in the middle of the welded wall.

Key words: duplex stainless steel, additive manufacturing, WAAM, hardness

1. UVOD

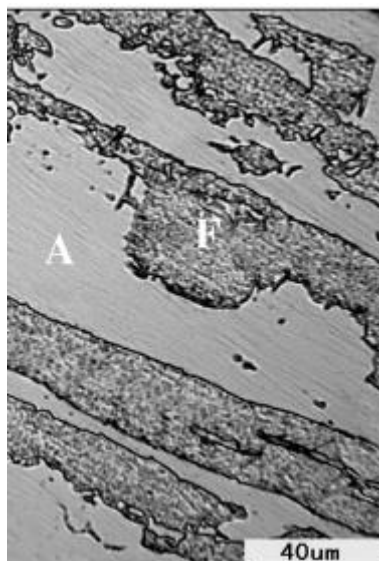
U današnje vrijeme sve je veća potreba za inovativnim materijalima kao što su dupleks čelici. Dupleks čelici su nehrđajući čelici koji imaju dvojni, austenitno-feritnu mikrostrukturu što je izuzetak kod nehrđajućih čelika i u suprotnosti je s drugim uvjetom korozijske postojanosti. Izuzetno su pogodni za primjenu u raznim granama industrije zbog svoje korozijske postojanosti i dobrih mehaničkih svojstava u odnosu na druge nehrđajuće čelike. Još jedna od prednosti u odnosu na druge nehrđajuće čelika je ta što imaju visoku specifičnu čvrstoću. U zadnje vrijeme posebno je interesantna i intenzivno se istražuje primjena dupleks čelika u aditivnoj proizvodnji.

Aditivna proizvodnja se temelji na slaganju materijala sloj po sloj. To znači da se materijali navaraju u slojevima dok se ne dobije izradak. Tu je posebno zanimljiva aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom u kojoj se materijal koji se nalazi u obliku žice slaže sloj po sloj navarivanjem na podlogu. Za razliku od konvencionalnih načina proizvodnje metalnih izradaka, kao što je obrada odvajanjem čestica, kod ove metode moguće je proizvesti izratke složenije geometrije uz manju potrošnju materijala.

Kombinacija dupleks čelika i aditivne proizvodnje posebno je zanimljiva zbog mogućnosti izrade proizvoda složene geometrije uz manju potrošnju materijala, a koji imaju izvrsnu kombinaciju mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti.

2. DUPLEKS ČELICI

Dupleks čelici imaju dvofaznu mikrostrukturu koja se sastoji od austenita i ferita, slika 1. Udjeli ferita i austenita kod dupleks čelika trebaju biti između 40 % i 60 % i u tom slučaju ovi čelici, iako nisu monofazni imaju izvrsnu otpornost na opću koroziju. Velika većina današnjih modernih dupleks čelika ima omjer ferita i austenita 50:50 [1].



Slika 1. Mikrostruktura dupleks čelika (A-austenit, F-ferit) [2]

Dupleks nehrđajući čelici predstavljaju materijal koji ima bolja mehanička svojstva i otpornost na napetosnu koroziju od feritnih i austenitnih nehrđajućih čelika. U procesu proizvodnje ovih čelika dolazi do problema pri obradi na povišenim temperaturama i uslijed toga nastaju pukotine u materijalu i neprihvatljiv izgled površine [3].

U pravilu sadrže 65 % do 70 % Fe, 18 % do 25 % Cr i 3 % do 6 % Ni, uz manje dodatke molibdena, bakra, dušika, silicija, titanija i volframa. Ovi čelici primarno kristaliziraju u ferit, a postupnim hlađenjem ferit prelazi u austenit. Kod dovoljno sporog hlađenja do sobne temperature sav ferit bi prešao u austenit i čelik bi imao potpuno austenitnu mikrostrukturu. Kad bi se neposredno nakon skrućivanja čelik naglo ohladio do sobne temperature zadržala bi potpuno feritna mikrostruktura [4].

2.1. Povijesni razvoj i podjela dupleks čelika

Nehrđajući čelici nastaju početkom dvadesetog stoljeća u Ujedinjenom Kraljevstvu i Njemačkoj. Prve skupine nehrđajućih čelika koje nastaju jesu martenzitni i feritni Fe-Cr čelici,

ali ubrzo austenitni Fe-Cr-Ni čelici postaju najraširenija skupina. Brzi porast i širenje austenitnih čelika događa se zbog jednostavnosti proizvodnog procesa, izvrsne korozijske postojanosti, dobrih mehaničkih svojstava, dobre zavarljivosti i mogućnosti primjene u širokom temperaturnom intervalu. Kod prvih austenitnih nehrđajućih čelika minimalni udio ugljika bio je visok, oko 0,08 %, zbog peći u kojima se proizvodilo i zbog procesa rafiniranja. Zbog toga je postojala opasnost od stvaranja karbida po granicama zrna tijekom toplinske obrade ili zavarivanja [5].

Nehrđajući čelici grupirani su u pet skupina, a osnovni kriterij podjele je mikrostruktura, tablica 1 [4].

Tablica 1. Podjela nehrđajućih čelika [4]

Skupina		Mikrostruktura
Martenzitni		Martenzit ili martenzit + karbidi
Feritni		Ferit
Austenitni		Austenit
Duplex		Ferit + austenit
Precipitacijski očvrsnuti	Martenzitni	Martenzit + precipitati
	Semi-austenitni	Martenzit + precipitati
	Austenitni	Austenit + precipitati

Prva komercijalna legura dupleks čelika proizvedena je 1930.god. u Švedskoj i sadržavala je 26 % Cr, 5 % Ni i 1,5 % Mo. Legura je imala visoku tvrdoću i čvrstoću i zbog tog se upotrebljavala za proizvodnju osovina, pumpi, vretena itd. Zbog dobre livljivosti i kemijske postojanosti, legura dupleks čelika upotrebljavala se u industriji papira i mljekarskoj industriji [6].

Prvi dvofazni nehrđajući čelik proizveden za uporabu u kloridnim uvjetima bio je X2CrNi23-4. Tijekom godina je visokolegirani dupleks nehrđajući čelik u industriji postao zamjena za skuplje nehrđajuće čelike. Među najkorištenijim dupleks čelicima je onaj oznake X2CrNiMoN22-5-3, zbog izvrsne kombinacije mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti. Visokolegirani dupleks nehrđajući čelik ima i bolju otpornost na rupičastu koroziju od austenitnih nehrđajućih čelika.

Podjela dupleks čelika napravljena je prema otpornosti na rupičastu koroziju, a računa se preko djelotvorne sume - DS (eng. *Pitting resistance equivalent number* - PREN), tablica 2. To je broj koji je ekvivalentan otpornosti na rupičastu koroziju [7].

$$DS = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N \quad (1)$$

Nehrđajući čelik oznake X2CrNiN23-4 bio je prvi dvofazni nehrđajući čelik koji je razvijen za potrebe industrije gdje je bila nužna otpornost na koroziju u kloridnim uvjetima. Čelik oznake X2CrNiMoN22-5-3 jedan je od najkorištenijih dupleks nehrđajućih čelika koji ima dobra mehanička svojstva i izvrsnu korozijsku postojanost [7].

Tablica 2. Razredi dupleks čelika [7]

Razred	Vrijednost DS
Dupleks čelici prve generacije	20-30
Standardni 22% Cr dupleks čelici	35
25% Cr dupleks čelici	35-40
Superdupleks čelici	40-50
Hiperdupleks čelici	≥ 50

2.2. Mikrostruktura dupleks čelika

Moderni dupleks nehrđajući čelici sadrže 50 % austenita (FCC kristalna rešetka) i 50 % ferita (BCC kristalna rešetka). Nakon što primarno kristalizira u potpuni ferit, daljnjim hlađenjem pri temperaturi od oko 1300 °C počinje transformacija ferita u austenit, najprije na granicama zrna ferita, a nakon toga i unutar feritnih zrna. Količina austenita ovisi o brzini hlađenja. Kako bi se postigla dupleks mikrostruktura, čelik se prvo dovede na temperaturu od 1050 °C do 1150 °C gdje je omjer austenita i ferita 50:50, a zatim se gasi u vodi. Kod gnječenih izradaka zrna su izdužena zbog valjanja u toplom stanju koje je popraćeno žarenjem i gašenjem. Optimalni udio austenita kod ovakvih izradaka je od 45 % do 60 %. Mikrostruktura je određena kemijskim sastavom i temperaturom žarenja [5], [8].

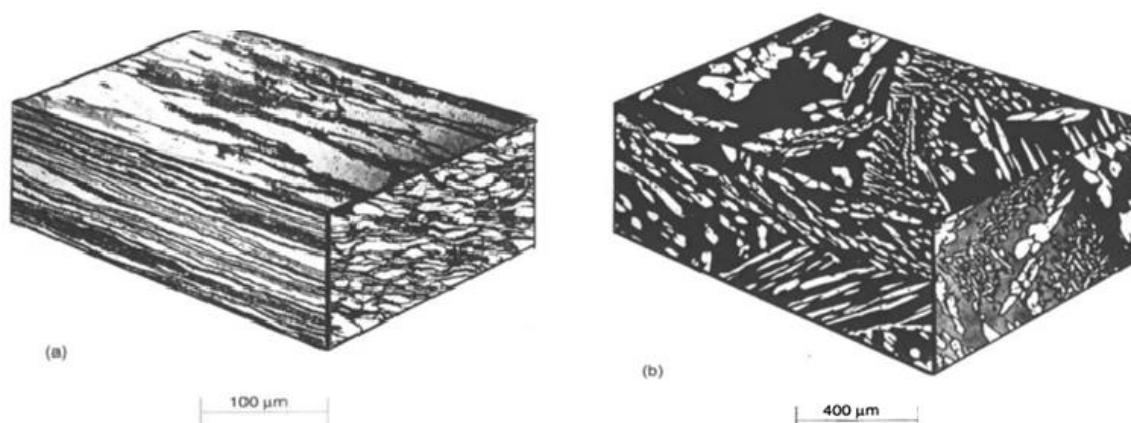


Slika 2. Mikrostruktura dupleks čelika, tamno obojan ferit, a svijetlo obojan austenit [8]

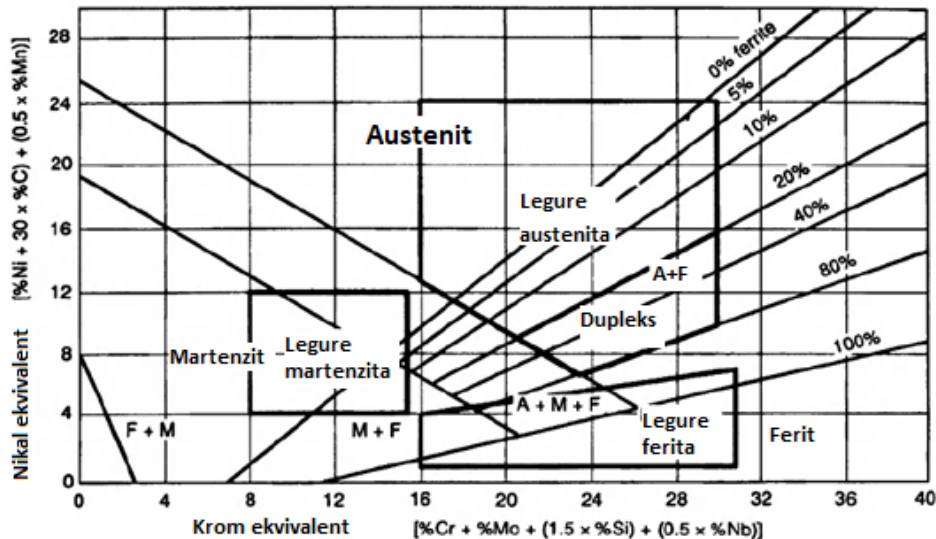
Tablica 3. Kemijski sastav dupleks čelika sa slike 2 [8]

Maseni udio, %								
C	Si	Mn	Ni	Mo	N	Cu	Ti + Nb + V	Cr
0,02	0,60	1,60	6,00	0,50	0,04	0,17	0,06	21,00

Slika 2 prikazuje mikrostrukturu dupleks čelika kemijskog sastava prikazanog u tablici 3 [8].



Slika 3. Mikrostruktura dupleks čelika u a) toplo valjanom stanju i u b) lijevanom stanju [5]



Slika 5. Schaefflerov dijagram [6]

U Schaefflerovom dijagramu prikazane su mikrostrukture svih nehrđajućih čelika. Problem ovog dijagrama je što ne uzima u obzir brzine hlađenja i temperature toplinske obrade. Ovaj dijagram se koristi i kod određivanja mikrostrukture zavara. Problem svih dijagrama je što uzimaju premalo parametara u obzir. Dušik i ugljik u ovakvim dijagramima prikazuju se uglavnom u malim koncentracijama, ali njihov utjecaj na mikrostrukturu je vrlo značajan.

Glavne faze koje se pojavljuju u Schaefflerovom dijagramu su: austenit (γ), ferit (δ ili α), martenzit.

Intermetalne faze koje se mogu pojaviti u nehrđajućim čelicima su: sigma- (σ), chi- (χ), Lavesova (η), G-, R- i Z-faza

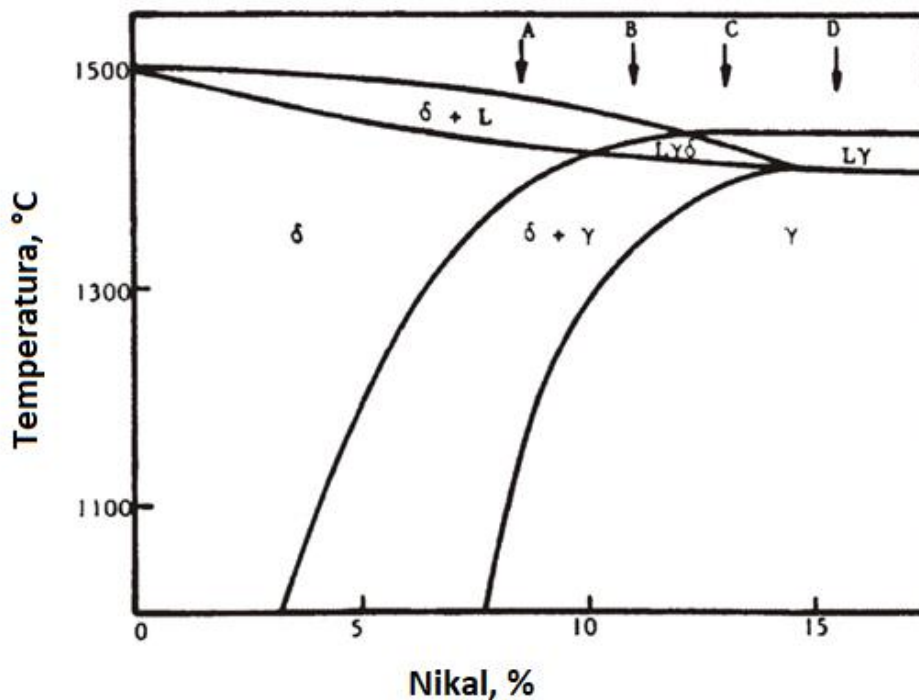
Karbidi koji mogu nastati u nehrđajućim čelicima mogu biti karbidi tipa: $M_{23}C_6$, MC, M_6C , M_7C_3 .

U nehrđajućim čelicima mogu nastati i nitridi tipa : MN i M_2N [6].

Niskougljični nehrđajući čelici imaju više mehanizama skrućivanja, slika 6. Modeli skrućivanja:

- feritni ili model A (taljevina \rightarrow taljevina + $\delta \rightarrow \delta$)
- feritno-austenitni ili model B (taljevina \rightarrow taljevina + $\delta \rightarrow$ taljevina + δ + $\gamma \rightarrow \gamma$ + δ)
- austenitno-feritni ili model C (taljevina \rightarrow taljevina + $\gamma \rightarrow$ taljevina + γ + $\delta \rightarrow \gamma$ + δ)
- austenitni ili model D (taljevina \rightarrow taljevina + $\gamma \rightarrow \gamma$).

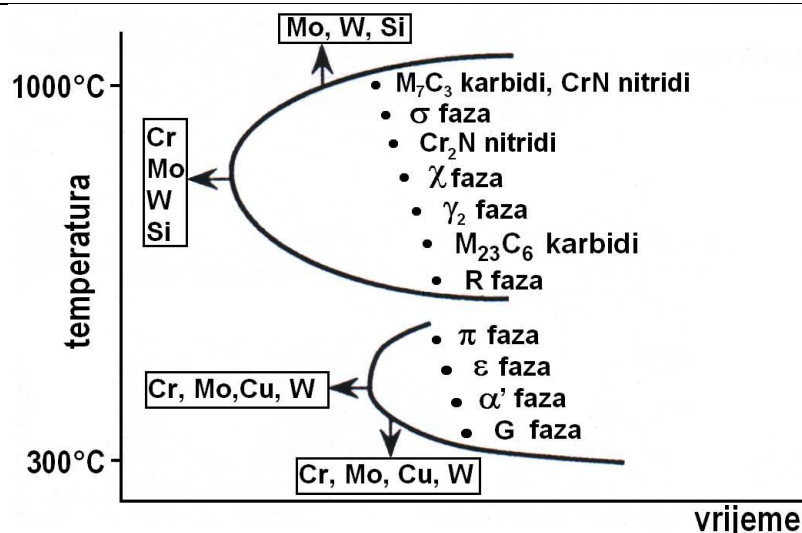
Dupleks čelici niskog udjela ugljika skrućuju po modelu A, a austenit se formira u čvrstom stanju, slika 6. Temperatura likvidusa je između 1445 °C i 1450 °C, a solidusa između 1385 °C i 1390 °C. Inicijalno precipitirati austenita nastaju po granicama zrna ferita, a zatim se austenit širi prema Widmanstättenovoj morfologiji unutar zrna ferita [6].



Slika 6. Dio Fe-Cr-Ni dijagrama s 19% Cr i četiri modela skrućivanja [6]

Kako bi se postigla što bolja mehanička svojstva i što bolja korozivna postojanost, dupleks čelik se mora toplinski obraditi. Toplinska obrada se provodi na temperaturi od 1050 °C do 1200 °C ovisno o kemijskom sastavu. S navedene temperature čelik se gasi u vodi kako bi se zadržala postignuta izbalansirana mikrostruktura (F:A=50:50) i optimalna svojstva čelika.

Kada je izložen temperaturama manjim od 1000 °C dupleks čelik je podložan raznim faznim pretvorbama, slika 7. Kod temperature između 650 °C i 900 °C može doći do stvaranja precipitata intermetalnih faza, gdje većinom nastaju sigma- i chi-faza, ali može doći i do stvaranja karbida i nitrida. Između 300 °C i 500 °C dolazi do formiranja alfa-prim-faze, koja može uzrokovati pojavu krhkosti 475 u feritu. Kod intenzivne plastične deformacije na temperaturi ispod 300 °C može doći do pretvorbe austenita u martenzit. Ukoliko dođe do ove pojave čelik se treba ponovno toplinski obraditi [6].

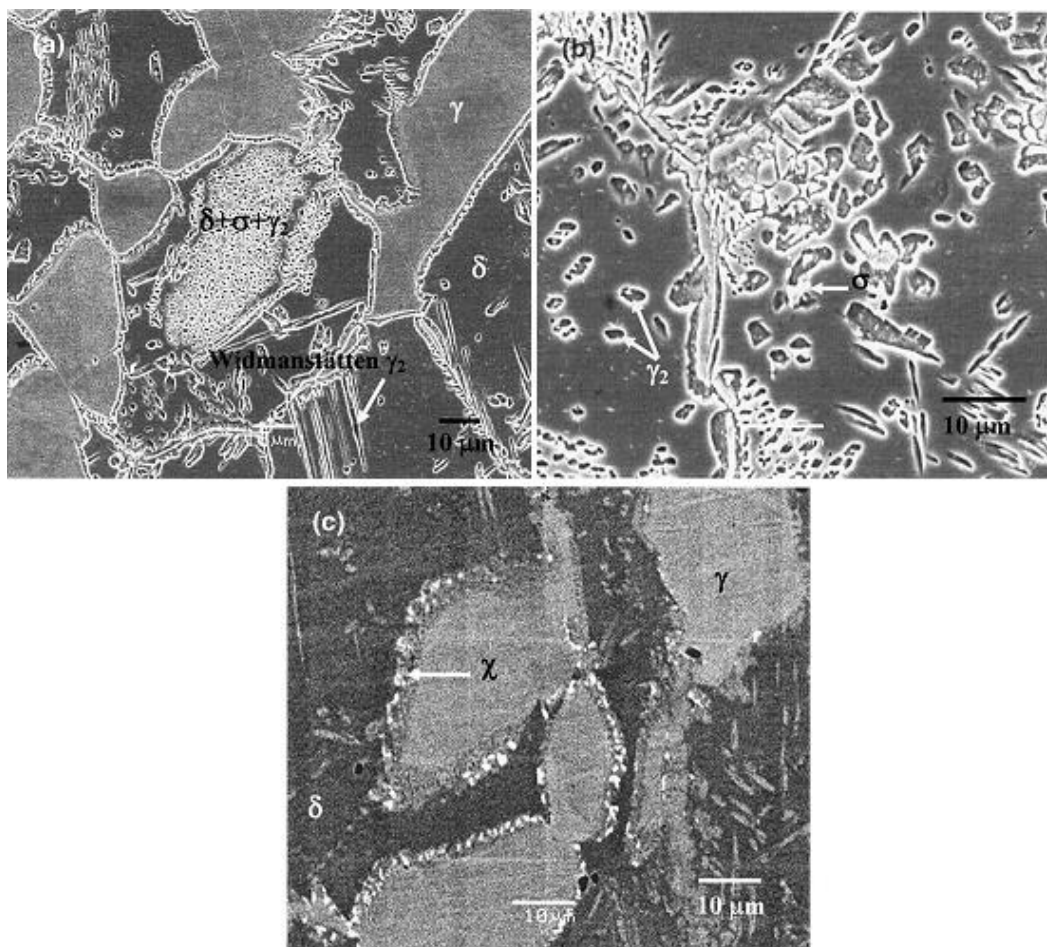


Slika 7. Prikaz faza, karbida, nitrida i intermetalnih spojeva u dupleks čeliku [9]

Precipitacija kromovih karbida događa se većinom između 700 °C i 900 °C i to pri vremenu izlaganja manjem od 30 min. Ugljik se većinom nalazi u austenitnoj fazi, ali precipitacija $M_{23}C_6$ karbida događa se na granicama faza. Kako karbidi rastu u feritno područje uzrokuju nestanak kroma iz tog područja te zbog te pojave na tom dijelu nastaje sekundarni austenit, slika 8 b. Istovremeno uz precipitaciju kromovih karbida dolazi i do precipitacije kromovih nitrida. Dušik je vrlo jak stabilizator austenita. Pojava precipitacije nitrida kod zavarivanja je jako loša, jer utječe na smanjenje mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti. Precipitacija chi-faze uzrokuje pad mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti. Chi-faza je bogatija molibdenom, a siromašnija kromom i uvjetovana je minimalnim udjelom kroma od 2 %. Nastaje na granicama zrna i stabilnija je pri nižim temperaturama, slika 8 c. Chi-faza nakon nekog vremena može transformirati u sigma-fazu, slika 8 a. Iako se manje proučava od sigma-faze, njezina pojava čak i u malim udjelima uzrokuje drastičan pad svojstava kod dupleks čelika. Precipitacija sigma faze uzrokuje značajno smanjenje žilavosti i korozijske postojanosti. U „povoljnim“ uvjetima, nastankom i povećanjem udjela sigma-faze može dovesti do potpunog nestanka ferita iz mikrostrukture dupleks čelika. Precipitacija se događa između 650 °C i 975 °C i počinje na granicama zrna i miče se prema unutrašnjosti zrna ferita. Sigma-faza raste u ferit, jer je bogatija feritotvorcima kao što su krom, molibden i silicij, a i difuzija u feritu je brža nego u austenitu. Sigma faza je izuzetno opasna jer može dovesti do lokalne korozije.

Alfa-prim-faza (α') sadrži krom i željezo i ima BCC strukturu vrlo sličnu feritnoj. Nastaje između 300 °C i 550 °C i uzrokuje krhkost dupleks čelika. Prisustvo alfa-prim-faze ima

značajan utjecaj na mehanička svojstva i korozivsku postojanost, povećava tvrdoću i čvrstoću, a smanjuje udarni rad loma i istezljivost [6].

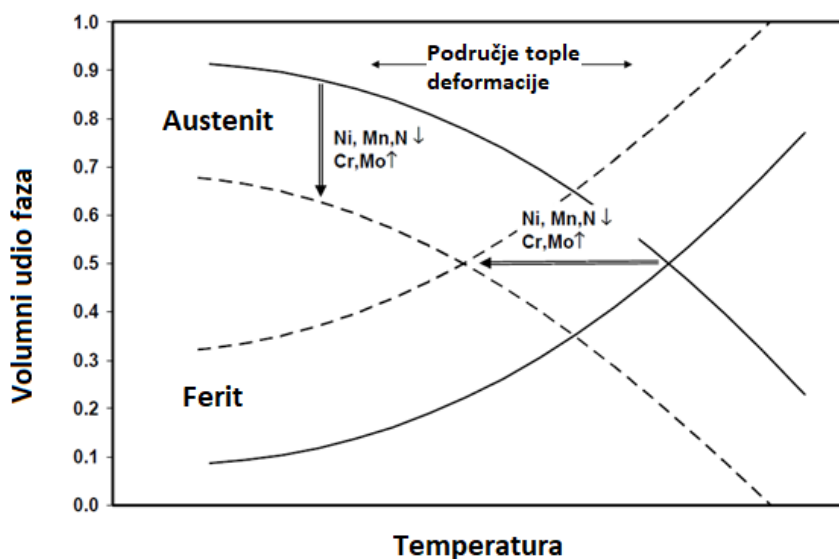


Slika 8. SEM fotografije a) mikrostruktura nakon žarenja na 800 °C u trajanju od 30 min gdje se vidi ferit ispunjen sigma fazom i Widmanstättenovim sekundarnim austenitom; b) na istom uzorku sigma-faza i γ_2 ; c) prikaz malih bijelih čestica chi-faze [10]

2.3. Sastav

Dupleks čeliku se dodaje mnogo legirnih elemenata kako bi se dobila optimalna svojstva i postigla željena mikrostruktura. Legirni elementi se dijele na alfacene i gamagene. Alfageni stabiliziraju ferit, a gamageni austenit. Jedan od glavnih legirnih elemenata je krom koji poboljšava otpornost na lokalnu koroziju stvarajući pasivni film bogat kromom. Iako je poželjan legirni element, ako ga ima previše potiče stvaranje intermetalnih faza kao što je sigma-faza. Minimalni udio kroma u dupleks čelicima je 20 %. Krom uz molibden i niobij stabilizira ferit. Molibden poboljšava otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procijepu u kloridnim uvjetima. S druge strane imamo grupu legirnih elemenata koji stabiliziraju austenit,

a to su nikal, ugljik, dušik i bakar. Udio nikla direktno ovisi o udjelu kroma. U slučaju da je povećan udio nikla bit će povećana feritna transformacija u intermetalne faze u temperaturnom rasponu od 650 °C do 950 °C. Nikal ubrzava formaciju alfa prim faze i poboljšava korozijsku postojanost, ali se primarno koristi za kontroliranje omjera austenita i ferita. Dušik ima više efekata na nehrđajuće čelike. Poboljšava otpornost na rupičastu koroziju, potiče stvaranje austenitne faze i poboljšava čvrstoću. Preporučeni udio dušika je između 0,1 % i 0,23 %. Mangan se koristi kao stabilizator austenitne faze. Njegovo djelovanje pomiče temperaturu formiranja sigma-faze i smanjuje brzinu formacije. Pozitivno djeluje na abraziju i umor dupleks čelika. Dodatak bakra poboljšava otpornost prema neoksidnim otopinama kao što je sumporna kiselina. Dodatak bakra ograničen je na 2 % zbog toga što veći udio smanjuje mogućnost tople oblikovljivosti i povećava precipitacijsko očvršnuće. Volfram povećava otpornost na rupičastu koroziju i pomaže u stvaranju pasivnog filma. Također povećava otpornost na koroziju u procijepu kod kloridnih otopina. Udio volframa ne smije biti veći od 2 % jer kod povišenih temperatura potiče precipitaciju intermetalnih faza i sekundarnog austenita kod zavarivanja. Dodatak silicija također poboljšava otpornost prema rupičastoj i napetosnoj koroziji. Ne dodaje ga se više od 1 % jer potiče stvaranje sigma-faze. Udio ugljika je kod većine dupleks čelika ograničen na 0,02 % do 0,03 % kako bi se spriječila precipitacija kromovih karbida. Sumpor i fosfor se također mogu naći u malim količinama. Slika 7 prikazuje djelovanje legirnih elemenata na stvaranja intermetalnih faza, nitrida i karbida [5].



Slika 9. Utjecaj temperature i legirnih elemenata na raspodjelu faza [6]

Slika 9 prikazuje kako temperatura i udjeli pojedinih legirnih elementa utječu na pojavu asutenita i ferita. Na slici se može vidjeti kako krom i molibden potiču i stabiliziraju feritnu fazu, a nikal, mangan i dušik austenitnu fazu.

2.4. Svojstva

Dupleks čelici imaju mnogo bolja mehanička svojstva od austenitnih i feritnih čelika, tablica 4. Kao i kod drugih čelika mehanička svojstva ovise o veličini i obliku kristalnih zrna. Kod dupleks čelika svojstva ovise i o omjeru austenitne i feritne faze. Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće ovise i o načinu proizvodnje. Drugačije su vrijednosti kod hladno valjanih, kovanih i toplo valjanih čelika. Glavna karakteristika dupleks čelika je visoka vrijednost konvencionalne granice razvlačenja na sobnoj temperaturi, čak dvostruko veća od austenitnih čelika. Vrijednost vlačne čvrstoće je također visoka, dok istezljivost iznosi visokih 25 %. Kombinacija ovih svojstava omogućuje proizvodnju tanjih dijelova nego kod austenitnih čelika. Svojstva dupleks čelika najviše ovise o omjeru ferita i austenita [5], [8].

Tablica 4. Svojstva nekih dupleks čelika [5], [11]

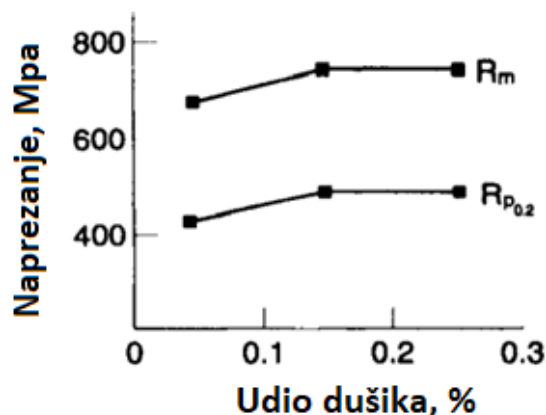
Oznaka	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A, %	Tvrdoća, HV
X3CrNiMoN27-5-2	450	690	25	303
X2CrNiMoN25-7-3	485	690	20	292
X2CrNiMoN22-5-3	450	620	25	290
X3CrNiMoCuN26-6-3-2	550	760	15	263
X2CrNiMoN25-7-4	550	795	15	270

Visoke vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće rezultat su više istovremenih mehanizama [5]:

- intersticijskog očvrnuća (C, N)
- substitucijskog očvrnuća (Cr, Ni, Mo...)
- naprezanja inducirano kontrakcijom faza tijekom hlađenja
- očvrnuća zbog feritne faze.

Uz kombinaciju ovih mehanizama ne smije se zanemariti ni uloga dušika. Povećanje udjela dušika potiče intersticijsko očvrnuće austenita do točke gdje postaje čvršći od ferita. Kad je

udio dušika manji od 0,1 % austenit ima nižu granicu razvlačenja od ferita, dok kod udjela dušika većeg od 0,2 % ima višu granicu razvlačenja, slika 10 [5].



Slika 10. Utjecaj dušika na R_m i $R_{p0.2}$ [5]

Osim usmjerenja zrna nastalih zbog obrade deformiranjem, utjecaj na svojstva ima i toplinska obrada. Omjer austenita i ferita ovisi o temperaturi s koje se hladi dupleks čelik. Dupleks čelici su ograničeni na primjenu do 315 °C zbog mogućnosti pojave krhkosti 475 [12].

Mehanička svojstva dupleks čelika [12]:

- tvrdoća od 250 HV do 350 HV
- mikrotvrdoća: austenit oko 300 HV 0,02, ferit od 300 do 500 HV 0,002
- vlačna čvrstoća od 700 do 1100 MPa
- granica razvlačenja od 500 do 800 MPa
- udarni rad loma (KV) do 170 J.

Dupleks čelici imaju sličan koeficijent toplinskog rastezanja kao i ugljični čelici što omogućuje njihovo jednostavno i dobro zavarivanje s ugljičnim čelicima.

Dupleks nehrđajući čelici, kao što im i samo ime kaže, izuzetno su otporni na korozijsko djelovanje. Korozijska postojanost uz dobra mehanička svojstva pruža im prednost pred drugim nehrđajućim čelicima. Zbog visokog udjela Cr, Mo i N otporni su na rupičastu koroziju. Zavarivanjem se često gubi korozijska postojanost jer se izlučuju kromovi karbidi po granicama zrna. Dupleks čelici imaju i dobru otpornost prema napetosnoj koroziji kao i prema interkristalnoj koroziji zbog malog udjela ugljika [12], [13].

2.5. Zavarivanje dupleks čelika

Zavarivanje dupleks čelika zahtjevan je proces jer se ne smije narušiti korozijska postojanost samog čelika. Dodatni materijal ne mora nužno biti identičnog sastava kao i osnovni materijal nego čak može imati i povećan udio nekih legiranih elemenata kao što su nikal, molibden i krom. U odabiru dodatnog materijala mora se zadržati korozijska postojanost i ne smije doći do pukotina uslijed zavarivanja ili nakon hlađenja. Mikrostruktura zavarenog materijala bit će različita od osnovnog materijala. Uslijed zavarivanja dolazi do smanjenja udjela austenita jer prilikom ponovnog zagrijavanja dolazi do smanjenja udjela dušika i nikla i potiče se stvaranje feritne faze. Zbog tog zavarivači kako bi zadržali austenitno-feritnu mikrostrukturu koriste dupleks čelik s većim udjelom austenitne faze dok se za dodatni materijal koriste legure s 2 % - 4 % većim udjelom nikla [5].

Odabir metode zavarivanja ovisi o više faktora, ali generalno je cilj postići zadovoljavajući zavar sa što većom produktivnošću. Općenito sve metode koje se koriste za zavarivanje nehrđajućih čelika koriste se i za zavarivanje dupleks nehrđajućih čelika. Zavarivanje s malom ulaznom energijom i bez dodatnog materijala nije pogodno ukoliko se neće provesti toplinska obrada [7].

Metode zavarivanja dupleks čelika [7]:

- elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (eng. *Tungsten Inert Gas* - TIG)
- elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (eng. *Metal Inert Gas* - MIG)
- elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina (eng. *Metal Active Gas* - MAG)
- plinsko zavarivanje
- zavarivanje s visokim unosom energije
- lasersko zavarivanje
- elektrootporno zavarivanje.

Prilikom zavarivanja može doći do smanjenja udjela austenitne faze, do pojave pukotina i do formiranja intermetalnih faza [7].

2.6. Primjena

Dupleks nehrđajući čelici imaju vrlo širok spektar uporabe u industriji. Primjenjuju se u kemijskoj, petrokemijskoj, papirnoj, naftnoj industriji i još u mnogim drugim industrijama. Posebno se koristi u industrijama gdje se treba osigurati prijenos tvari pod tlakom jer imaju dobra mehanička svojstva i korozivnu postojanost. U naftnoj industriji se koriste za izradu silosa, cijevi i spremnika za naftu. Svoju ulogu imaju i u industrijama gdje se koriste kloridni mediji zbog svoje korozivne postojanosti. Koriste se i pri izradi armature, postrojenja za desalinizaciju, za izradu mostova, kemijskih spremnika i bojlera, slika 11 i slika 12 [6].



Slika 11. Armatura proizvedena od dupleks čelika [6]

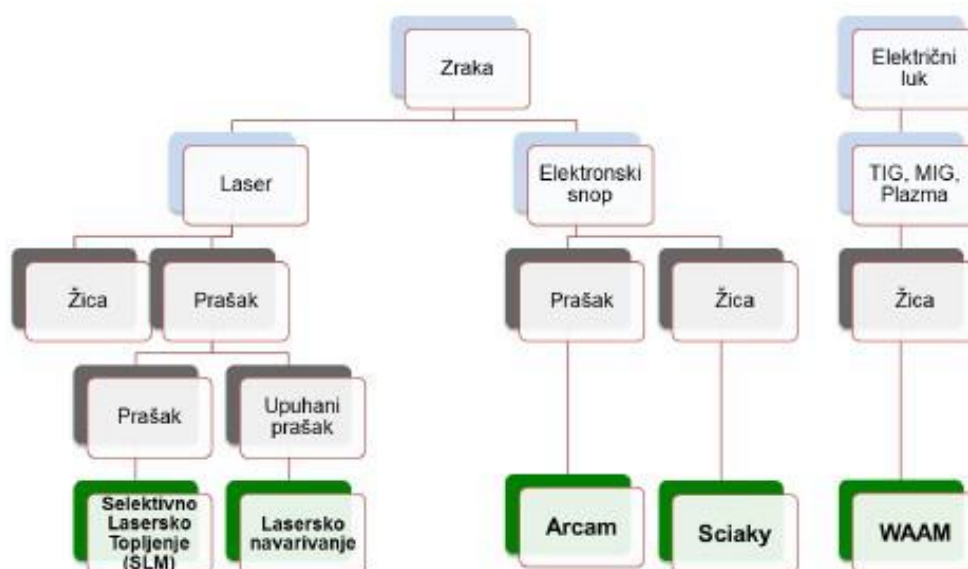


Slika 12. Silosi [6]

3. ADITIVNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM

Aditivna proizvodnja (eng. *Additive Manufacturing* - AM) je proces koji se temelji na izradi proizvoda slaganjem materijala sloj po sloj. Većina materijala u aditivnoj proizvodnji dolazi u praškastom obliku ili u obliku žice. Aditivna proizvodnja električnim lukom (eng. *Wire and Arc Additive Manufacturing* - WAAM) je tehnologija koja se temelji na zavarivanju i aditivnoj proizvodnji. Materijal se dobavlja u obliku žice koja se navaruje. Posebno je zanimljiva mogućnost upotrebe dupleks čelika koji se teško strojno obrađuju [14].

Aditivna proizvodnja s dobavljanjem žice dijeli se na tri skupine: lasersko zavarivanje, zavarivanje električnim lukom i zračenje elektronskim snopom, slika 13. Najpopularnija metoda je zavarivanje laserom zbog svoje preciznosti [15].



Slika 13. Podjela aditivnih tehnologija za metale [16]

3.1. Aditivna proizvodnja

Prvi oblik izrade proizvoda „sloj po sloj“ počeo se razvijati tijekom 80-ih godina prošlog stoljeća pod nazivom brza izrada prototipova (eng. *Rapid Prototyping* - RP) i koristio se za izradu modela i prototipova proizvoda. Brza izrada prototipova je jedan od prvih procesa aditivne proizvodnje. Glavna prednost aditivne proizvodnje je izrada modela zahtjevne geometrije, kalupa i alata. U aditivnoj proizvodnji je velika prednost ušteda materijala u odnosu na konvencionalne postupke proizvodnje. Područje primjene je široko, a najviše se primjenjuje u automobilskoj industriji, medicini i u proizvodnji elektronike [17], [18].

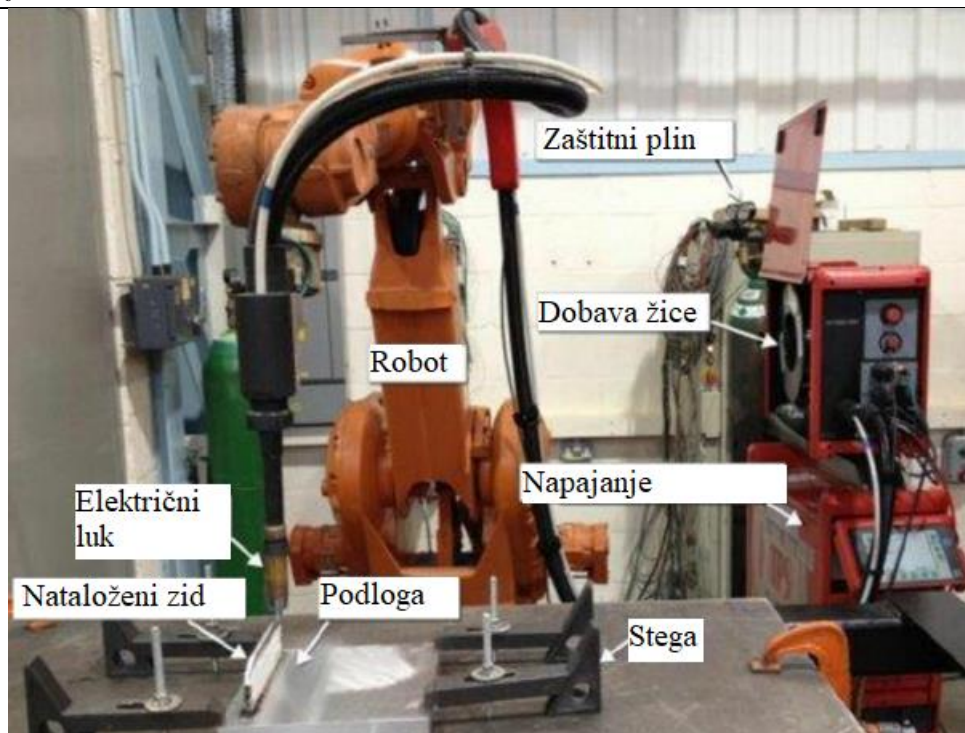
Prvi korak aditivne proizvodnje je izrada 3D modela koji se sprema u STL datoteku (eng. *Standard Tessellation Language*) te se iz STL datoteke sprema u AMF datoteku (eng. *Additive Manufacturing File*) koja uz STL čini osnovu za rezanje u slojeve. AMF datoteka predstavlja objekte raspoređene u vektore. Objekti su opisani kao mreža trokuta koja povezuje skupinu točaka. AMF datoteka može opisati materijal. Nakon što se podese parametri stroja slijedi izrada modela, slika 14 [17].



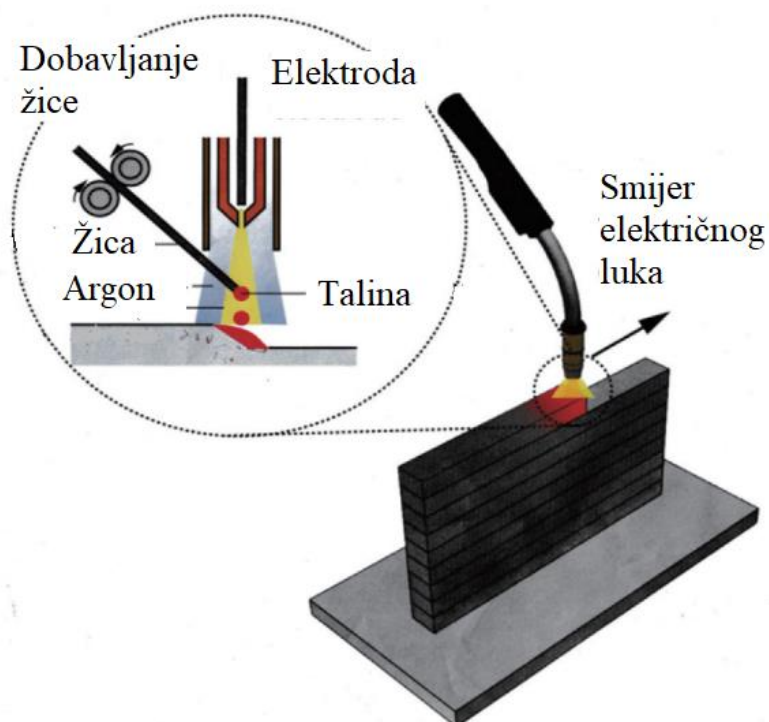
Slika 14. Faze aditivne proizvodnje [17]

3.2. WAAM postupak

Slika 15 prikazuje jednostavni WAAM sustav koji se sastoji od dobave žice i napajanja, robota i zavarivačkog aparata. Kao i kod svake druge aditivne proizvodnje kreće se sa dizajniranjem 3D modela. Zatim se model pretvara u neki standardni format kao STL iz kojeg se izvlače 2D slojevi pomoću kojih se određuje putanja zavarivanja. Uz ovaj korak određuju se i parametri zavarivanja (brzina, napon i jakost struje). Uz određenu putanju alata i parametre zavarivanja kreće izrada modela. Prvi sloj se nanosi na podlogu, a svaki slijedeći sloj na prethodni, slika 16. Nakon izrade slijedi mehanička i toplinska obrada izratka [14].



Slika 15 WAAM sustav [14]



Slika 16. Shema WAAM postupka [19]

Iako ovaj proces na prvu djeluje vrlo jednostavno on sadrži mnogo manjih međukoraka koji se moraju pažljivo proračunati i implementirati u sustav kako bi se postigla visoka kvaliteta izratka. Bilo kakva pogreška u procesu može uzrokovati nepravilnosti površine izratka, mikrostrukture i mehaničkih svojstava. Pri zavarivanju čelika i aluminija koristi se MIG ili MAG postupak zavarivanja, dok se kod zavarivanja titanija koristi TIG postupak [14].



Slika 17. Proizvodi proizvedeni WAAM postupkom [20]

Prednosti WAAM postupka [21]:

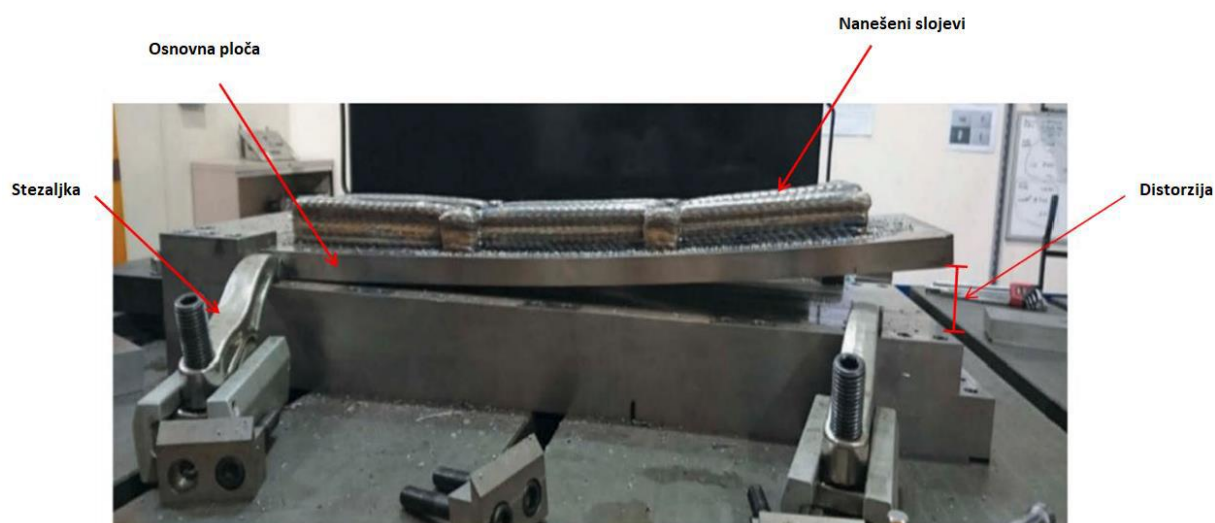
- ekonomična izrada dijelova od skupih materijala
- mogućnost automatizacije procesa
- proizvodnja dijelova složene geometrije, slika 17
- relativno niski troškovi
- ograničenja veličine dijelova ovise o veličini robotske stanice
- moguća strojna obrada tijekom procesa.

Nedostatci WAAM postupka [21]:

- zbog unosa topline dolazi do pojave zaostalih naprezanja i deformacije
- neujednačena geometrija zavara
- poroznost
- potrebna naknadna obrada odvajanjem čestica
- nedostatak iskustva
- parametri zavarivanja se teško prate
- visoko educirana radna snaga
- kod pojedinih materijala potrebna je zaštita inertnom atmosferom, pa se treba zaštititi šatorom.

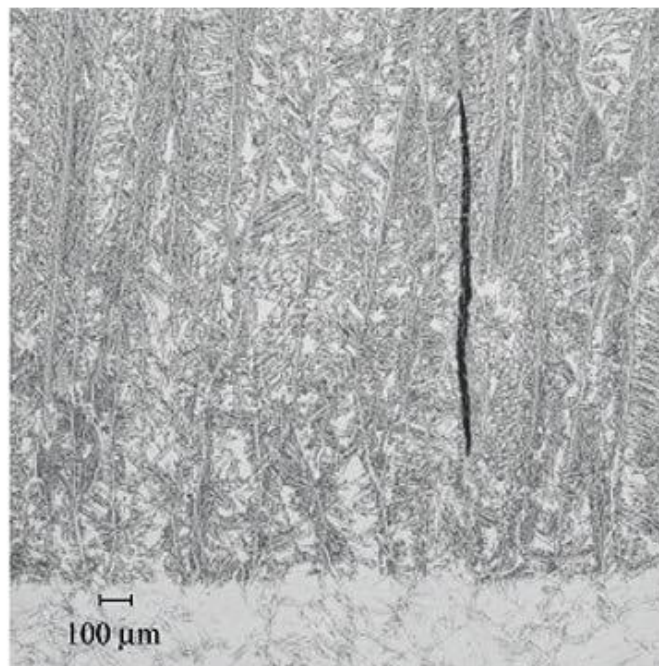
3.2.1. Greške pri zavarivanju

Prilikom velikog unosa topline nastaju zaostala naprezanja i deformacije podloge u smjeru nanošenja materijala. Do loma ili zaostalih naprezanja dolazi ako struktura ne može podnijeti deformiranje. Zaostala naprezanja i deformacije mogu se reducirati na nekoliko načina. Prvi od njih je simetrično slaganje. Materijal se taloži ravnomjerno i naizmjenično sa svake strane simetrije, dok se jedan dio hladi drugi se nanosi. Nedostatak ove metode je potreba za naknadnom obradom. Drugi način je „back to back“ slaganje. Jednostavno se upravlja unosima topline i izradak se toplinski obrađuje radi smanjenja zaostalih naprezanja. Sljedeći način je optimiranje orijentacije dijelova. Cilj je dobiti što kraće slojeve taloženja, jer su kod njih manje deformacije i zaostala naprezanja. Zadnji način je visokotlačno valjanje. Koristi se za postizanje optimalne mikrostrukture i uklanjanje zaostalih naprezanja. Nedostatak je taj što se može primjenjivati samo na jednostavnim izradcima [21].



Slika 18. Deformacije nastale uslijed velikog unosa topline [9]

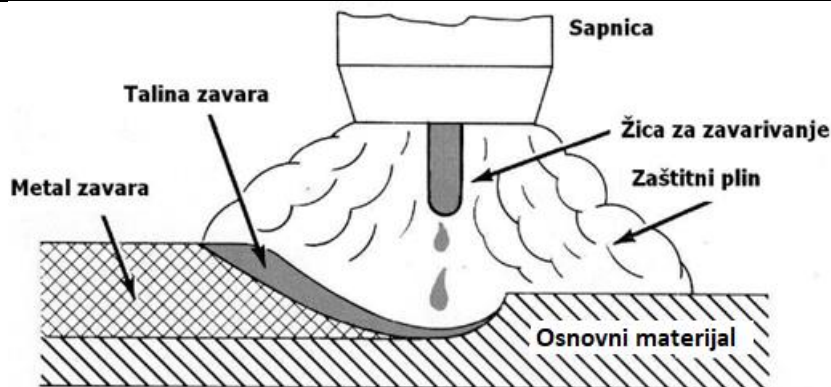
Još neke greške koje se javljaju pri zavarivanju su: poroznost, pukotine, ugorine i geometrijske nepravilnosti, slika 18 i slika 19. Poroznost nastaje zbog: nedovoljnog protoka zaštitnog plina, niske čistoće zaštitnog plina, pogrešnih parametara, prevelike brzine zavarivanja i nečistoća u materijalu. Ugorine nastaju zbog: prevelikih struja zavarivanja, prevelike brzine zavarivanja, pogrešnog kuta zavarivanja, neodgovarajućeg kemijskog sastava materijala i nedovoljnog dodavanja dodatnog materijala. Geometrijske greške nastaju uslijed prevelike brzine zavarivanja [16].



Slika 19. Pukotina u zavaru [7]

3.3. Zavarivanje MIG/MAG postupak

GMAW (eng. *gas metal arc welding*) je postupak zavarivanja električnim lukom u zaštitnom plinu, a MIG je oznaka za zavarivanje u inernom plinu kao što je argon. Ovaj postupak zavarivanja koristi se kod raznih debljina zavara zbog jednostavnosti zaustavljanja i ponovnog početka procesa. Princip MIG/MAG zavarivanja je takav da se metalna žica dobavlja kroz zavarivački pištolj do mjesta zavara, zatim se uspostavlja električni luk između žice i osnovnog materijala, slika 20. Žica je ujedno i elektroda te se njezinim taljenjem nanosi dodatni materijal. Inertni zaštitni plin ne reagira s rastaljenim materijalom za razliku od aktivnog plina kod MAG postupka. Kako bi postupak bio uspješan potrebno je dobro podesiti parametre [22].



Slika 20. Shema postupka zavarivanja MIG/MAG [23]

Parametri MIG/MAG zavarivanja: brzina zavarivanja (mm/min), jakost struje (A), brzina dobave žice (m/min), napon električnog luka (V), visina električnog luka, slobodni kraj žice (mm), promjer žice (mm), nagib zavarivačkog pištolja ($^{\circ}$), induktivitet (H), protok plina (l/min) i vrsta plina. Ovisno o parametrima zavarivanja određuje se i način prijenosa metala. Postoji nekoliko načina prijenosa metala: prijelaznim lukom, štrcajućim lukom, kratkim spojevima i impulsnim zavarivanjem [16], [23].

Zavarivački luk je električno pražnjenje između dvije elektrode. Zavarivačka struja prelazi s elektrode na podlogu preko ioniziranog plina. Energija koja se oslobađa tim procesom prelazi u toplinu koja tali elektrodu. Tijekom cijelog procesa treba se osigurati konstantan prinos energije kako bi se proces odvijao ravnomjerno. Luk ima dvije funkcije. Prva je taljenje materijala, a druga je prijenos materijala na mjesto zavara [22].

Prednosti MIG/MAG postupka [22], [24]:

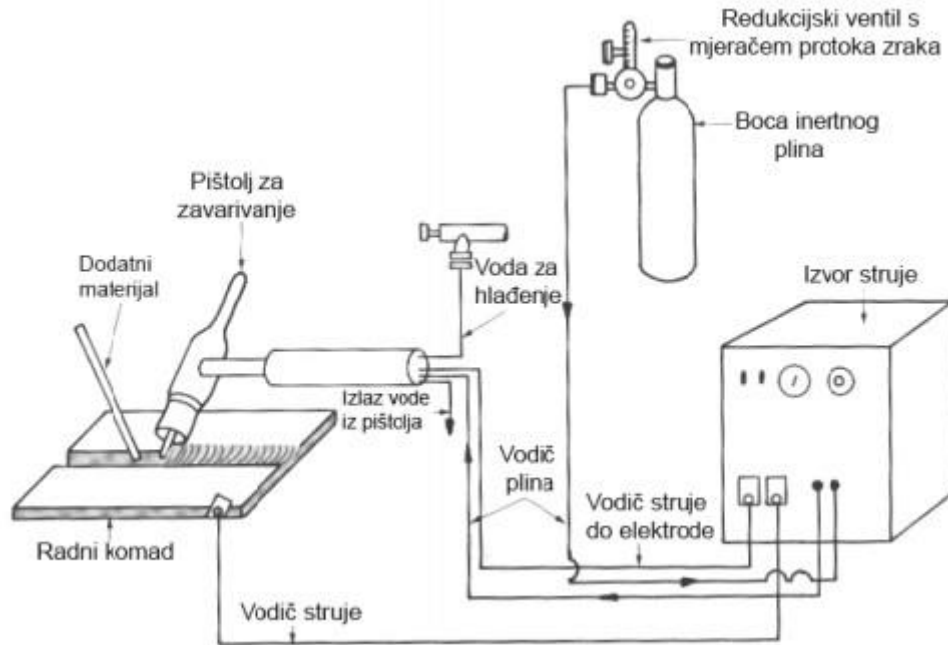
- kontinuirano dopremanje žice koje omogućuje zavarivanje dugih zavara bez da se prekida električni luk
- postupak se lako robotizira
- visoka proizvodnost
- ne stvara se troska
- široka primjena
- može se koristiti na terenu, u radionici i u svim položajima
- može se zavarivati većina metalnih materijala, različitih debljina
- može se koristiti i za lemljenje
- mogu se zavarivati i materijali koji imaju prevučenu površinu.

Nedostatci MIG/MAG postupka [22], [24]:

- minimalna debljina lima za zavarivanje je 5 mm
- kompleksna i skupa oprema
- ograničenost zavarivačkog pištolja
- na otvorenom je potrebna zaštita od vjetra
- u slučaju pojave prskanja električnog luka, potrebna je naknadna obrada površine
- problem dobave žice kod pojedinih materijala.

3.4. Zavarivanje TIG postupak

Elektrolučni postupak zavarivanja u kojem se električni luk uspostavlja između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala naziva se TIG (eng. *Tungsten Inert Gas*), slika 21. Dodatni materijal dodaje se na mjesto uspostavljanja električnog luka i tali se. Kao i što samo ime kaže za zaštitu mjesta zavara koriste se inertni plinovi. Najčešće se koriste argon i helij ili njihove mješavine. Materijali koji se mogu zavarivati TIG postupkom su: aluminij i njegove legure, magnezij i njegove legure, nehrđajući čelici, bakar i njegove legure, titanij i njegove legure i nelegirani i niskolegirani čelici. Za zavarivanje dupleks čelika koristi se mješavina argona i 1-3 % dušika. Sam postupak se vrlo lako automatizira zbog čega je pogodan za WAAM postupak [16], [25].



Slika 21. Shema opreme za TIG postupak zavarivanja [16]

Prednosti TIG postupka [25]:

- moguće je zavarivanje gotovo svih metalnih materijala
- nema rasprskavanja kapljica
- moguće je zavarivanje u svim položajima
- zavarivanje u radionici i na terenu
- visoka kvaliteta zavara
- nema troske i isparavanja
- debljine zavarivanja od 1 do 6 mm (okvirno)
- brzina dodavanja dodatnog materijala je neovisna o energiji električnog luka
- mogućnost automatizacije.

Nedostatci TIG postupka [25]:

- nije isplativo za veće debljine
- otežan rad na otvorenom
- potrebna je kvalitetna priprema spoja i čista površina
- ovisnost o ljudskom faktoru
- cijena plina.

3.5. Primjena WAAM metode

WAAM metoda koristi se za izradu složenih dijelova. Većinom se koristi u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji. Također se koristi i u graditeljstvu za izradu jednostavnih mostova, slika 22. Jedna od glavnih prednosti ovog postupka je ušteda materijala jer nema potrebe za naknadnom strojnom obradom ili je ona minimalna. Zbog tog je izuzetno pogodna metoda za proizvodnju dijelova od titanija jer štedi materijal [26].



Slika 22. Most od nehrđajućeg čelika proizveden WAAM postupkom [27]

4. MJERENJE TVRDOĆE

Ispitivanje tvrdoće materijala je jedno od najčešće korištenih ispitivanja mehaničkih svojstava tehničkih materijala, a mjeri otpornost materijala prema prodiranju drugog znatno tvrđeg tijela. Tvrdoća je direktno povezana i s drugim mehaničkim svojstvima kao što su vlačna čvrstoća, abrazijsko trošenje i druga.

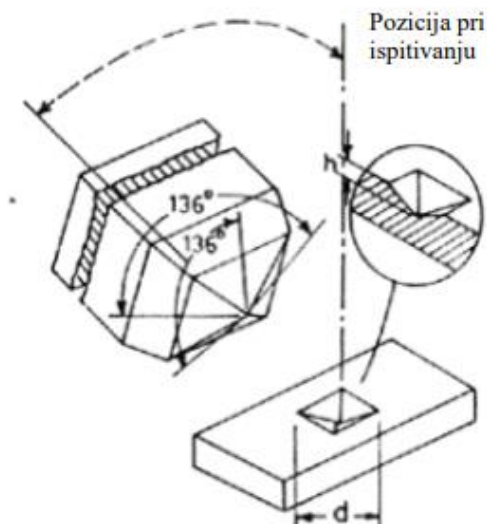
Tvrdoća se mjeri u dva koraka:

1. utiskivanje indentora u uzorak
2. određivanje karakterističnih dimenzija otiska (promjer, dijagonala ili dubina).

Ispitivanje tvrdoće ubraja se u nerazorna ispitivanja jer ne oštećuje previše površinu, a naknadnim brušenjem i poliranjem mogu se ukloniti otisci prethodnog mjerenja. Ispitivanje tvrdoće uglavnom ne zahtjeva izradu posebnih uzoraka za ispitivanje i uređaji su u pravilu jeftiniji i jednostavniji od drugih uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava. Tvrdoća se mjeri tako da se indenter utiskuje u materijal pod nekom određenom silom. Indentori mogu biti u obliku stošca, piramide ili kuglice, a izrađeni su od tvrdih materijala kao što su kaljeni čelik ili dijamant. Neke od najpopularnijih metoda mjerenja tvrdoće su Rockwell (stožac i kuglica), Brinell (kuglica) i Vickers (četverostrana piramida) [28], [29].

4.1. Vickers

Vickers je standardna metoda za mjerenje tvrdoće metala. Određivanje tvrdoće po Vickersu nastalo je pri otklanjanju nedostataka kod Brinellove metode, a to su ograničenost mjerenja i ovisnost iznosa tvrdoće o sili utiskivanja. Kod Vickersa su nedostaci uklonjeni tako što se koristi dijamantni indenter u obliku četverostrane piramide vršnog kuta 136° , slika 23 [28].



Slika 23. Indentor i otisak mjerenja kod Vickersove metode [28]

Matematička formula za izračun tvrdoće po Vickersu:

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

F označava silu utiskivanja, a d srednju vrijednost dijagonale otiska nakon rasterećenja. Uobičajene sile opterećenja iznose od 49 N do 980 N, ali kod Vickersove metode mogu se koristiti i niža opterećenja, tablica 5 [28].

Tablica 5. Vrijednosti sila koje se primjenjuju kod Vickersove metode [28]

Konvencionalna tvrdoća		Semi-mikrotvrdoća		Mikrotvrdoća	
Oznaka	Ispitna sila, N	Oznaka	Ispitna sila, N	Oznaka	Ispitna sila, N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,0981
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,10	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,20	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,30	HV 2	19,610	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,70	HV 3	29,420	HV 0,1	0,9807

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Cilj rada

Cilj rada je odrediti optimalni režim toplinske obrade nakon provedene karakterizacije uzoraka dupleks čelika proizvedenih aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom. Karakterizacija materijala uključivala je analizu mikrostrukture i mjerenje mikrotvrdoće Vickers metodom s četiri različita opterećenja (HV 0,2, HV 0,1, HV 0,05 i HV 0,02). Na temelju dobivenih rezultata odredit će se optimalni režim toplinske obrade.

5.2. Materijal za ispitivanje

Sva predviđena ispitivanja prevedena su na uzorcima koji su proizvedeni aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom. Uzorci su proizvedeni MAG postupkom zavarivanja, tj. zavarivanje električnim lukom u zaštitnom plinu. Dodatni materijal bio je dupleks čelik u obliku žice, a zaštitni plin bio je mješavina argona s 2 % dušika.

Tablica 6 prikazuje kemijski sastav žice dupleks čelika korištene kao dodatni materijal u proizvodnji navarenog uzoraka.

Tablica 6. Kemijski sastav žice dupleks čelika

Maseni udio elemenata, %											
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	S	P	N	Fe
0,009	0,37	1,63	8,76	22,80	3,15	0,05	0,028	0,001	0,013	0,1405	ostatak

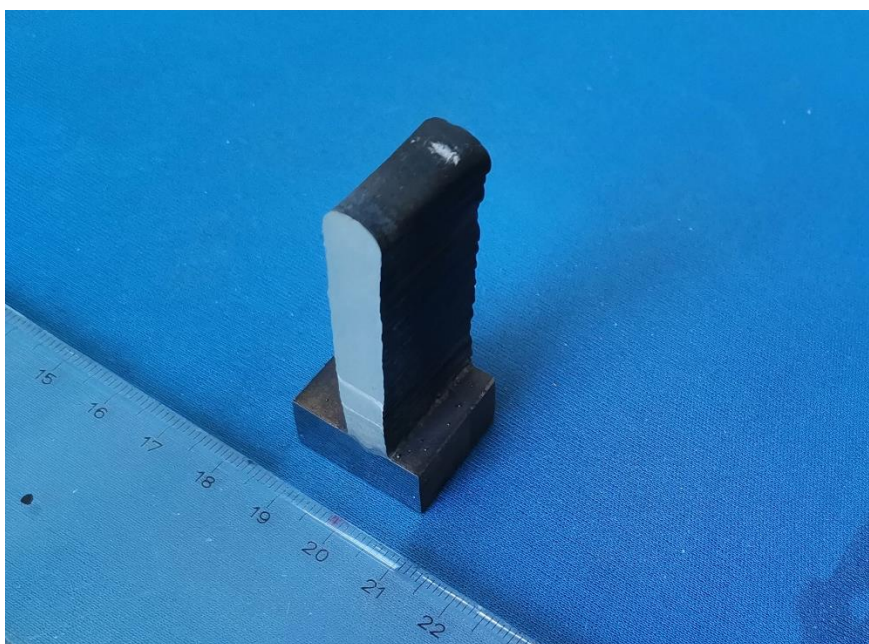
U samom postupku proizvodnje uzoraka žica se navarivala na podlogu od nehrđajućeg čelika. Dogovorene dimenzije zida iznosile su 140 mm (duljina) i 40 mm (visina).

Međuprolazna temperatura pri navarivanju zida iznosila je 150 °C.

Iz navarenog zida, slika 24, izrezano je šest dijelova koji su podvrgnuti različitim toplinskim obradama i iz kojih su kasnije izrezani uzorci za sva potrebna ispitivanja. Slika 25 prikazuje jedan takav izrezan dio.



Slika 24. Navareni zid dupleks čelika



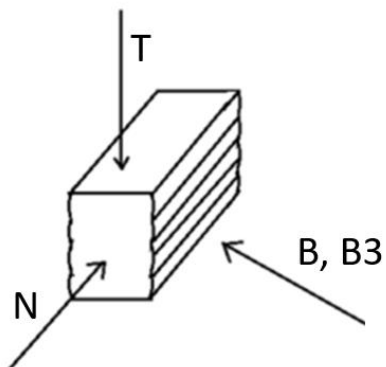
Slika 25. Dio izrezan iz navarenog zida

Izrezani dijelovi navarenog zida podvrgnuti su toplinskoj obradi kako slijedi:

- uzorak 1 - bez toplinske obrade
- uzorak 2 – žaren u komornoj peći na 1000 °C u trajanju od 60 min
- uzorak 3 - žaren u komornoj peći na 1050 °C u trajanju od 15 min
- uzorak 4 - žaren u vakuumskoj peći na 1100 °C u trajanju od 15 min
- uzorak 5 - žaren u komornoj peći na 1100 °C u trajanju od 15 min
- uzorak 6 - žaren u komornoj peći na 1050 °C u trajanju od 60 min.

Nakon toplinske obrade iz zida su izrezani uzorci na kojima je dalje analizirana mikrostruktura i mjerena mikrotvrdoća. Iz svakog dijela zida izrezana su četiri uzorka koja su predstavljala nacrt (N), tlocrt (T) i dva bokocrta (B i B3).

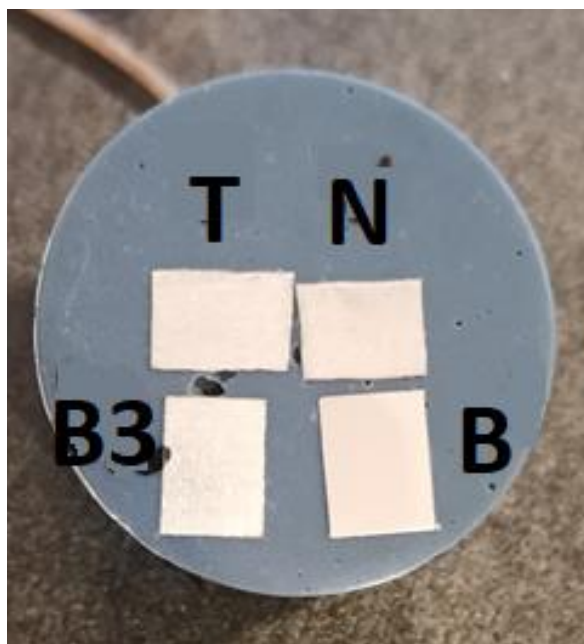
Slika 26 shematski prikazuje položaj navedenih uzoraka u zidu. Uzorci s oznakom B predstavljaju površinu udaljenu 0,5 mm od bočne plohe zida. Uzorci s oznakom B3 predstavljaju površinu udaljenu 3 mm od bočne plohe zida. Za potrebe ovog diplomskog rada analizirana je mikrostruktura i izmjerena mikrotvrdoća samo na uzorcima s oznakom B i B3.



Slika 26. Položaj uzoraka u navarenom zidu

5.3. Analiza mikrostrukture

Priprema uzoraka i analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Uzorci su prethodno zaliveni u polimernu masu. Slika 27 prikazuje uzorke B i B3 (kao i uzorke T i N) zalivene u istom metalografskom uzorku.



Slika 27. Metalografski uzorak

Površina uzoraka brušena je i polirana. Nakon toga provedena je analiza mikrostrukture u poliranom stanju. Radi lakšeg očitavanja dijagonala otisaka mjerenje mikrotvrdoće također je provedeno na poliranoj površini. Da bi se otkrila mikrostruktura materijala, površina uzoraka nagrižena je u otopini koja sadrži 15 % HCl i 85 % destilirane vode.

Slika 28 prikazuje nagrizanje uzoraka u navedenoj otopini.

Uzorci su bili uronjeni u otopinu dok se nisu dovoljno nagrizli. Navedena otopina nagriza zrna ferita, a zrna austenita ne nagriza. Zato su feritna zrna tamnija, a zrna austenita svjetlija kad se promatraju na svjetlosnom mikroskopu. Nagrižena površina uzoraka promatrana je na optičkom mikroskopu Olympus GX51, slika 29. Mikrostruktura je analizirana pri različitim povećanjima od 50 do 1000 ×. Osim kvalitativne napravljena je i kvantitativna analiza mikrostrukture pomoću programa ImageJ. Na svim uzorcima određen je maseni udio ferita i austenita jer je

njihov međusobni omjer od iznimne važnosti za korozivsku postojanost i mehanička svojstva dupleks čelika.

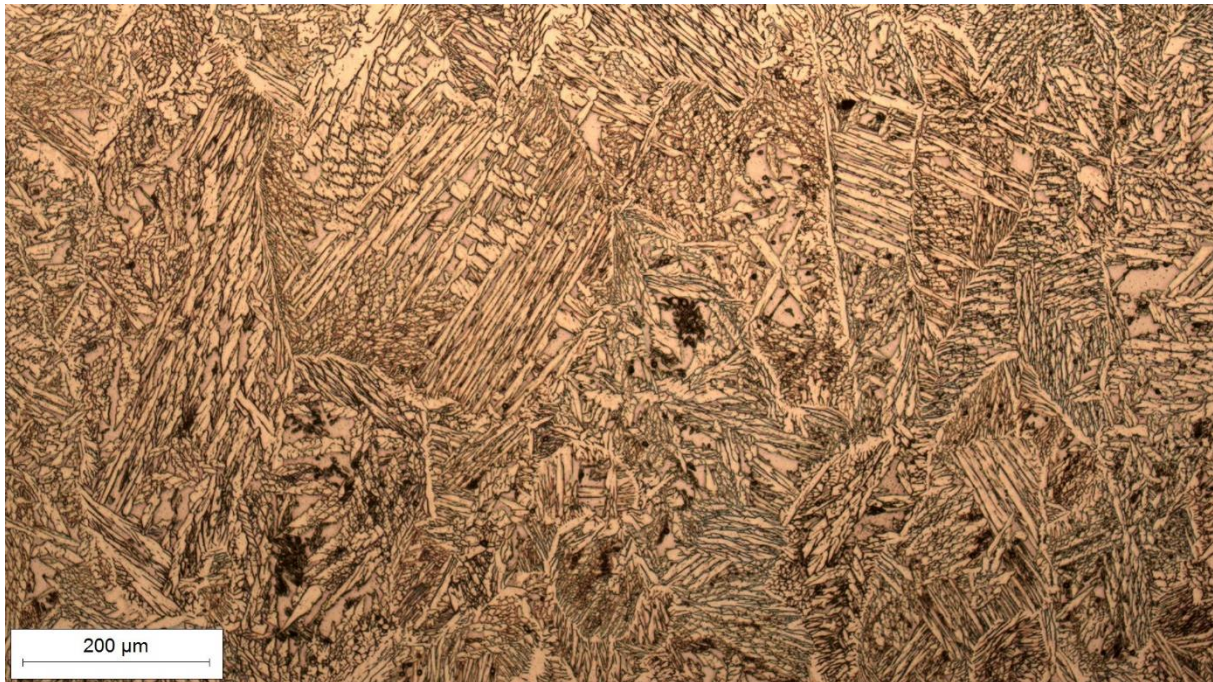


Slika 28. Nagrizanje uzoraka

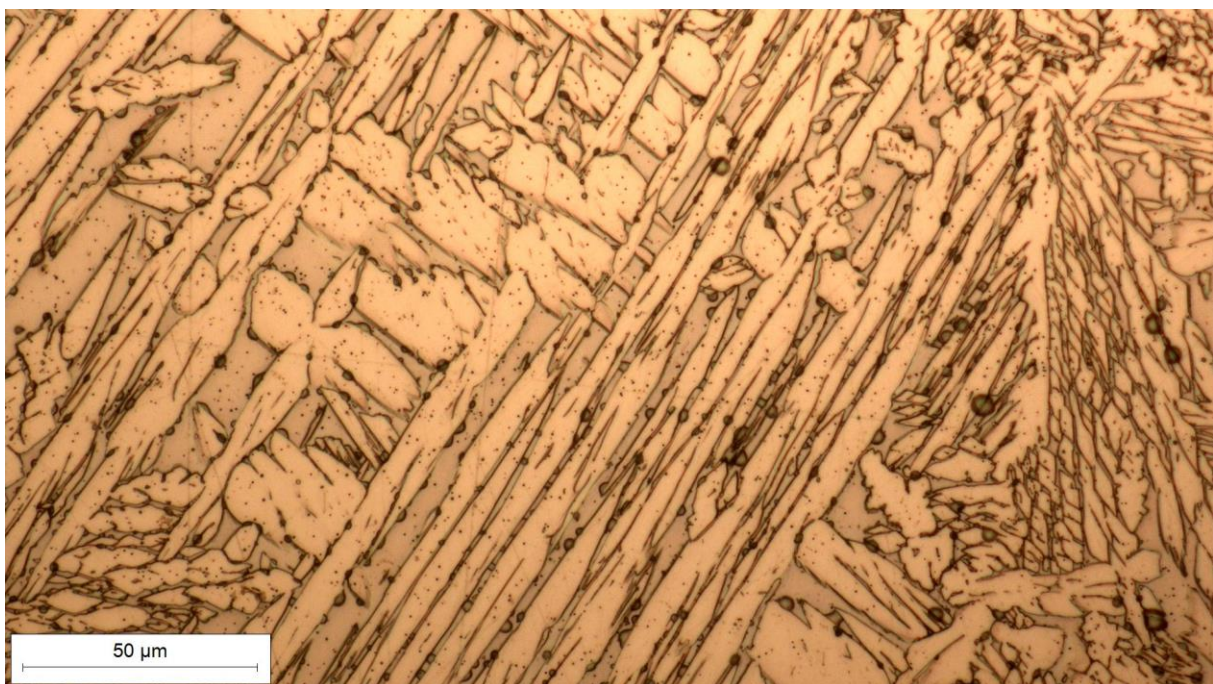


Slika 29. Olympus GX51

Na fotografijama koje slijede prikazana je mikrostruktura svih uzoraka snimljena pri povećanju od $100\times$ i $500\times$. Svjetlija faza je austenit, a tamnija ferit.

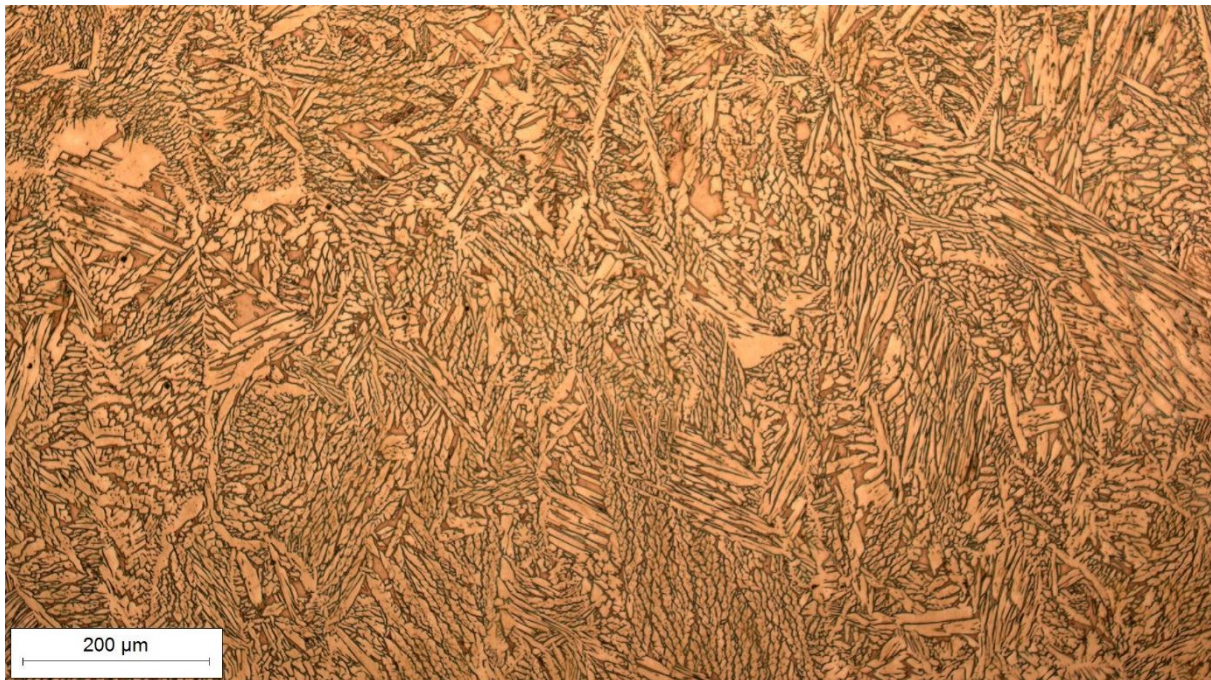


Slika 30. Mikrostruktura uzorka 1 B snimljena pri povećanju od $100\times$



Slika 31. Mikrostruktura uzorka 1 B snimljena pri povećanju od $500\times$

Mikrostruktura uzorka 1 B, koji nakon navarivanja nije toplinski obrađen, je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita u podjednakoj količini, slika 30 i slika 31. Ovaj tip mikrostrukture karakterističan je za metal zavara dupleks čelika. Pri većem povećanju u mikrostrukтури mogu se vidjeti sitni, homogeno raspoređeni precipitati nepoznate faze. Mjerenjem volumnih udjela utvrđeno je da austenita ima oko 48 %, a ostatak od oko 52 % čini ferit.

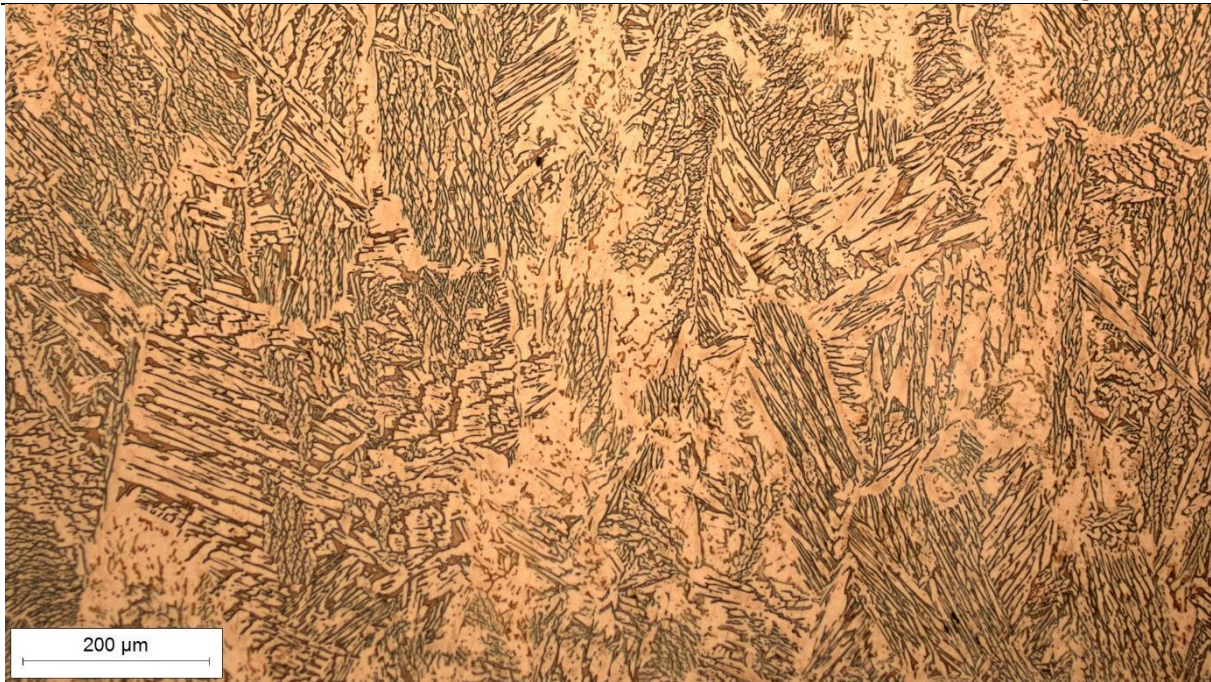


Slika 32. Mikrostruktura uzorka 1 B3 snimljena pri povećanju od 100×



Slika 33. Mikrostruktura uzorka 1 B3 snimljena pri povećanju od 500×

Mikrostruktura uzorka 1 B3, koji nakon navarivanja nije toplinski obrađen, je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita, slika 32 i slika 33. Ovaj tip mikrostrukture karakterističan je za metal zavara i neugnječenu dupleks strukturu. I bez mjerenja volumnih udjela vidi se da austenit prevladava, a nakon mjerenja utvrđeno je da ga ima oko 57 %, a ostatak od oko 43 % čini ferit.



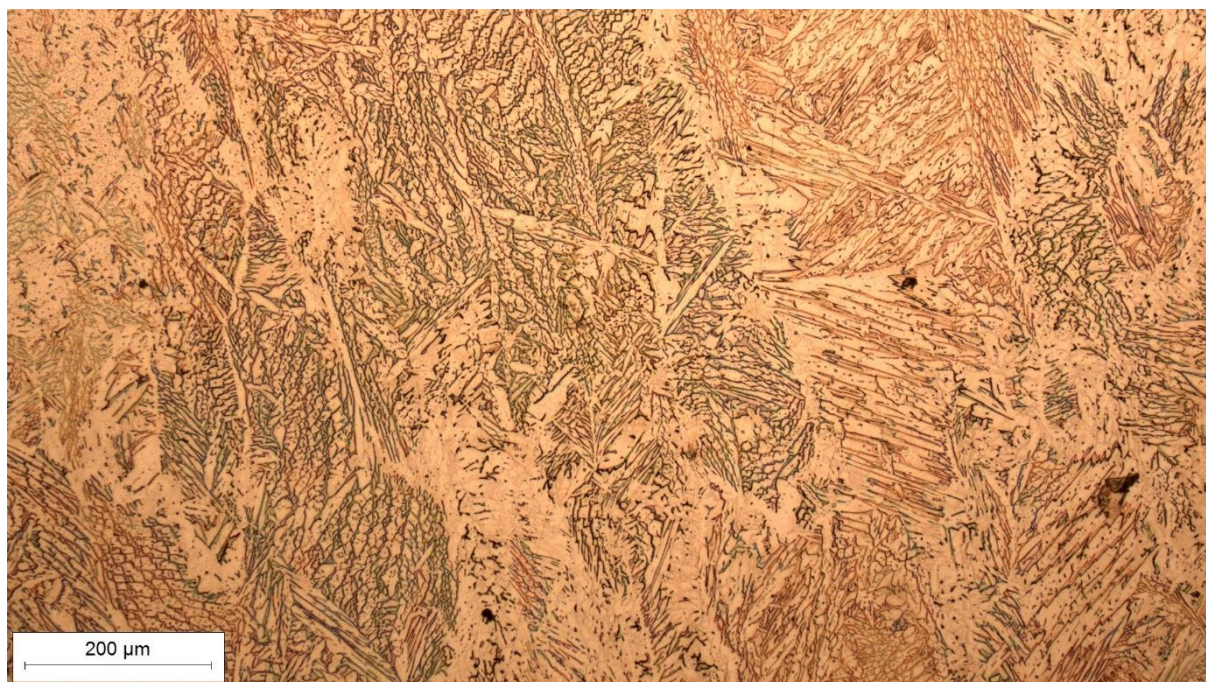
Slika 34. Mikrostruktura uzorka 2 B snimljena pri povećanju od 100×



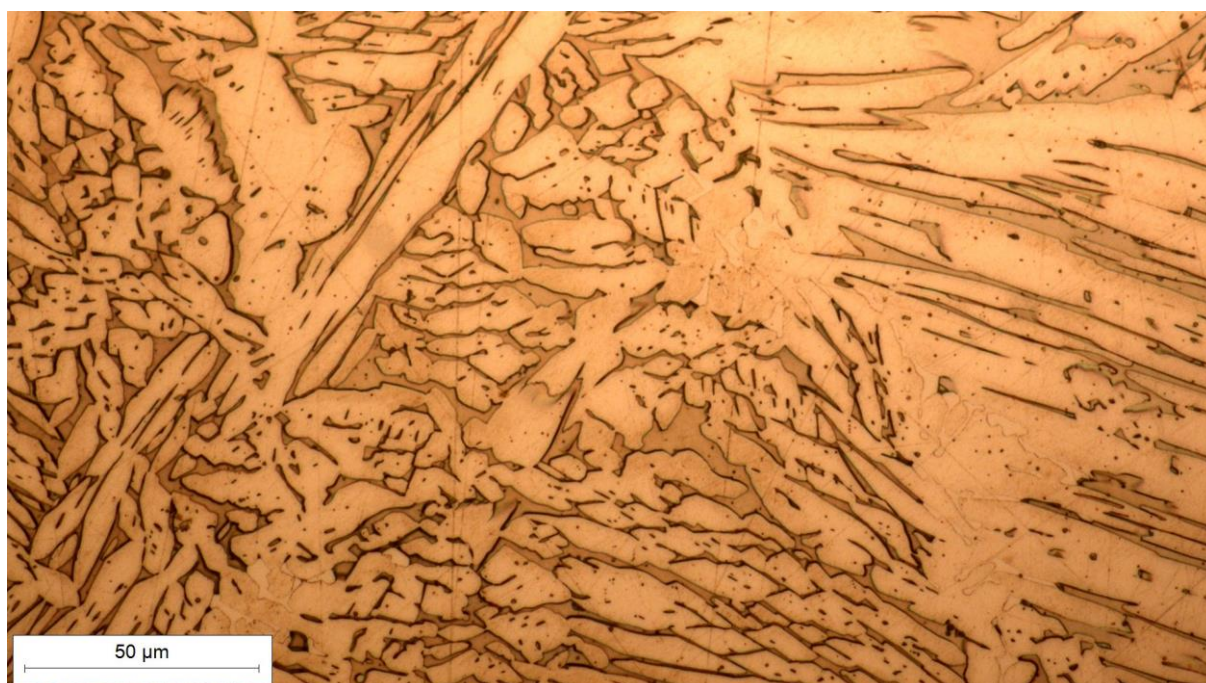
Slika 35. Mikrostruktura uzorka 2 B snimljena pri povećanju od 500×

Mikrostruktura uzorka 2 B je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita u podjednakoj količini, slika 34 i slika 35. Ovaj tip mikrostrukture karakterističan je za metal zavara dupleks čelika. Mjerenjem volumnih udjela utvrđeno je da austenita ima oko 55 %, a

ostatak od oko 45 % čini ferit. Ovaj uzorak je toplinski obrađen u komornoj peći. Žaren je na temperaturi od 1000 °C u trajanju od 60 min, a nakon toga je naglo hlađen u vodi.



Slika 36. Mikrostruktura uzorka 2 B3 snimljena pri povećanju od 100×



Slika 37. Mikrostruktura uzorka 2 B3 snimljena pri povećanju od 500×

Mikrostruktura uzorka 2 B3 je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita koji prevladava, slika 30 i slika 31. Ovaj tip mikrostrukture karakterističan je za metal zavara i neugnječenu dupleks strukturu. Mjerenjem volumnih udjela utvrđeno je da austenita ima oko 59 %, a ostatak od oko 41 % čini ferit. Uzorak 2 B3 je toplinski obrađen isto kao i uzorak 2 B.

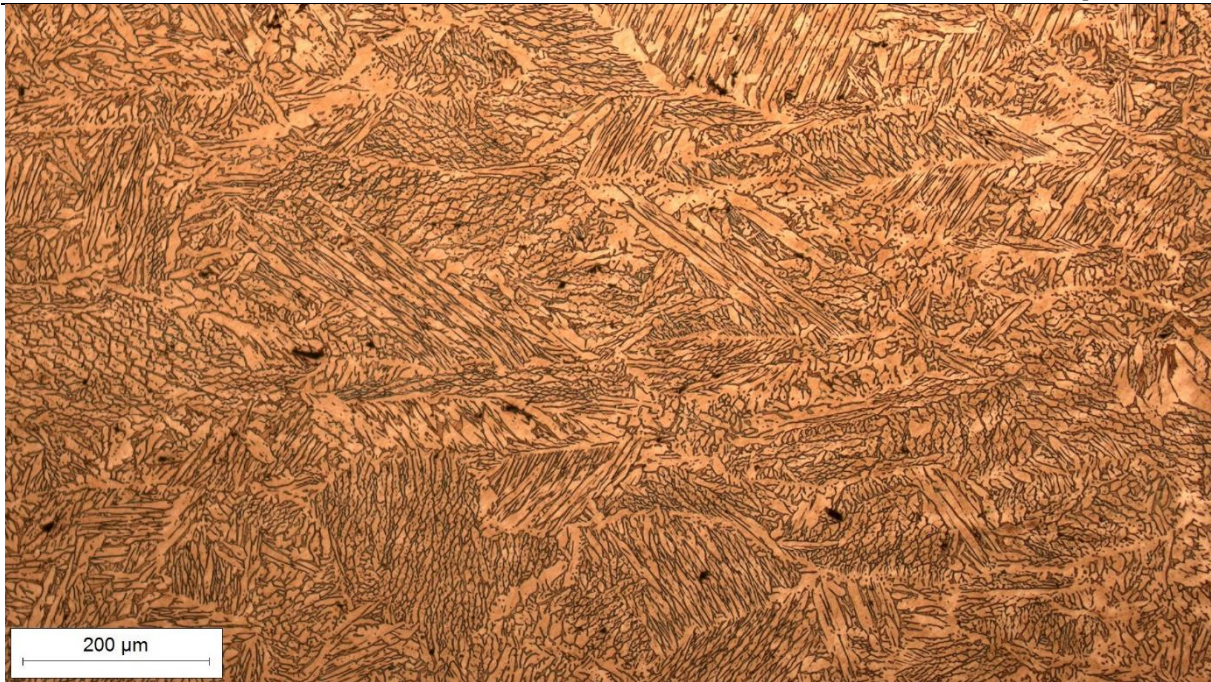


Slika 38. Mikrostruktura uzorka 3 B snimljena pri povećanju od 100×

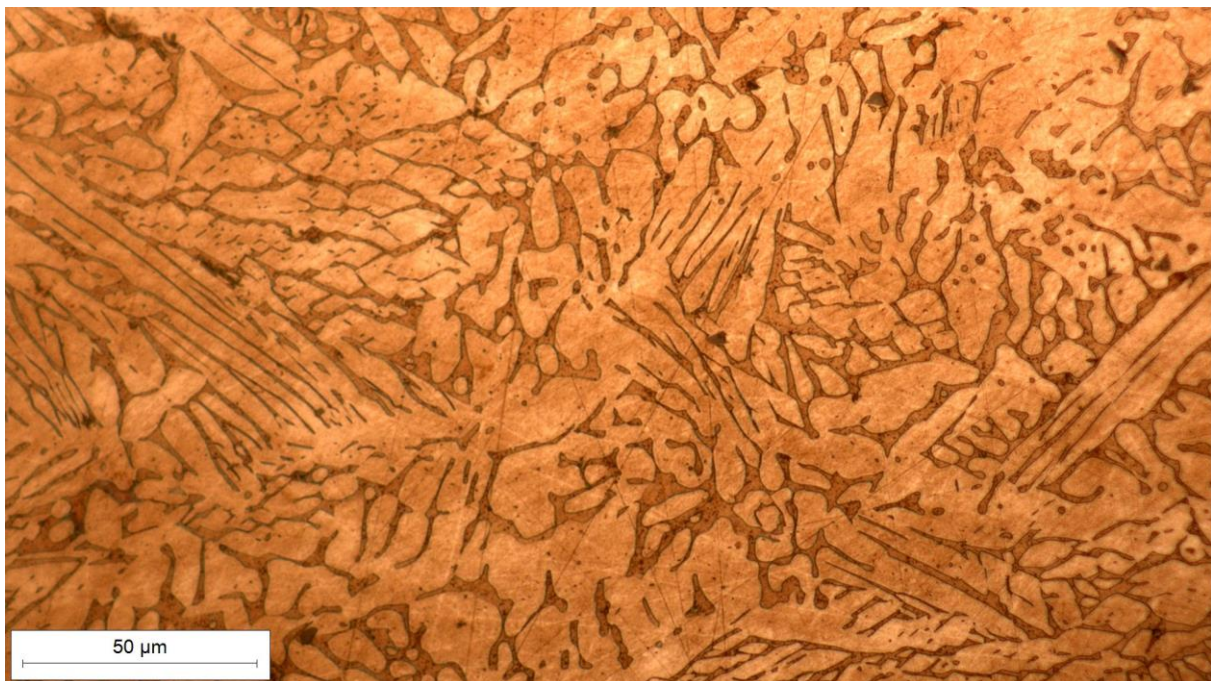


Slika 39. Mikrostruktura uzorka 3 B snimljena pri povećanju od 500×

Mikrostruktura uzorka 3 B je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita u podjednakoj količini, slika 38 i slika 39. Ovaj tip mikrostrukture karakterističan je za metal zavora dupleks čelika. Mjerenjem volumnih udjela utvrđeno je da austenita ima oko 55 %, a ostatak od oko 45 % čini ferit. Ovaj uzorak je toplinski obrađen u komornoj peći. Žaren je na temperaturi od 1050 °C u trajanju od 15 min, a nakon toga je naglo hlađen u vodi.



Slika 40. Mikrostruktura uzorka 3 B3 snimljena pri povećanju od 100×



Slika 41. Mikrostruktura uzorka 3 B3 snimljena pri povećanju od 500×

Mikrostruktura uzorka 3 B3 je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita koji prevladava, slika 40 i slika 41. Ovaj tip mikrostrukture karakterističan je za metal zavara dupleks čelika. Mjerenjem volumnih udjela utvrđeno je da austenita ima oko 59 %, a ostatak od oko 41 % čini ferit. Uzorak 3 B3 je toplinski obrađen isto kao i uzorak 3 B.



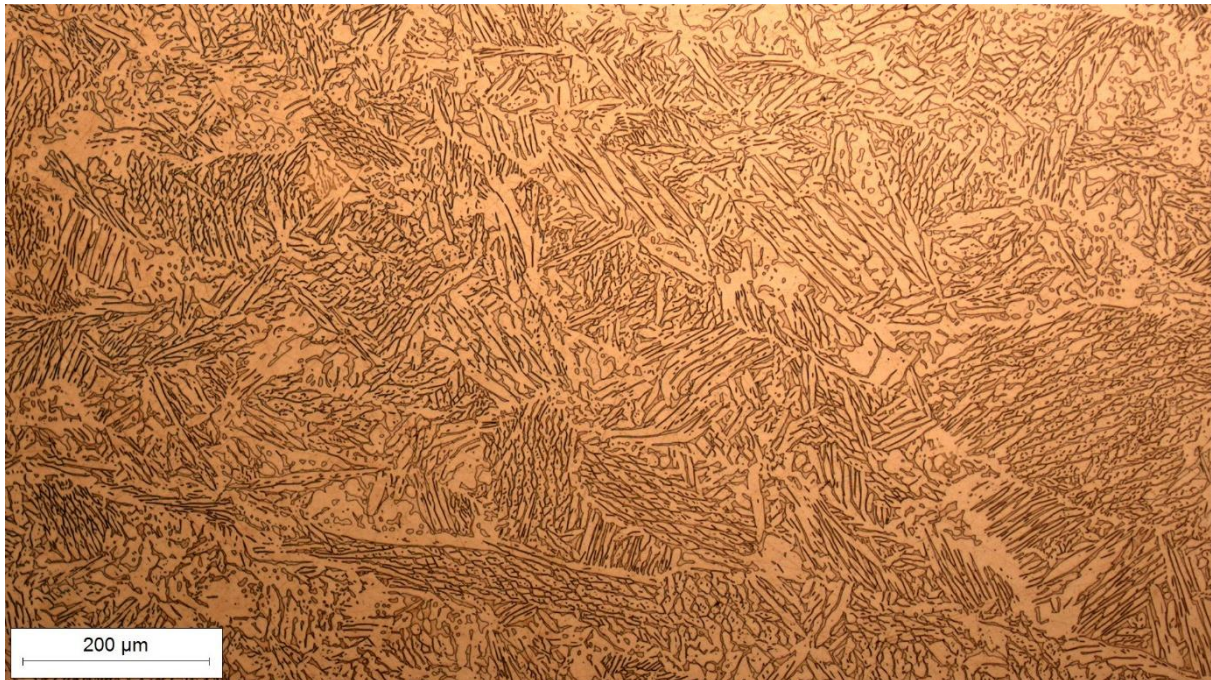
Slika 42. Mikrostruktura uzorka 4 B snimljena pri povećanju od 100×



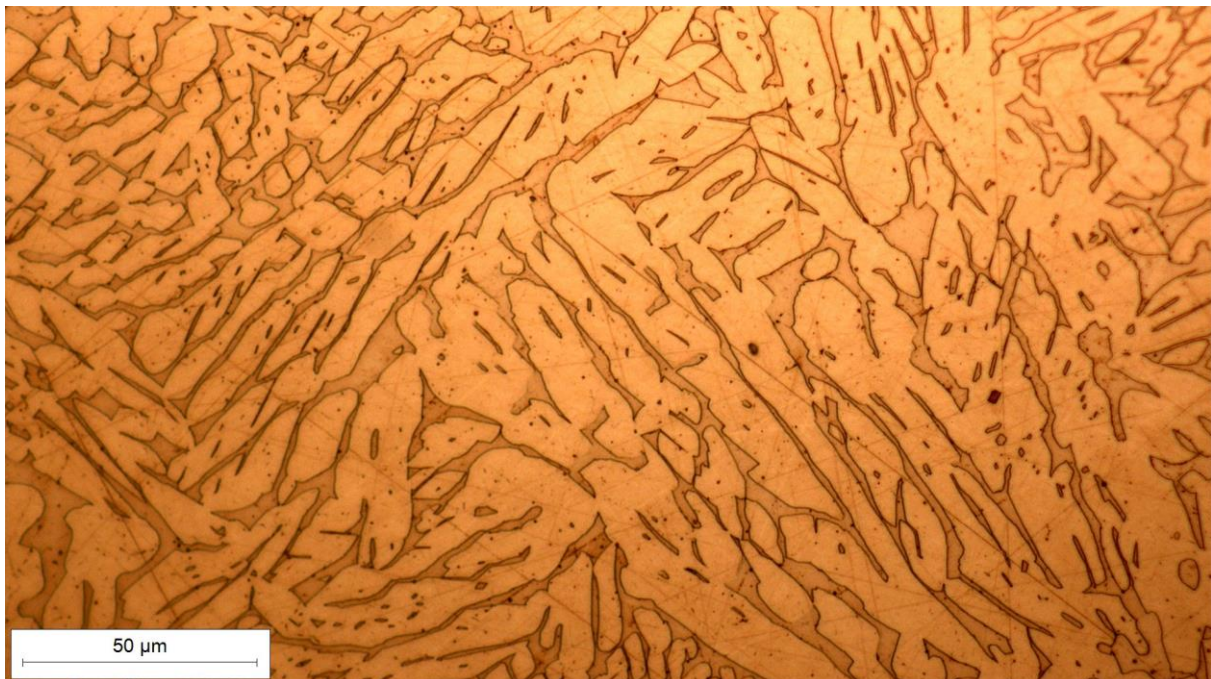
Slika 43. Mikrostruktura uzorka 4 B snimljena pri povećanju od 500×

Mikrostruktura uzorka 4 B je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita u kojoj prevladava, slika 42 i slika 43. Ovaj tip mikrostrukture karakterističan je za metal zavara

dupleks čelika. Mjerenjem volumnih udjela utvrđeno je da austenita ima oko 65 %, a ostatak od oko 35 % čini ferit. Ovaj uzorak je toplinski obrađen u vakuumskoj peći. Žaren je na temperaturi od 1100 °C u trajanju od 15 min, a nakon toga je naglo hlađen u vodi.



Slika 44. Mikrostruktura uzorka 4 B3 snimljena pri povećanju od 100×

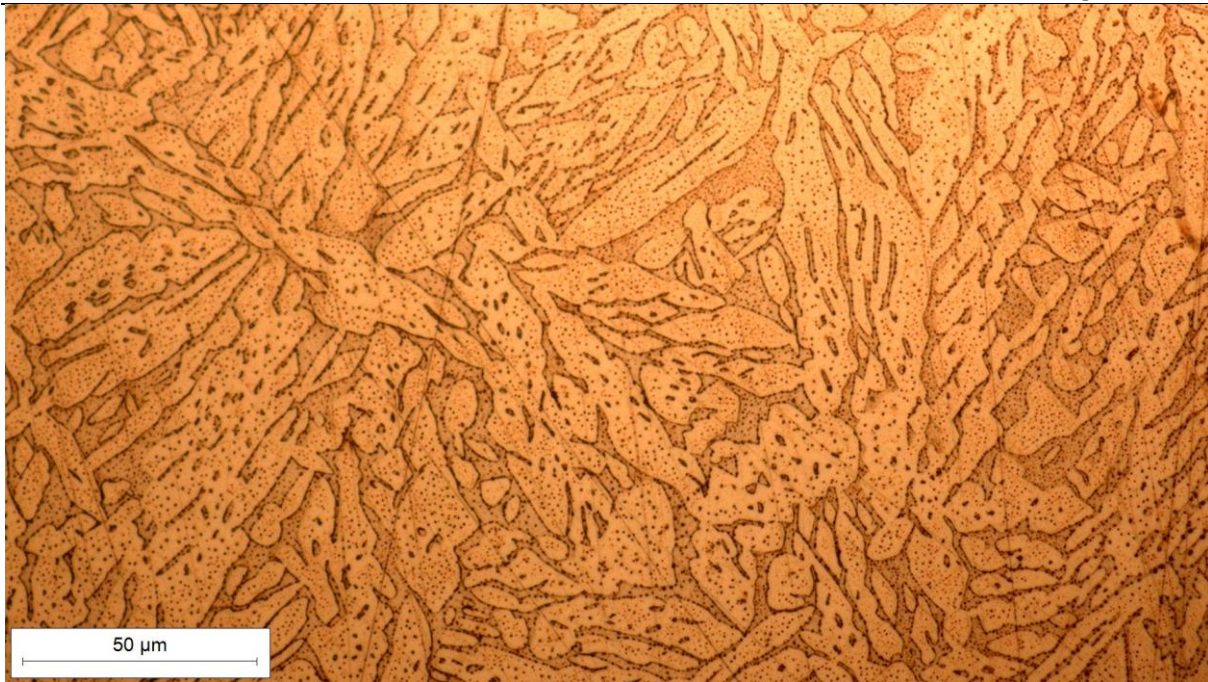


Slika 45. Mikrostruktura uzorka 4 B3 snimljena pri povećanju od 500×

Mikrostruktura uzorka 4 B3 je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita koji prevladava, slika 44 i slika 45. Ovaj tip mikrostrukture karakterističan je za metal zavara dupleks čelika. Mjerenjem volumnih udjela utvrđeno je da austenita ima oko 57 %, a ostatak od oko 43 % čini ferit. Uzorak 4 B3 je toplinski obrađen isto kao i uzorak 4 B.



Slika 46. Mikrostruktura uzorka 5 B snimljena pri povećanju od 100×

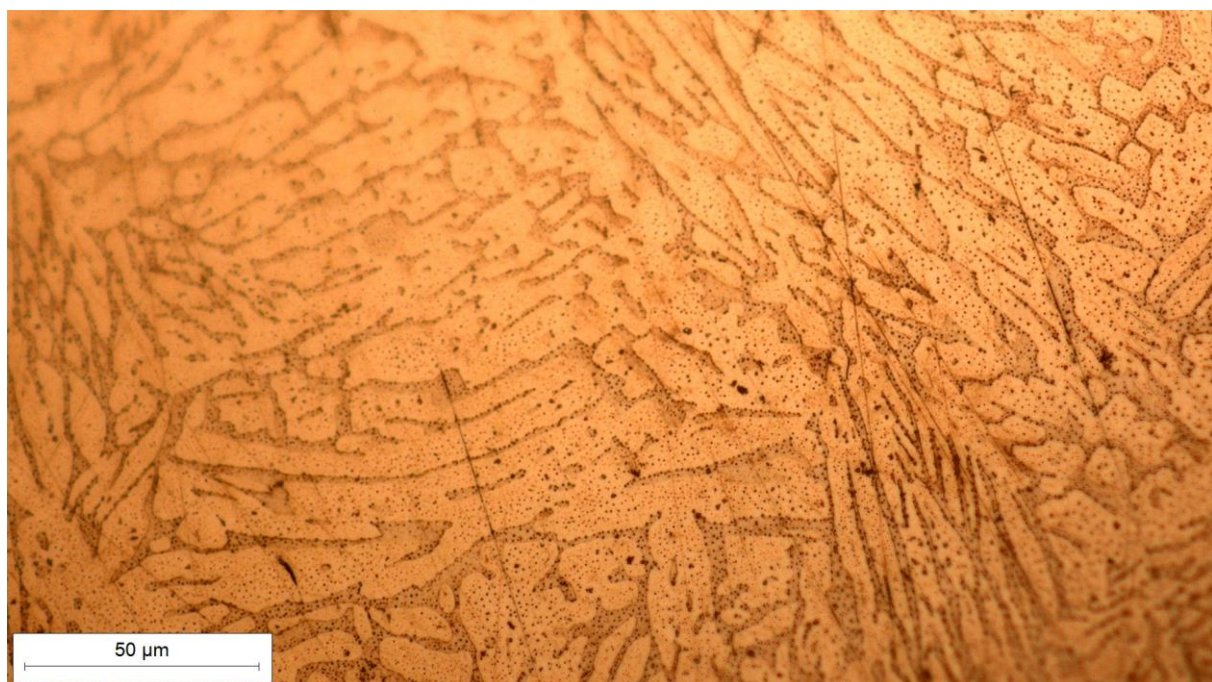


Slika 47. Mikrostruktura uzorka 5 B snimljena pri povećanju od 500×

Mikrostruktura uzorka 5 B je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita u podjednakoj količini, slika 46 i slika 47. Ovaj tip mikrostrukture karakterističan je za metal zavora dupleks čelika. Pri većem povećanju u mikrostrukтури mogu se osim ferita i austenita vidjeti sitne, homogeno raspoređene čestice koje bi mogle biti precipitati nepoznate faze. Mjerenjem volumnih udjela utvrđeno je da austenita ima oko 54 %, a ostatak od oko 46 % čini ferit. Ovaj uzorak je toplinski obrađen u komornoj peći. Žaren je na temperaturi od 1100 °C u trajanju od 15 min, a nakon toga je naglo hlađen u vodi.



Slika 48. Mikrostruktura uzorka 5 B3 snimljena pri povećanju od 100×



Slika 49. Mikrostruktura uzorka 5 B3 snimljena pri povećanju od 500×

Mikrostruktura uzorka 5 B3 je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita, slika 48 i slika 49. Mikrostruktura ovog uzorka vrlo je slična mikrostrukтури uzorka 5 B. Mjerenjem volumnih udjela utvrđeno je da austenita ima oko 56 %, a ostatak od oko 44 % čini ferit. Uzorak 5 B3 je toplinski obrađen isto kao i uzorak 5 B.



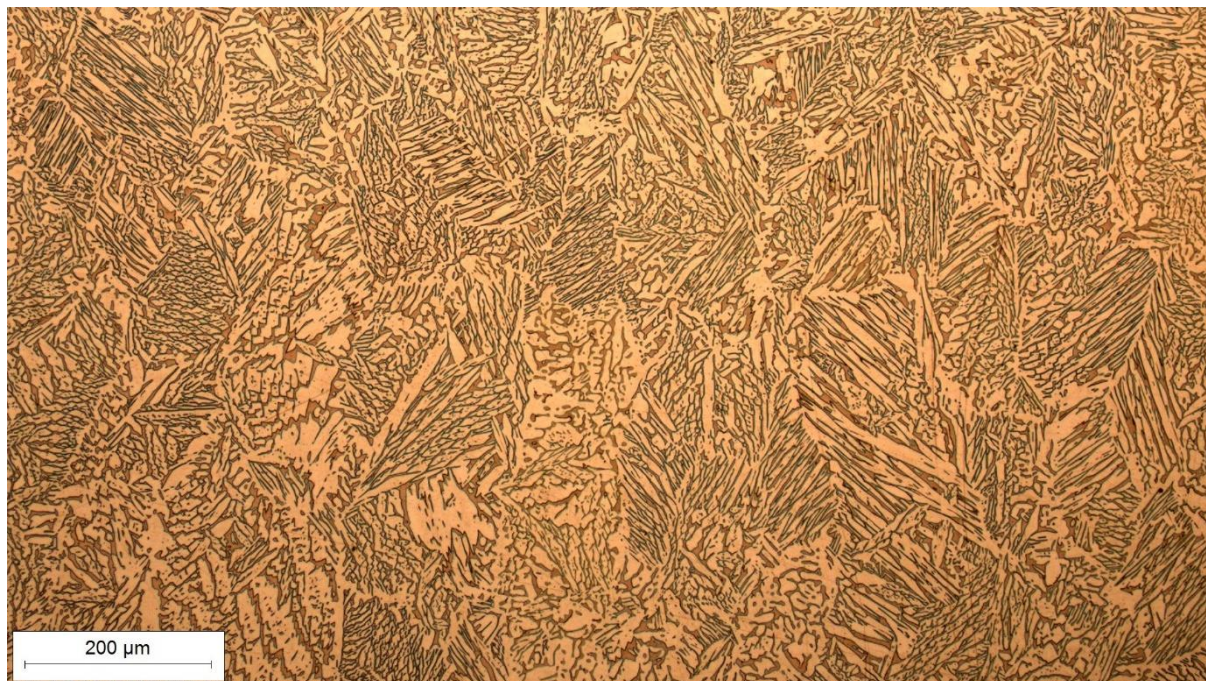
Slika 50. Mikrostruktura uzorka 6 B snimljena pri povećanju od 100×



Slika 51. Mikrostruktura uzorka 6 B snimljena pri povećanju od 500×

Mikrostruktura uzorka 6 B je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita u kojoj prevladava austenit, slika 50 i slika 51. Ovaj tip mikrostrukture karakterističan je za metal

zavara dupleks čelika. Mjerenjem volumnih udjela utvrđeno je da austenita ima oko 62 %, a ostatak od oko 38 % čini ferit. Ovaj uzorak je toplinski obrađen u komornoj peći. Žaren je na temperaturi od 1050 °C u trajanju od 60 min, a nakon toga je naglo hlađen u vodi.



Slika 52. Mikrostruktura uzorka 6 B3 snimljena pri povećanju od 100×



Slika 53. Mikrostruktura uzorka 6 B3 snimljena pri povećanju od 500×

Mikrostruktura uzorka 6 B3 je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita u kojoj prevladava austenit, slika 52 i slika 53. Ovaj tip mikrostrukture karakterističan je za metal zavara dupleks čelika. Mjerenjem volumnih udjela utvrđeno je da austenita ima oko 59 %, a ostatak od oko 41 % čini ferit. Uzorak 6 B3 je toplinski obrađen isto kao i uzorak 6 B.

Tablica 7 prikazuje volumni udio ferita i austenita u uzorcima.

Tablica 7. Volumni udjeli ferita i austenita u uzorcima

Uzorak		Toplinska obrada uzorka	Volumni dio, %	
			austenit	ferit
1	B	bez toplinske obrade	48	52
	B3		57	43
2	B	komorna peć 1000 °C / 60 min	55	45
	B3		59	41
3	B	komorna peć 1050 °C / 15 min	55	45
	B3		59	41
4	B	vakuumska peć 1100 °C / 15 min	65	35
	B3		57	43
5	B	komorna peć 1100 °C / 15 min	54	46
	B3		56	44
6	B	komorna peć 1050 °C / 60 min	62	38
	B3		59	41

5.4. Ispitivanje mikrotvrdoće

Ispitivanje mikrotvrdoće je provedeno u Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Ispitivana je mikrotvrdoća HV0,2 (1,961 N), HV0,1 (0,9807 N), HV0,05 (0,4903 N) i HV 0,02 (0,1961 N). Na svakom uzorku i za svako opterećenje, mjerenje tvrdoće ponovljeno je 30 puta. Ispitivanje je provedeno na mikrotvrdomjeru „PMT-3“, slika 54.



Slika 54. Mikrotvrdomjer „PMT-3“

Rezultati dobiveni mjerenjem tvrdoće na svim uzorcima i za sva opterećenja prikazani su u tablicama koje slijede, tablica 8 - tablica 13.

Tablica 8. Tvrdoće uzorka 1

Broj mjerjenja	Uzorak 1							
	B				B3			
	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02
1	324,13	317,71	282,38	219,90	252,09	352,04	273,20	210,01
2	282,35	352,04	273,20	230,49	273,17	281,43	264,46	241,87
3	302,16	361,49	336,06	254,12	277,71	288,17	292,04	297,00
4	355,13	295,16	312,89	281,57	336,02	262,57	302,19	219,90
5	348,58	302,40	324,16	210,01	248,16	288,17	312,89	241,87
6	297,02	309,92	207,46	241,87	244,33	288,17	302,19	210,01
7	297,02	342,95	336,06	241,87	268,75	256,70	336,06	254,12
8	277,71	325,81	324,16	267,32	256,10	317,71	324,16	230,49
9	268,75	334,21	264,46	313,73	256,10	309,92	302,19	313,73
10	277,71	309,92	292,04	230,49	302,16	274,93	324,16	267,32
11	292,01	302,40	213,52	192,15	282,35	302,40	264,46	200,78
12	324,13	352,04	273,20	331,91	302,16	281,43	256,13	200,78
13	297,02	352,04	240,61	331,91	282,35	262,57	282,38	210,01
14	282,35	325,81	233,37	281,57	312,86	288,17	264,46	210,01
15	330,00	342,95	282,38	351,72	318,42	262,57	302,19	192,15
16	268,75	274,93	292,04	331,91	307,44	268,64	248,19	254,12
17	264,43	309,92	256,13	254,12	312,86	288,17	324,16	210,01
18	260,22	240,24	248,19	297,00	240,58	295,16	240,61	230,49
19	256,10	274,93	282,38	267,32	260,22	302,40	312,89	267,32
20	307,44	325,81	248,19	241,87	244,33	309,92	273,20	230,49
21	282,35	251,03	226,46	254,12	256,10	281,43	273,20	313,73
22	312,86	361,49	256,13	331,91	260,22	281,43	292,04	297,00
23	292,01	274,93	248,19	230,49	268,75	302,40	264,46	230,49
24	302,16	288,17	292,04	241,87	287,12	309,92	302,19	241,87
25	318,42	295,16	256,13	241,87	252,09	334,21	361,90	281,57
26	342,22	302,40	273,20	313,73	260,22	288,17	282,38	267,32
27	336,02	262,57	282,38	297,00	256,10	325,81	282,38	219,90
28	330,00	281,43	336,06	162,64	268,75	342,95	256,13	267,32
29	287,12	262,57	324,16	184,06	268,75	317,71	324,16	184,06
30	297,02	439,74	348,62	176,47	260,22	309,92	324,16	230,49
\bar{x}	300	312	279	260	274	296	292	241

Tablica 9. Tvrdće uzorka 2

Broj mjerjenja	Uzorak 2							
	B				B3			
	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02
1	307,44	295,16	282,38	351,72	312,86	309,92	264,46	169,34
2	324,13	288,17	264,46	281,57	282,35	309,92	213,52	230,49
3	273,17	302,40	302,19	267,32	324,13	262,57	273,20	156,32
4	312,86	281,43	336,06	241,87	307,44	199,33	324,16	85,40
5	297,02	325,81	361,90	313,73	282,35	262,57	292,04	219,90
6	268,75	352,04	324,16	297,00	273,17	162,10	264,46	139,43
7	318,42	274,93	302,19	210,01	292,01	177,60	302,19	105,77
8	260,22	302,40	390,84	297,00	264,43	309,92	240,61	281,57
9	273,17	288,17	233,37	184,06	336,02	262,57	282,38	254,12
10	282,35	352,04	361,90	176,47	260,22	281,43	282,38	241,87
11	302,16	302,40	375,95	169,34	282,35	251,03	302,19	210,01
12	297,02	334,21	375,95	192,15	277,71	288,17	324,16	313,73
13	297,02	274,93	336,06	210,01	277,71	317,71	207,46	200,78
14	273,17	268,64	324,16	109,27	268,75	274,93	273,20	129,65
15	282,35	302,40	302,19	144,74	244,33	309,92	273,20	192,15
16	292,01	288,17	423,40	219,90	277,71	302,40	273,20	169,34
17	302,16	325,81	324,16	200,78	287,12	317,71	282,38	241,87
18	277,71	325,81	324,16	134,41	342,22	288,17	264,46	150,37
19	297,02	288,17	273,20	156,32	273,17	281,43	312,89	267,32
20	302,16	334,21	312,89	129,65	282,35	281,43	292,04	144,74
21	318,42	281,43	264,46	281,57	297,02	288,17	292,04	162,64
22	268,75	317,71	324,16	241,87	277,71	295,16	256,13	241,87
23	297,02	288,17	302,19	184,06	282,35	245,54	302,19	254,12
24	307,44	342,95	324,16	210,01	287,12	281,43	312,89	169,34
25	277,71	203,34	282,38	200,78	264,43	392,24	282,38	162,64
26	287,12	274,93	282,38	144,74	292,01	281,43	361,90	156,32
27	268,75	317,71	256,13	162,64	297,02	295,16	273,20	169,34
28	273,17	309,92	273,20	219,90	307,44	288,17	324,16	134,41
29	264,43	295,16	264,46	169,34	292,01	268,64	226,46	109,27
30	287,12	309,92	302,19	112,94	307,44	262,57	324,16	129,65
\bar{x}	290	302	314	207	288	278	283	186

Tablica 10. Tvrdoće uzorka 3

Broj mjerjenja	Uzorak 3							
	B				B3			
	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02
1	219,83	245,54	201,66	150,37	287,12	220,63	213,52	313,73
2	226,44	235,10	240,61	156,32	273,17	220,63	390,84	297,00
3	204,51	220,63	256,13	210,01	277,71	220,63	282,38	210,01
4	248,16	225,30	213,52	150,37	318,42	211,72	302,19	254,12
5	213,50	240,24	233,37	176,47	282,35	225,30	273,20	254,12
6	210,44	225,30	219,85	169,34	302,16	220,63	302,19	241,87
7	216,63	235,10	176,00	144,74	297,02	225,30	273,20	373,36
8	196,08	195,44	248,19	162,64	297,02	251,03	312,89	176,47
9	216,63	216,11	207,46	162,64	277,71	225,30	273,20	254,12
10	216,63	191,66	207,46	139,43	277,71	230,12	264,46	230,49
11	240,58	216,11	273,20	156,32	297,02	230,12	256,13	156,32
12	229,85	199,33	167,09	169,34	277,71	240,24	240,61	210,01
13	204,51	216,11	180,72	169,34	282,35	220,63	213,52	230,49
14	236,93	262,57	101,66	200,78	282,35	256,70	201,66	210,01
15	277,71	225,30	154,94	184,06	226,44	251,03	226,46	200,78
16	264,43	207,46	120,11	230,49	292,01	216,11	201,66	139,43
17	204,51	171,14	176,00	200,78	297,02	211,72	233,37	144,74
18	233,35	235,10	196,10	184,06	297,02	203,34	256,13	200,78
19	252,09	203,34	180,72	156,32	297,02	191,66	176,00	184,06
20	260,22	220,63	137,45	144,74	297,02	216,11	302,19	156,32
21	264,43	230,12	256,13	129,65	282,35	235,10	219,85	241,87
22	236,93	225,30	213,52	210,01	244,33	240,24	226,46	200,78
23	219,83	240,24	213,52	184,06	268,75	230,12	176,00	210,01
24	223,09	220,63	176,00	169,34	226,44	235,10	207,46	150,37
25	226,44	195,44	176,00	192,15	287,12	295,16	196,10	176,47
26	264,43	168,05	162,89	176,47	260,22	256,70	240,61	200,78
27	226,44	235,10	158,84	200,78	277,71	256,70	233,37	254,12
28	264,43	225,30	302,19	241,87	273,17	211,72	207,46	184,06
29	219,83	216,11	240,61	254,12	277,71	251,03	219,85	254,12
30	268,75	216,11	273,20	192,15	292,01	211,72	219,85	139,43
\bar{x}	234	219	202	179	281	230	245	215

Tablica 11. Tvrdoće uzorka 4

Broj mjerjenja	Uzorak 4							
	B				B3			
	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02
1	282,35	352,04	282,38	241,87	204,51	281,43	292,04	192,15
2	292,01	342,95	292,04	230,49	248,16	268,64	248,19	230,49
3	244,33	256,70	324,16	219,90	282,35	302,40	264,46	313,73
4	277,71	274,93	348,62	241,87	244,33	281,43	219,85	267,32
5	264,43	274,93	240,61	331,91	273,17	274,93	292,04	219,90
6	252,09	302,40	201,66	192,15	282,35	309,92	256,13	313,73
7	240,58	262,57	273,20	162,64	273,17	262,57	248,19	267,32
8	292,01	288,17	348,62	176,47	277,71	334,21	256,13	313,73
9	273,17	256,70	248,19	313,73	248,16	274,93	219,85	281,57
10	312,86	274,93	324,16	230,49	260,22	245,54	264,46	200,78
11	307,44	240,24	240,61	192,15	223,09	309,92	273,20	230,49
12	312,86	302,40	302,19	281,57	229,85	295,16	248,19	267,32
13	268,75	288,17	302,19	297,00	256,10	325,81	273,20	200,78
14	268,75	268,64	264,46	230,49	260,22	295,16	273,20	219,90
15	282,35	302,40	292,04	254,12	297,02	281,43	282,38	254,12
16	292,01	288,17	282,38	254,12	260,22	268,64	240,61	184,06
17	277,71	295,16	264,46	200,78	273,17	274,93	264,46	281,57
18	256,10	240,24	273,20	230,49	287,12	251,03	256,13	169,34
19	282,35	268,64	233,37	254,12	260,22	256,70	282,38	230,49
20	297,02	262,57	292,04	254,12	240,58	245,54	282,38	192,15
21	277,71	262,57	292,04	230,49	229,85	256,70	213,52	210,01
22	260,22	309,92	264,46	219,90	282,35	274,93	219,85	219,90
23	256,10	309,92	312,89	254,12	252,09	245,54	273,20	219,90
24	256,10	295,16	213,52	200,78	260,22	274,93	264,46	267,32
25	268,75	262,57	273,20	219,90	312,86	288,17	264,46	230,49
26	260,22	295,16	273,20	210,01	256,10	288,17	282,38	230,49
27	244,33	245,54	256,13	219,90	292,01	256,70	264,46	184,06
28	287,12	240,24	213,52	254,12	336,02	274,93	324,16	192,15
29	307,44	288,17	264,46	219,90	273,17	317,71	264,46	281,57
30	277,71	268,64	282,38	184,06	256,10	274,93	336,06	267,32
\bar{x}	276	281	276	233	264	280	265	238

Tablica 12. Tvrdoće uzorka 5

Broj mjerjenja	Uzorak 5							
	B				B3			
	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02
1	219,83	262,57	324,16	150,37	190,74	295,16	256,13	297,00
2	268,75	281,43	312,89	169,34	226,44	302,40	361,90	162,64
3	213,50	302,40	273,20	176,47	248,16	302,40	324,16	176,47
4	226,44	268,64	233,37	219,90	236,93	288,17	302,19	200,78
5	292,01	274,93	273,20	192,15	260,22	281,43	219,85	230,49
6	273,17	288,17	302,19	192,15	268,75	251,03	336,06	200,78
7	240,58	274,93	282,38	184,06	244,33	302,40	348,62	150,37
8	233,35	295,16	312,89	200,78	264,43	268,64	324,16	162,64
9	292,01	295,16	312,89	230,49	240,58	281,43	312,89	192,15
10	216,63	281,43	312,89	267,32	292,01	268,64	423,40	139,43
11	287,12	325,81	292,04	200,78	273,17	281,43	423,40	176,47
12	302,16	295,16	312,89	241,87	277,71	256,70	361,90	200,78
13	307,44	262,57	324,16	125,14	256,10	240,24	361,90	129,65
14	348,58	245,54	336,06	162,64	260,22	288,17	441,22	150,37
15	324,13	281,43	324,16	230,49	264,43	268,64	460,20	176,47
16	324,13	309,92	312,89	139,43	248,16	317,71	336,06	254,12
17	268,75	334,21	375,95	241,87	264,43	262,57	390,84	176,47
18	302,16	309,92	348,62	139,43	256,10	268,64	441,22	219,90
19	273,17	414,97	324,16	210,01	244,33	262,57	406,63	267,32
20	252,09	334,21	324,16	184,06	273,17	302,40	292,04	230,49
21	229,85	371,32	273,20	184,06	287,12	251,03	375,95	192,15
22	277,71	317,71	273,20	139,43	248,16	309,92	336,06	169,34
23	297,02	342,95	312,89	129,65	292,01	325,81	312,89	219,90
24	277,71	334,21	324,16	129,65	282,35	317,71	336,06	156,32
25	256,10	281,43	302,19	254,12	273,17	281,43	302,19	169,34
26	277,71	295,16	292,04	192,15	256,10	274,93	312,89	105,77
27	273,17	392,24	273,20	192,15	282,35	251,03	375,95	192,15
28	248,16	334,21	282,38	184,06	277,71	288,17	264,46	200,78
29	273,17	288,17	256,13	112,94	287,12	268,64	336,06	331,91
30	292,01	371,32	248,19	96,23	260,22	302,40	348,62	176,47
\bar{x}	272	309	302	182	261	282	348	194

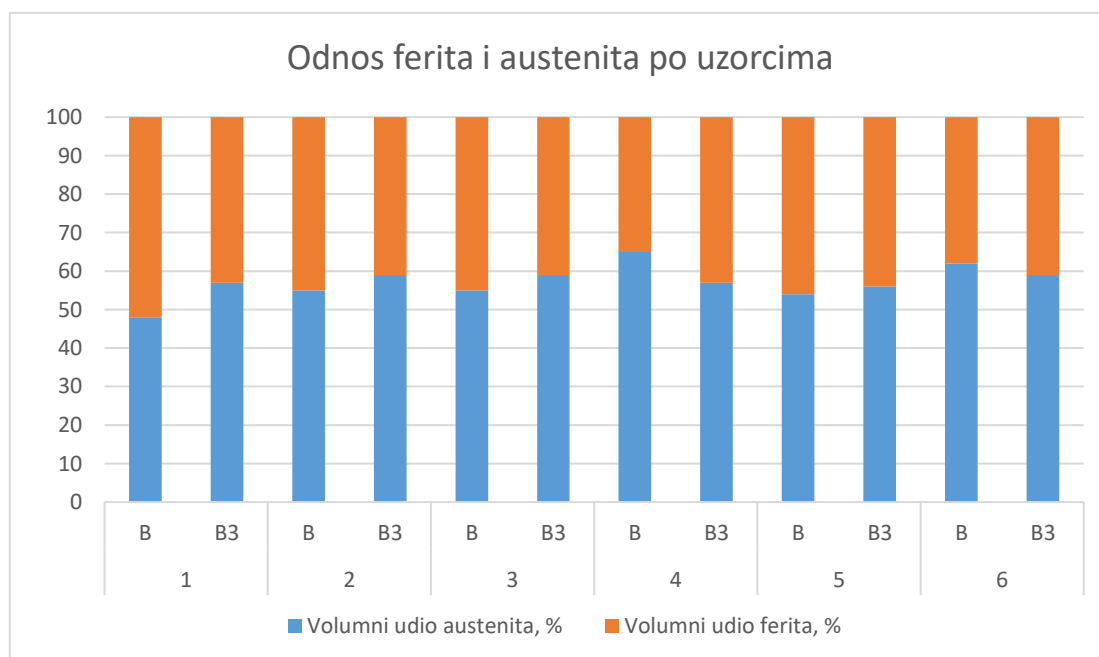
Tablica 13. Tvrdoće uzorka 6

Broj mjerjenja	Uzorak 6							
	B				B3			
	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02	HV 0,2	HV 0,1	HV 0,05	HV 0,02
1	287,12	392,24	282,38	176,47	330,00	262,57	312,89	162,64
2	312,86	481,27	312,89	297,00	330,00	256,70	292,04	184,06
3	277,71	342,95	361,90	200,78	264,43	288,17	302,19	219,90
4	297,02	309,92	233,37	230,49	282,35	268,64	302,19	125,14
5	336,02	245,54	248,19	230,49	287,12	288,17	312,89	397,06
6	302,16	352,04	264,46	184,06	273,17	274,93	273,20	169,34
7	292,01	262,57	336,06	267,32	264,43	251,03	302,19	281,57
8	282,35	262,57	361,90	241,87	282,35	288,17	282,38	125,14
9	256,10	268,64	361,90	331,91	273,17	274,93	248,19	162,64
10	204,51	302,40	361,90	219,90	252,09	274,93	256,13	139,43
11	226,44	325,81	361,90	241,87	273,17	281,43	240,61	254,12
12	216,63	274,93	324,16	254,12	282,35	268,64	207,46	96,23
13	244,33	268,64	282,38	219,90	292,01	309,92	312,89	112,94
14	213,50	309,92	273,20	109,27	264,43	268,64	226,46	78,43
15	196,08	268,64	292,04	200,78	287,12	268,64	264,46	219,90
16	213,50	302,40	282,38	144,74	268,75	288,17	196,10	200,78
17	216,63	281,43	292,04	184,06	268,75	268,64	282,38	156,32
18	248,16	295,16	302,19	313,73	268,75	309,92	292,04	241,87
19	216,63	281,43	282,38	281,57	307,44	245,54	233,37	192,15
20	226,44	274,93	282,38	230,49	287,12	268,64	162,89	105,77
21	256,10	288,17	256,13	331,91	264,43	295,16	196,10	373,36
22	226,44	281,43	240,61	219,90	273,17	288,17	226,46	134,41
23	248,16	268,64	282,38	200,78	282,35	309,92	207,46	96,23
24	233,35	274,93	273,20	313,73	277,71	309,92	158,84	210,01
25	248,16	195,44	248,19	267,32	307,44	288,17	219,85	139,43
26	256,10	281,43	282,38	200,78	273,17	245,54	233,37	192,15
27	226,44	302,40	273,20	176,47	287,12	281,43	256,13	184,06
28	244,33	317,71	248,19	184,06	307,44	268,64	196,10	99,26
29	282,35	274,93	282,38	254,12	277,71	256,70	233,37	200,78
30	256,10	317,71	282,38	156,32	292,01	268,64	144,07	313,73
\bar{x}	251	297	292	229	282	277	246	186

6. ANALIZA REZULTATA

6.1. Osvrt na rezultate kvalitativne i kvantitativne analize mikrostrukture

Mikrostruktura svih uzoraka je tipična ljevačka mikrostruktura kakva se uglavnom nalazi u metalu zavara dupleks čelika, a sastavljena je od ferita i austenita, slika 55. Svi toplinski obrađeni uzorci (2-6) imaju viši volumni udio austenita od toplinski neobrađenog uzorka (1). Svi toplinski obrađeni uzorci imaju maseni udio austenita veći od 50 %, a uzorci 4 B i 6 B imaju maseni udio austenita veći od 60 %. Parametri toplinske obrade (T, t i vrsta peći) uzoraka 4 B i 6 B su potpuno različiti. Kod većine uzoraka iz sredine navara (B3) maseni udio austenita viši je od udjela austenita izmjerеноg uz rub navara (B). Kod uzoraka 5 B i 5 B3 pri većem povećanju u mikrostrukтури se vide sitne, homogeno raspoređene čestice koje bi mogle biti precipitirati nepoznate faze, a koje su neočekivane s obzirom na vrlo brzo hlađenje s temperature žarenja od 1100 °C u komornoj peći.



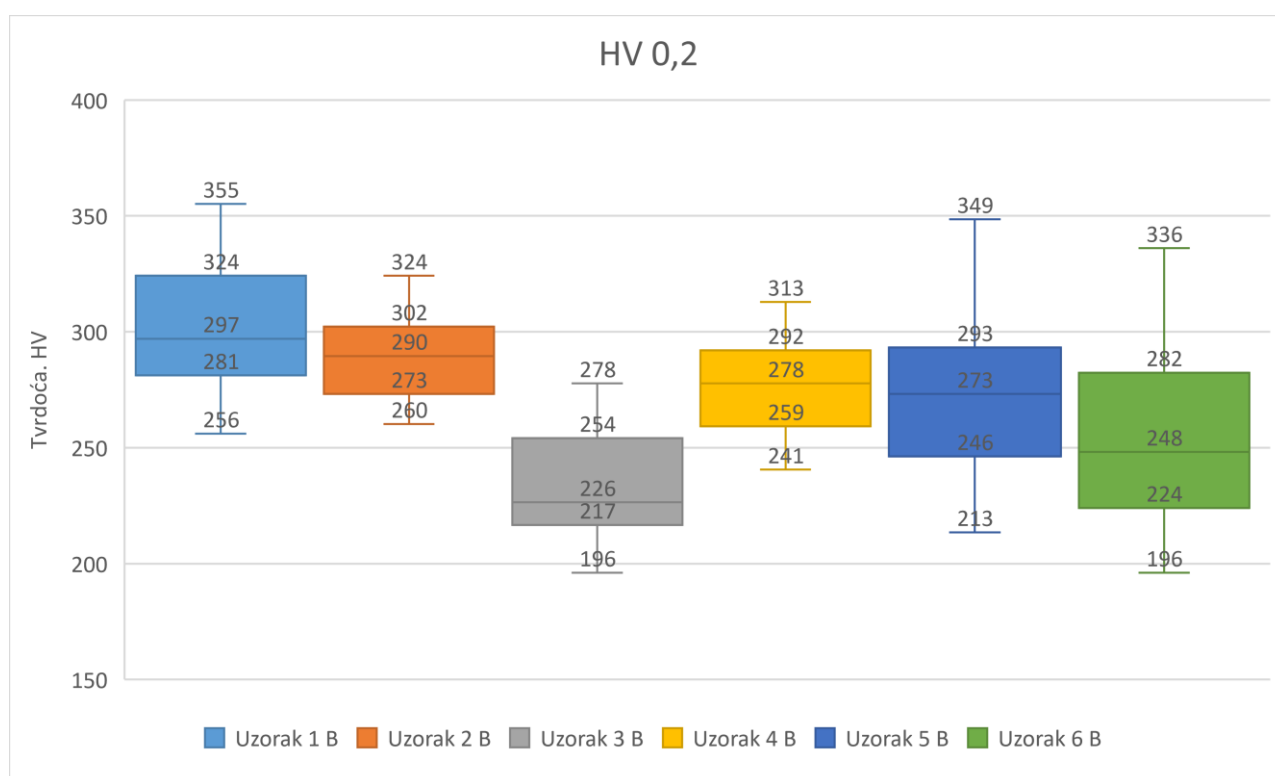
Slika 55. Odnos ferita i austenita po uzorcima

6.2. Osvrt na rezultate mjerenja tvrdoće

U grafovima koji slijede prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće na svim uzorcima i za sva opterećenja.

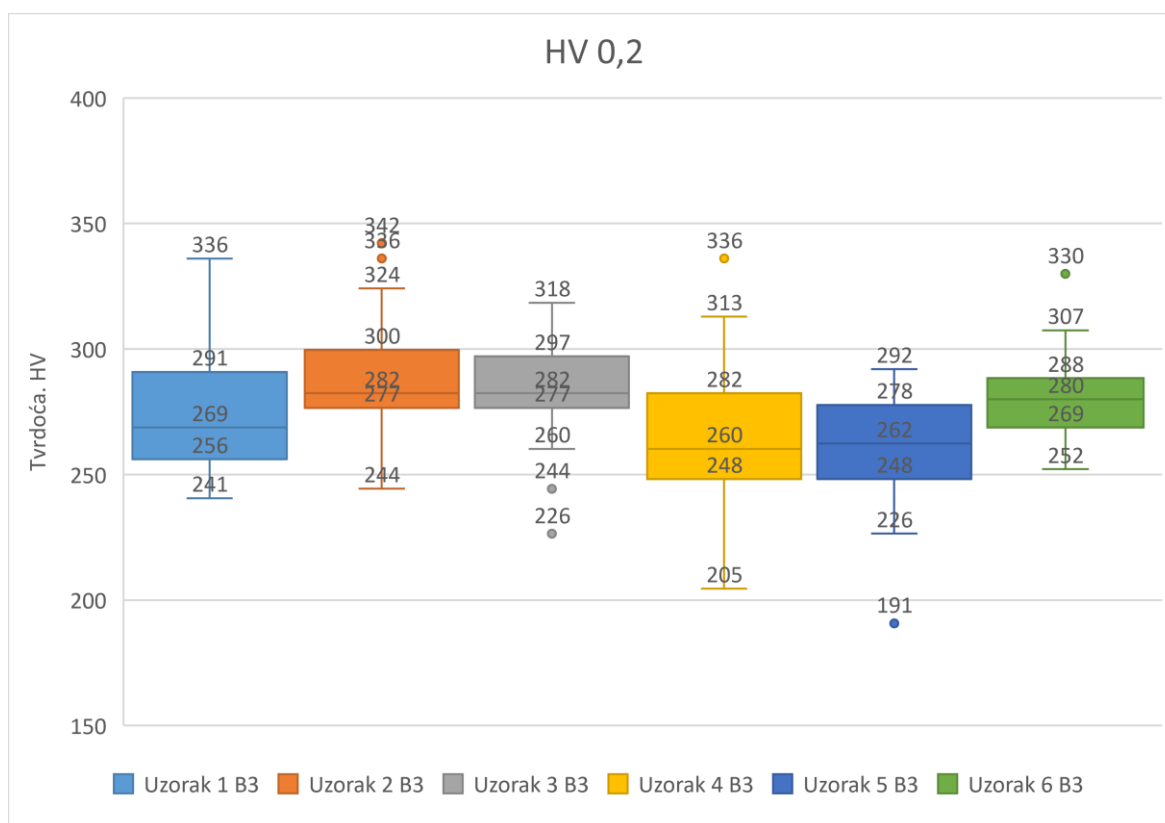
Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,2 izmjerene uz rub navara (B) pokazali su da svi toplinski obrađeni uzorci imaju nižu tvrdoću od toplinski neobrađenog uzorka, slika 56. To se podudara s izmjerenim omjerima ferita i austenita na uzorcima, uzorci s višim udjelom ferita su tvrdi.

Kod uzorka 3 B izmjerena je najniža tvrdoća HV 0,2.



Slika 56. Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,2 za uzorke uz rub navara (B)

U odnosu na rub, tvrdoća HV 0,2 uzorka 1 u sredini navara je niža, slika 57. Kod toplinski obrađenih uzoraka nema značajnije razlike u vrijednostima tvrdoće između ruba i sredine navara, ali je rasipanje rezultata puno manje za mjerenja provedena na sredini navara. Kod uzorka 4 B3 izmjerena je najniža tvrdoća HV 0,2 što se podudara s činjenicom da je kod njega izmjeren najmanji udio ferita. Najviša tvrdoća HV 0,2 izmjerena je kod uzorka 2 B3 koji je žaren u komornoj peći na temperaturi od 1000 °C u trajanju od 60 min. Uzorci 4 i 5 imaju slične vrijednosti tvrdoće, vjerojatno zbog slične toplinske obrade (1100 °C / 15 min).

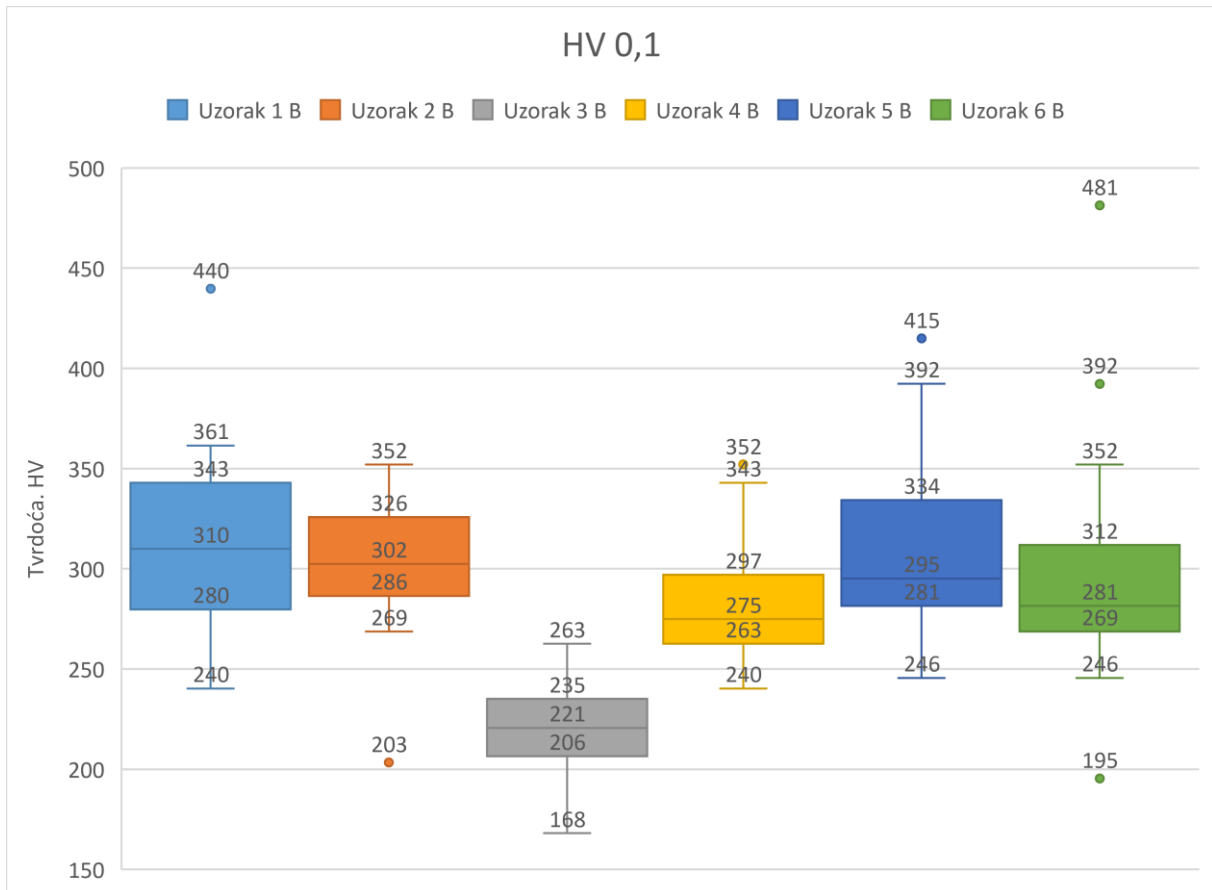


Slika 57. Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,2 za uzorke u sredini navara (B3)

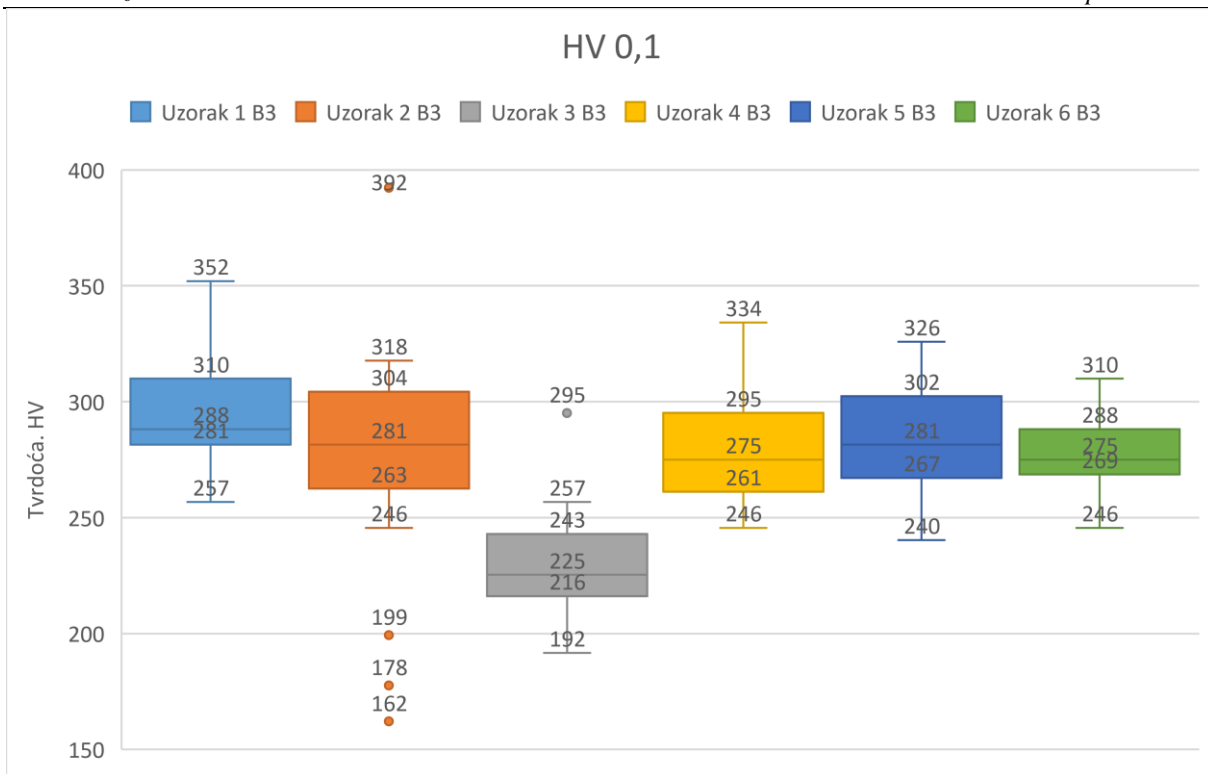
Slični rezultati dobiveni su i kod mjerenja tvrdoće HV 0,1, slika 58 i slika 59. i ovdje je tvrdoća ruba viša od tvrdoće sredine navara. Kod toplinski obrađenih uzoraka nema značajnije razlike u vrijednostima tvrdoće između ruba i sredine navara, osim kod uzorka 2 kojemu je rub navara nešto tvrdi od sredine. Kod uzorka 3 B i 3 B3 izmjerena je najniža tvrdoća HV 0,1 što se podudara s činjenicom da je udio austenita znatno veći od udjela ferita. Najviša tvrdoća HV 0,1 izmjerena je kod toplinski neobrađenog uzorka 1 B i 1 B3.

Vrijednosti tvrdoće izmjerene pri nižim opterećenjima su osjetno niže, a rasipanja rezultata znatno viša nego kod viših opterećenja. Također se može uočiti da nema velike razlike između tvrdoće izmjerene na rubu i sredini navara. Najniža vrijednost tvrdoće HV 0,05 izmjerena je kod uzorka 3 B i 3 B3, slika 60 i slika 61. Najviše vrijednosti tvrdoće izmjerene su kod uzorka 5 B i 5 B3. Ovaj uzorak ima viši udio ferita od drugih toplinski obrađenih uzoraka.

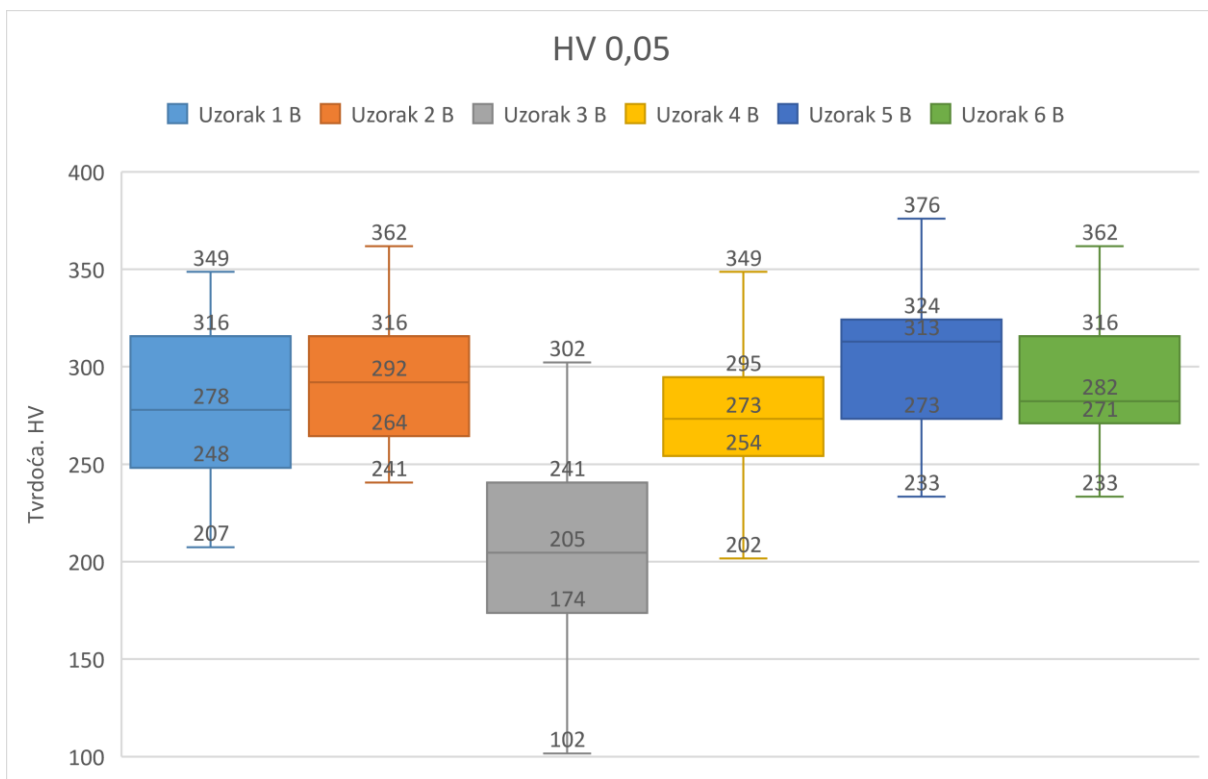
Pri mjerenju tvrdoće HV 0,02 dobivene su nešto više vrijednosti tvrdoće na rubu nego u sredini navara kod većine uzoraka, slika 62 i slika 63. Najniža vrijednost na rubu navara izmjerena je kod uzoraka 3 B i 5 B, a u sredini navara kod uzoraka 2 B3 i 6 B3. Rasipanja rezultata su dosta velika.



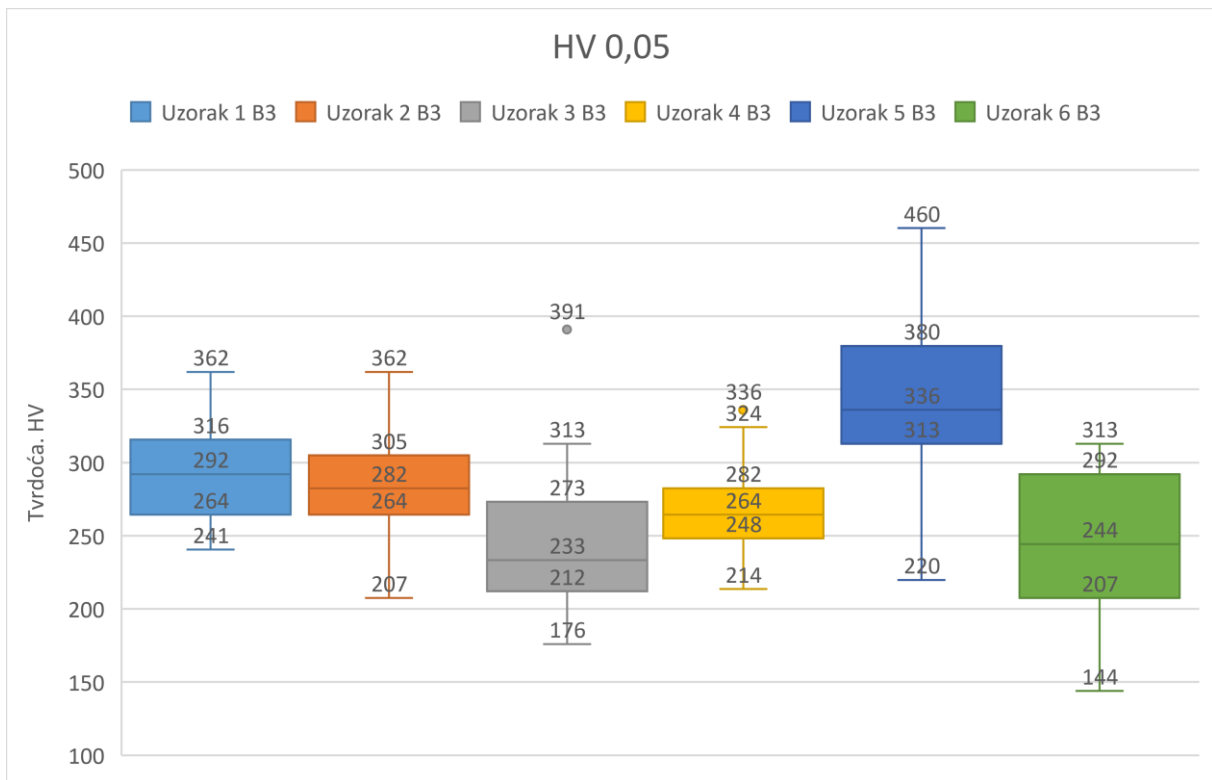
Slika 58. Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,1 za uzorke uz rub navara (B)



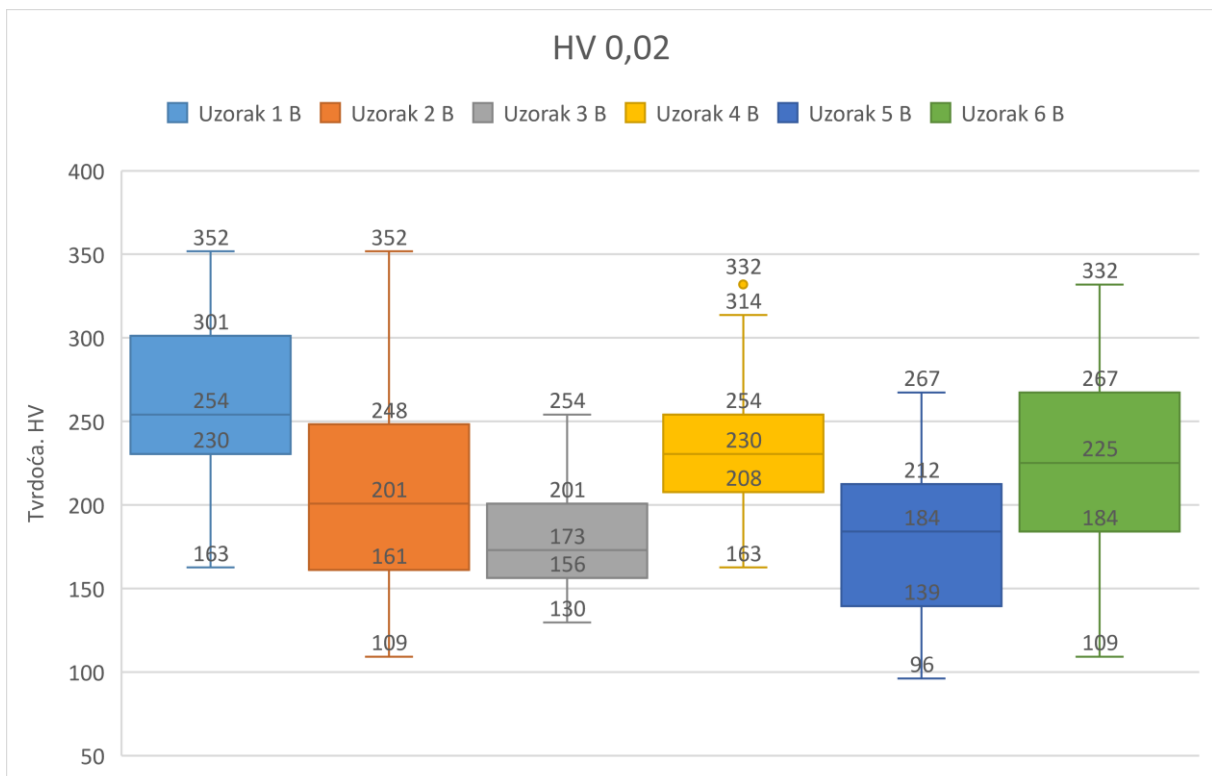
Slika 59. Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,1 za uzorke u sredini navara (B3)



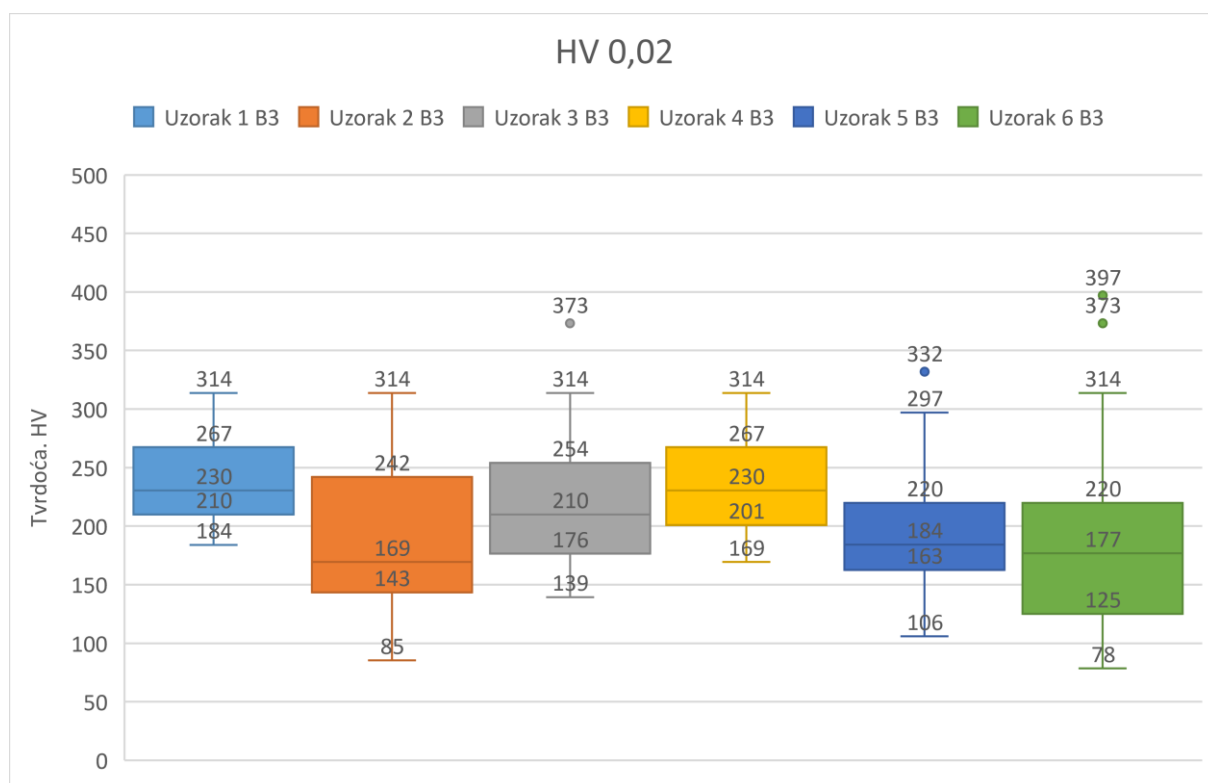
Slika 60. Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,05 za uzorke uz rub navara (B)



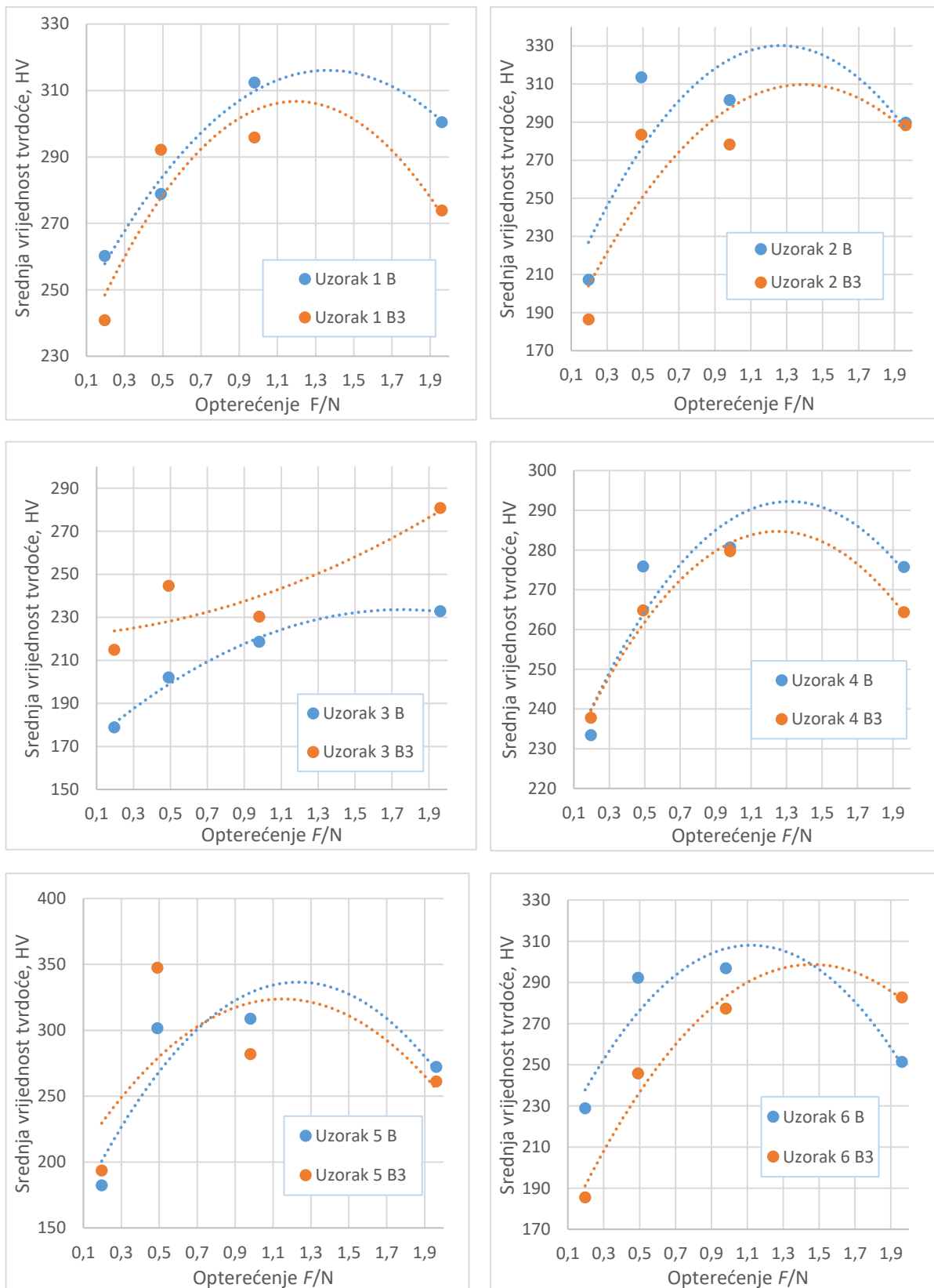
Slika 61. Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,05 za uzorke u sredini navara (B3)



Slika 62. Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,02 za uzorke uz rub navara (B)



Slika 63. Rezultati mjerenja tvrdoće HV 0,02 za uzorke u sredini navara (B3)



Slika 64. Ovisnost tvrdoće o opterećenju za sve uzorke

Slika 64 prikazuje ovisnost tvrdoće o primijenjenom opterećenju za sve uzorke na rubu i u sredini navara. Kod većine uzoraka tvrdoća se povećava s povećanjem opterećenja od 0,1961 N do 0,9807 N. Povećanjem opterećenja na 1,961 N, kod većine uzoraka tvrdoća se smanjuje. Tijek promjene tvrdoće s povećanjem opterećenja kod nekih uzoraka podudaran je na rubu i sredini navara, a kod drugih nema podudarnosti.

7. ZAKLJUČAK

Na temelju rezultata dobivenih analizom mikrostrukture i mjerenjem tvrdoće navarenog zida dupleks čelika, može se zaključiti sljedeće:

- Svi analizirani uzorci imaju tipičnu lijevačku mikrostrukturu sastavljenu od ferita i austenita, karakterističnu za metal zavara dupleks čelika. Toplinski obrađeni uzorci imaju viši volumni udio austenita od toplinski neobrađenog uzorka, a kod većine uzoraka udio austenita je viši u sredini nego na rubu navara. Udjeli austenita kod nekih uzoraka prelaze granicu od 60 %.
- Kod nekih uzoraka osim ferita i austenita uočeni su homogeno raspoređeni precipitati nepoznate faze, a koje su neočekivane s obzirom na vrlo brzo hlađenje s temperature žarenja od 1100 °C u komornoj peći.
- Kod svih uzoraka uočena je značajna ovisnost tvrdoće o primijenjenom opterećenju. Kod većine uzoraka tvrdoća se povećava s povećanjem opterećenja od 0,1961 N do 0,9807 N, a daljnjim povećanjem opterećenja tvrdoća se smanjuje. Tijek promjene tvrdoće s povećanjem opterećenja kod nekih uzoraka podudaran je na rubu i sredini navara.
- Svi toplinski obrađeni uzorci imaju uz rub navara nižu tvrdoću HV 0,2 od toplinski neobrađenog uzorka, što se podudara s izmjerenim omjerima ferita i austenita.
- Kod većine toplinski obrađenih uzoraka nema značajnije razlike u vrijednostima tvrdoće HV 0,1 između ruba i sredine navara.
- Vrijednosti tvrdoće izmjerene pri nižim opterećenjima (HV 0,05 i HV 0,02) osjetno su niže, a rasipanja rezultata znatno viša nego kod viših opterećenja. Također se može uočiti da nema velike razlike između tvrdoće izmjerene na rubu i sredini navara.
- S obzirom na sve navedeno optimalna toplinska obrada bila bi žarenje u komornoj peći na 1050 °C u trajanju od 15 min.

LITERATURA

- [1] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2013.
- [2] Luo H, Li XG, Dong CF, Xiao K. Effect of solution treatment on pitting behavior of 2205 duplex stainless steel. Arab J Chem. 2017.;10:S90–4. doi: 10.1016/j.arabjc.2012.06.011
- [3] Iza-Mendia A, Pinol-Juez A, Urcola JJ, Gutierrez I. Microstructural and Mechanical Behavior of a Duplex Stainless Steel under Hot Working Conditions. Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci. 1998.;29(12):2975–86. doi: 10.1007/s11661-998-0205-z
- [4] Klar E, Samal PK. Powder Metallurgy Stainless Steels: Processing, Microstructure, and Properties. Powder Metallurgy. 2007. 227 str. doi: 10.1361/pmss2007p001
- [5] Gunn N R, urednik. Duplex Stainless Steels. Cambridge: Abington Publishing; 1997. 204 str.
- [6] Alvarez-Armas I, Degallaix-Moreuil S, urednici. Duplex stainless steels. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.; 209. doi: 10.31399/asm.tb.ssde.t52310091
- [7] Karlsson L. Welding duplex stainless steels - A review of current recommendations. Weld World. 2012.;56(5–6):65–76. doi: 10.1007/bf03321351
- [8] Fedorov A, Zhitenev A, Strekalovskaya D, Kur A. Quantitative Description of the Microstructure of Duplex Stainless Steels Using Selective Etching. Mater Proc. 2021.;3(1):4. doi: 10.3390/iec2m-09387
- [9] Kušević M. Utjecaj unosa energije na mikrostrukturu dupleks čelika pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2021.
- [10] Ghosh SK, Mondal S. High temperature ageing behaviour of a duplex stainless steel. Mater Charact. 2008.;59(12):1776–83. doi: 10.1016/j.matchar.2008.04.008
- [11] MATWEB [Internet]. Dostupno na: <http://www.matweb.com/index.aspx>
- [12] Rede V. Utjecaj mikrostrukture zavara dupleks čelika na otpornost prema trošenju [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2004.
- [13] Moura VS, Lima LD, Pardal JM, Kina AY, Corte RRA, Tavares SSM. Influence of microstructure on the corrosion resistance of the duplex stainless steel UNS S31803.

- Mater Charact. 2008.;59(8):1127–32. doi: 10.1016/j.matchar.2007.09.002
- [14] Knezović N, Topić A, Garašić I, Jurić I. Application of wire and arc additive manufacturing for fabrication of duplex stainless steel product. Ann DAAAM Proc Int DAAAM Symp. 2019.;30(1):0599–604. doi: 10.2507/30th.daaam.proceedings.081
- [15] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. Int J Adv Manuf Technol. 2015.;81(1–4):465–81. doi: 10.1007/s00170-015-7077-3
- [16] Udžbinac D. Primjena dupleks čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.
- [17] Pilipovic A. Aditivna proizvodnja. Polimeri. 2012.;33(3–4):135–6.
- [18] Wong K V., Hernandez A. A Review of Additive Manufacturing. ISRN Mech Eng. 2012.;2012:1–10. doi: 10.5402/2012/208760
- [19] Watanabe I, Sun Z, Kitano H, Goto K. Multiscale analysis of mechanical behavior of multilayer steel structures fabricated by wire and arc additive manufacturing. Sci Technol Adv Mater. 2020.;21(1):461–70. doi: 10.1080/14686996.2020.1788908
- [20] Knezović N, Topić A. Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) – A New Advance in Manufacturing BT - New Technologies, Development and Application. Springer International Publishing; 2019. 65–71 str. doi: 10.1007/978-3-319-90893-9
- [21] Jurić I, Garašić I, Kožuh Z, Eržišnik J, Udžbinac D. Primjena dupleks čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom. Zavar i zavarene Konstr. 2019.;64(3):113–9. doi: 10.5937/zsk1903113j
- [22] Ravi R. MIG Welding Guide. Sv. 40, Indian Welding Journal. 2007. 8 str. doi: 10.22486/iwj.v40i3.178132
- [23] Klobučar M. Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja [završni rad]. Varaždin: Sveučilište Sjever; 2016.
- [24] Lienert JT, Suresh Babu S, Siewert TA, Acoff VL, urednici. ASM Handbook Volume 06A. Sv. 06, The Lincoln Electric Company. 2011. 136 str.
- [25] Garašić I. TIG postupak [autorizirana predavanja]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.
- [26] Karamarko M. Analiza mikrostrukture pri aditivnoj proizvodnji dupleks čelika električnim lukom i žicom [završni rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.

-
- [27] Metal-am [Internet]. Dostupno na: <https://www.metal-am.com/mx3d-unveils-its-additively-manufactured-bridge-in-amsterdam/>
- [28] Alar Ž. Analiza utjecajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2008.
- [29] Franz M. Mehanička svojstva materijala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 1998.