

Karakterizacija navarenog sloja na ploči od čelika za tlačne namjene

Simoni, Maroje

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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:235:237429>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Maroje Simoni

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

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

Student:

Maroje Simoni

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem prof. dr. sc. Veri Rede, asistentici Heleni Lukšić, mag. ing. mech. i laborantu Ivanu Vovku na uloženom vremenu, pomoći i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Posebno hvala mojoj obitelji na velikoj podršci tijekom studija.

Maroje Simoni



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 1 | |
| Ur.broj: 15 – 25 – | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Maroje Simoni** JMBAG: **0082062721**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija navarenog sloja na ploči od čelika za tlačne namjene**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of the overlay on the plate of pressure vessel steel**

Opis zadatka:

Navarivanje je postupak kojim se učinkovito poboljšava trajnost nekih dijelova koji su tijekom eksploatacije izloženi mehaničkom istrošenju i/ili korozivnim procesima. Kako se tribološki i korozivski procesi događaju uglavnom na površini ili neposredno ispod površine, takvi strojni dijelovi mogu biti napravljeni od jeftinijih materijala, a samo se na njihovu površinu navarivanjem nanese dovoljno deo sloj visokokvalitetnog skupljeg materijala koji posjeduje visoku otpornost na koroziju, tribološke mehanizme i povišenu temperaturu. Time se značajno smanjuju troškovi.

U završnom radu potrebno je provesti karakterizaciju navarenog sloja na ploči od čelika namijenjenog za posude pod tlakom, za rad na normalnim temperaturama. Materijal navarenog sloja je legura koja se koristi za zavarivanje nehrđajućih čelika i čelika otpornih na povišene temperature, oznake 19 9 L Si. Navar je izveden postupkom elektro-lučnog zavarivanja taljivom elektrodnom žicom pod zaštitom inertnog plina argona (MIG). Karakterizacija uključuje analizu kemijskog sastava osnovnog materijala i metala navara, analizu makrostrukture i mikrostrukture te mjerenje tvrdoće HV10 i HV0,2 u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu navara.

Dobivene rezultate analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke o kvaliteti navara.

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| SAŽETAK | VII |
| SUMMARY | VIII |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. IMPLEMENTACIJA ČELIKA KAO MATERIJALA U NAVARIVANJU | 2 |
| 2.1. Vrste čelika i njihova primjena u navarivanju..... | 2 |
| 2.2. Čelične ploče u industrijskim aplikacijama | 8 |
| 2.3. Vrste čelika za tlačne posude i njihova svojstva | 11 |
| 2.4. Odabir dodanog materijala za navarivanje..... | 14 |
| 3. KARAKTERIZACIJA NAVARENOM SLOJA | 18 |
| 3.1. Struktura navarenog sloja..... | 18 |
| 3.1.1. MIG/MAG i TIG zavarivanje..... | 20 |
| 3.1.2. Elektrolučno i lasersko zavarivanje | 24 |
| 3.2. Mehanička svojstva navarenog sloja | 28 |
| 3.3. Otpornost na trošenje | 28 |
| 4. ANALIZA GREŠAKA U NAVARENOM SLOJU | 30 |
| 4.1. Vrste grešaka | 30 |
| 4.2. Uzroci nastanka i metode prevencija | 31 |
| 4.3. Razorne i nerazorne metode ispitivanja | 31 |
| 5. EKSPERIMENTALNI DIO | 34 |
| 5.1. Cilj rada i provedena ispitivanja..... | 34 |
| 5.2. Materijal za ispitivanje..... | 34 |
| 5.3. Analiza kemijskog sastava | 36 |

| | |
|--|----|
| 5.4. Analiza makrostrukture navarenog sloja..... | 39 |
| 5.5 Analiza mikrostrukure..... | 40 |
| 5.6 Mjerenje makrotvrdoće HV10 i mikrotvrdoće HV0,2..... | 48 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 53 |
| LITERATURA..... | 54 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Alatni i konstrukcijski čelici [1]..... | 4 |
| Slika 2. | Ugljični, legirani i nehrđajući čelik [7] | 6 |
| Slika 3. | Čelične ploče za navarivanje [16] | 9 |
| Slika 4. | Uređaj za MIG zavarivanje [25] | 21 |
| Slika 5. | Elektrolučno zavarivanje [32]..... | 25 |
| Slika 6. | Čelična ploča s navarenim slojem..... | 34 |
| Slika 7. | Raspored navarenih slojeva na čeličnoj ploči..... | 35 |
| Slika 8. | Uređaj za analizu kemijskog sastava GDS 850A-LECO | 36 |
| Slika 9. | Izrezan uzorak za analizu kemijskog sastava | 37 |
| Slika 10. | Tragovi određivanja kemijskog sastava na navaru | 37 |
| Slika 11. | Makroizbrusci čelične ploče s navarenim slojem | 39 |
| Slika 12. | Brušenje uzorka..... | 40 |
| Slika 13. | Poliranje uzorka | 41 |
| Slika 14. | Metalografski uzorak nakon brušenja i poliranja površine | 42 |
| Slika 15. | Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 | 42 |
| Slika 16. | Osnovna mikrostruktura valjane ploče čelika P355GH snimljena pri povećanju 100×..... | 43 |
| Slika 17. | Osnovna mikrostruktura valjane ploče čelika P355GH snimljena pri povećanju 200×..... | 44 |
| Slika 18. | Mikrostruktura u zoni utjecaja topline uz rub navara, snimljena pri povećanju 50× | 44 |
| Slika 19. | Mikrostruktura u zoni utjecaja topline uz rub navara, snimljena pri povećanju 100× | 45 |
| Slika 20. | Mikrostruktura u zoni utjecaja topline u sredini navara, snimljena pri povećanju 200×..... | 45 |
| Slika 21. | Mikrostruktura u niskotemperaturnom ZUT-u, snimljeno pri povećanju 200× | 46 |
| Slika 22. | Mikrostruktura u visokotemperaturnom ZUT-u, snimljeno pri povećanju 200× .. | 46 |
| Slika 23. | Mikrostruktura metala navara,snimljeno pri povećanju od 100× | 47 |
| Slika 24. | Uređaj za ispitivanje makrotvrdoće HV10 | 48 |
| Slika 25 | Shematski prikaz pozicija za mjerenje tvrdoće HV10 | 49 |
| Slika 26. | Oprema za mjerenje mikrotvrdoće HV0,2..... | 50 |

Slika 27. Grafički prikaz rezultata mjerenja tvrdoće52

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Parametri navarivanja..... | 35 |
| Tablica 2. Rezultati analize kemijskog sastava materijala ploče | 38 |
| Tablica 3. Rezultati analize kemijskog sastava metala navara | 38 |
| Tablica 4. Kemijski sastav žice za navarivanje zajamčen od strane proizvođača..... | 38 |
| Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10..... | 49 |
| Tablica 6. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV 0,2 | 51 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Opis |
|---------------|-----------------------|
| HV | tvrdća po Vickersu |
| ZUT | zona utjecaja topline |

SAŽETAK

U radu je provedena karakterizacija navarenog sloja od legure G 19 9 S Li nanešenog na ploču od čelika P355GH. Navar je izveden postupkom elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodnom žicom pod zaštitom inertnog plina argona. Analiziran je kemijski sastav ploče i navara te makrostruktura i mikrostruktura navara. Također je izmjerena tvrdoća HV10 i HV0,2 u svim karakterističnim područjima.

U teorijskom dijelu rada opisana je implementacija čelika kao materijala u navarivanju, karakterizacija navarenih slojeva i moguće greške pri navarivanju.

Analiza makrostrukture pokazala je da u navarenom sloju nema uočenih nepravilnosti. Mikrostruktura materijala ploče je izrazito usmjerena, a sastoji se od ferita i perlita. Mikrostruktura metala navara je potpuno austenitna. Linija staljivanja je pravilna i jasno izražena. U zoni utjecaja topline došlo je do porasta kristalnih zrna ferita i perlita osobito uz liniju staljivanja. Najviše vrijednosti tvrdoće HV10 izmjerene su na površini navarenog sloja, a najviše vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 izmjerene su u zoni utjecaja topline. Analizom svih dobivenih rezultata utvrđena je zadovoljavajuća kvaliteta navarenog sloja.

Ključne riječi: karakterizacija, navar, čelik

SUMMARY

In the thesis, the characterization of the overlaid layer of the G 19 9 S Li alloy applied to the P355GH steel plate was carried out. The overlay was made by the process of electric arc welding with a fusible electrode wire under the protection of inert argon gas. The chemical composition of the plate material and the overlay, as well as the macrostructure and microstructure of the overlay, were analyzed. The hardness HV10 and HV0.2 were also measured in all characteristic areas.

The theoretical part of the work describes the implementation of steel as a material in welding, the characterization of the overlaid layer and possible errors during overlaying.

The analysis of the macrostructure showed that there are no observed irregularities in the overlaid layer. The microstructure of the plate material is highly oriented, consisting of ferrite and pearlite. The microstructure of the welded metal is completely austenitic. The melting line is regular and clearly expressed. In the heat-affected zone, there was an increase in ferrite and pearlite crystal grains, especially along the melting line. The highest values of the hardness HV10 were measured on the surface of the overlaid layer, and the highest values of microhardness HV0.2 were measured in the heat-affected zone. The analysis of all obtained results determined the satisfactory quality of the overlaid layer.

Key words: characterization, overlay, steel

1. UVOD

Navarivanje na ploči od čelika za tlačne namjene predstavlja tehnički specifičan proces u industrijskoj proizvodnji, koji ne samo da ima ključnu ulogu u poboljšanju kvalitete čeličnih ploča, već i u njihovoj dugovječnosti, osobito onih koje su predviđene za upotrebu u tlačnim sustavima. Sam proces navarivanja dodanog sloja zahtijeva izuzetno precizno upravljanje svim parametrima zavarivanja, kao što su odabrana tehnika zavarivanja, vrsta i sastav navarenog materijala, kontrola temperature i brzine hlađenja. Važno je postići optimalna svojstva na površini čelika, uzimajući u obzir specifične zahtjeve kao što su otpornost na koroziju, termalne uvjete i mehanička opterećenja. Navareni sloj ne samo da poboljšava mehaničke svojstva osnovnog materijala, već često služi i kao zaštita od oksidacije i korozije, čineći čeličnu ploču stabilnijom u agresivnim radnim uvjetima. Navareni sloj može biti ključan u zaštiti od kemijskih reakcija s agresivnim medijima, kao što su kiseline i lužine, što čini čelične ploče još otpornijima na oštećenja izazvana kemijskim reakcijama

Pravilno izveden postupak navarivanja može značajno povećati životni vijek čeličnih komponenti, smanjujući potrebu za čestim popravcima i održavanjem, što direktno doprinosi ekonomičnosti cijelog sustava. Navarivanje dodatnog sloja na ploči od čelika za tlačne namjene nije samo tehnološki napredan postupak, već i važan faktor u očuvanju sigurnosti, efikasnosti i dugoročne održivosti industrijskih sustava. Zbog svojih ključnih prednosti u pogledu zaštite i optimizacije mehaničkih svojstava, navarivanje je nezamjenjiv proces u modernoj proizvodnji, koji značajno doprinosi u održavanju stabilnosti i pouzdanosti kritičnih industrijskih komponenti, osiguravajući njihovu dugovječnost u složenim radnim uvjetima.

2. IMPLEMENTACIJA ČELIKA KAO MATERIJALA U NAVARIVANJU

Čelik je jedan od najvažnijih materijala u industriji zbog svojih izvanrednih mehaničkih i kemijskih svojstava, kao i svoje široke primjene u raznim industrijskim sektorima. U procesu navarivanja, čelik se koristi kao osnovni materijal na koji se nanosi dodatni navareni sloj, čime se poboljšavaju njegove karakteristike i produžuje njegov radni vijek, osobito u uvjetima visoke temperature, tlaka i agresivnih okolišnih faktora [1]. Implementacija čelika u navarivanje zahtijeva poznavanje različitih vrsta čelika, njihovih svojstava i uloge u specifičnim industrijskim primjenama.

Razumijevanje specifičnih zahtjeva i standarda za čelične ploče, kao i odabir odgovarajućeg dodanog materijala za navarivanje, od ključne je važnosti za postizanje optimalnih mehaničkih svojstava i dugovječnosti proizvoda.

2.1. Vrste čelika i njihova primjena u navarivanju

Čelik je legura koja se sastoji uglavnom od željeza i malih količina ugljika, pratioća proizvodnje mangana i silicija te nečistoća sumpora i fosfora, a ponekad i drugih elemenata poput kroma, nikla, molibdena i vanadija, koji poboljšavaju njegova svojstva [1]. Čelik je jedan od najvažnijih materijala u industriji zbog svojih izvrsnih mehaničkih, kemijskih i fizikalnih svojstava. Među najvažnijim općim svojstvima čelika su čvrstoća, duktilnost, otpornost na koroziju, toplinska i električna vodljivost, te oblikovljivost, što ga čini izuzetno svestranim i korisnim u mnogim industrijskim primjenama [2]. Jedno od ključnih svojstava čelika je njegova čvrstoća, koja ovisi o količini ugljika i legirajućih elemenata u njegovoj strukturi. Čelične legure s višim udjelom ugljika obično su čvršće, ali manje duktilne, što znači da imaju manju sposobnost deformacije prije nego što dođe do loma. Duktilnost, s druge strane, omogućava čeliku da se deformira bez loma, što je važno u primjenama gdje je potrebna visoka otpornost na udarno opterećenje ili gdje se materijal mora prilagoditi određenim oblicima kroz procese poput zavarivanja ili kovanja [3].

Otpornost na koroziju je još jedno značajno svojstvo čelika, iako je sam čelik podložan oksidaciji, osobito kada je izložen vlažnim uvjetima i zraku. Ova otpornost može se poboljšati dodavanjem legirajućih elemenata poput kroma, koji čeliku daje sposobnost stvaranja zaštitnog sloja oksida koji sprječava daljnje oštećenje. Nehrđajući čelik, koji sadrži značajnu količinu

kroma, poznat je po svojoj izvanrednoj otpornosti na koroziju, zbog čega se široko koristi u industrijama koje zahtijevaju visoku izdržljivost u agresivnim kemijskim sredinama, kao što su kemijska, prehrambena i farmaceutska industrija [1]. Čelik također posjeduje dobru toplinsku vodljivost, što znači da brzo prenosi toplinu. Ova karakteristika čelika čini ga korisnim u industrijama koje zahtijevaju materijale koji mogu učinkovito raspršiti toplinu, kao što su motori, kotlovi i razni sustavi za prijenos topline. Istovremeno, čelik ima i visoku temperaturnu stabilnost, što znači da može izdržati visoke temperature bez gubitka svojih mehaničkih svojstava, čineći ga pogodnim za primjene u visokotemperaturnim uvjetima, poput peći i turbina [2].

Električna vodljivost čelika nije tako visoka kao kod metala poput bakra, ali je dovoljna za mnoge industrijske primjene. Zbog toga se čelik često koristi u elektroindustriji, kao što su konstrukcije električnih transformatora, motora i električnih vodova. Jedna od važnih karakteristika čelika je i njegova oblikovljivost. Čelik se može oblikovati u različite oblike putem postupaka poput valjanja, kovanja, lijevanja i ekstrudiranja [4]. Ove tehnike omogućuju proizvodnju čeličnih komponenti u raznim oblicima i veličinama, od tankih ploča i traka do debljih ploča i čeličnih profila, što čelik čini pogodnim za širok spektar aplikacija u građevinskoj, automobilskoj, brodograđevnoj i mnogim drugim industrijama. Osim što čelik ima izvanrednu kombinaciju čvrstoće, otpornosti na koroziju i deformacije, on također ima relativno visoku gustoću, što ga čini težim u odnosu na mnoge druge materijale, poput polimera ili aluminija [3]. Iako to može biti ograničavajući faktor u primjenama gdje je važna mala masa, čelik se i dalje koristi u mnogim konstrukcijskim i industrijskim primjenama zbog svojih drugih superiornih svojstava.

Vrste čelika i njihova primjena u navarivanju imaju ključnu ulogu u mnogim industrijskim procesima, gdje je kvalitetan i dugotrajan spoj između osnovnog materijala i navarenog sloja od presudne važnosti za pouzdanost i sigurnost krajnjeg proizvoda. Čelik, kao materijal, poznat je po svojoj svestranosti, jer različite vrste čelika posjeduju različita svojstva koja im omogućuju primjenu u specifičnim industrijskim uvjetima. Odabir odgovarajuće vrste čelika za navarivanje ovisi o zahtjevima same primjene, kao i o eksploatacijskim uvjetima pod kojima će proizvod raditi, poput temperature, tlaka, kemijskog okruženja i mehaničkih opterećenja [5].

Konstrukcijski i alatni čelici su dvije glavne vrste čelika koji se koriste u različitim industrijskim primjenama zbog svojih specifičnih osnovnih svojstava i prednosti. Iako obje

vrste čelika imaju osnovna svojstva koje uključuju čvrstoću, duktilnost i otpornost na koroziju, oni se razlikuju po svojoj primjeni i tehničkim svojstvima koja su prilagođena specifičnim potrebama. Na slici 1 prikazani su alatni i konstrukcijski čelici.



Alatni čelik



Konstrukcijski čelik

Slika 1. Alatni i konstrukcijski čelici [1]

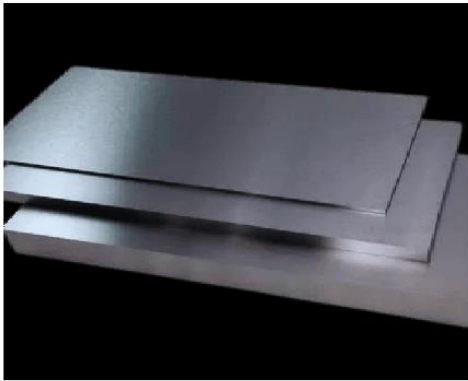
Konstrukcijski čelici su skupina čelika koji se koriste u izradi konstrukcija i drugih konstrukcijskih elemenata [2]. Ovi čelici su dizajnirani da podnose velika mehanička opterećenja, ali se obično ne koriste za alate koji zahtijevaju preciznost ili visoku otpornost na trošenje. Konstrukcijski čelici mogu biti ugljični ili legirani, a legirani uključuje dodatne elemente poput mangana, silicija, kroma ili vanadija, kako bi se poboljšala njihova čvrstoća, otpornost na koroziju i druga mehanička svojstva [1]. Glavne karakteristike konstrukcijskih čelika uključuju dobru obradivost, čvrstoću, duktilnost i otpornost na umor. Ovi čelici koriste se u različitim industrijama, kao što su građevinska industrija, brodogradnja, automobilska industrija i proizvodnja transportnih sredstava, gdje su potrebni čvrsti i dugotrajni materijali za izradu konstrukcija, okvira, nosača i drugih velikih konstrukcijskih elemenata. Neki od najpoznatijih tipova konstrukcijskih čelika uključuju S235, S275 i S355, koji se koriste za proizvodnju čeličnih greda, profila, ploča i drugih komponenti koji se koriste u građevinskoj industriji [6].

Alatni čelici, s druge strane, dizajnirani su za specifične primjene u proizvodnji alata i opreme koja zahtijeva visoku preciznost, otpornost na trošenje i sposobnost podnošenja visokih temperatura. Alatni čelici su legirani čelici koji obično sadrže elemente poput kroma, volframa, vanadija i molibdena, koji im daju izuzetnu otpornost na abraziju, visoku čvrstoću i stabilnost

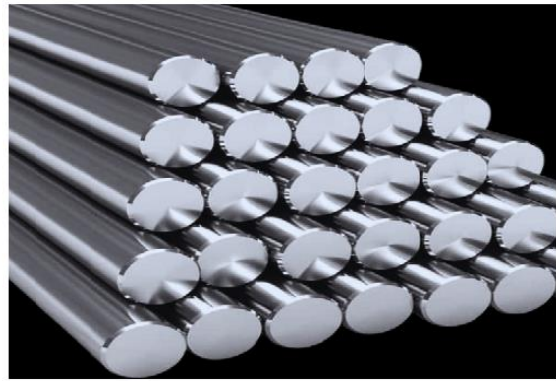
pri visokim temperaturama [2]. Ova svojstva čine alatni čelik idealnim za proizvodnju alata koji se koriste za obradu drugih materijala, kao što su brusni alati, rezni alati, kalupi, matrice, preše i drugi visoko precizni alatni materijali. Alatni čelici se obično dijele na dvije glavne kategorije: nehrđajući alatni čelici i čelici za kaljenje. Nehrđajući alatni čelici, kao što su tipovi koji sadrže visok udio kroma, koriste se za proizvodnju alata koji moraju biti otporni na koroziju, dok čelici za kaljenje, poput onih koji sadrže visoki udio ugljika i legirajućih elemenata, koriste se za proizvodnju alata koji moraju podnijeti visoka mehanička opterećenja i temperature, poput alata za obradu metala ili polimera [1].

Jedna od ključnih karakteristika alatnih čelika je njihova sposobnost da zadrže visoku čvrstoću i tvrdoću pri visokim temperaturama, što im omogućava da podnose opterećenja u uvjetima gdje su trenje i toplina izuzetno visoki. Osim toga, alatni čelici imaju i dobru otpornost na umor materijala, što znači da se ne troše brzo, čak i pri dugotrajnoj uporabi [1]. Alatni čelici se najčešće koriste u industrijama poput automobilske, zrakoplovne, metalurške industrije te industrije prerade polimera, gdje su potrebni precizni i dugotrajni alati za obradu različitih materijala.

Osim konstrukcijskih i alatnih čelika, čelici se mogu podijeliti u nekoliko kategorija prema kemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima, a najčešće se koriste ugljični čelik, legirani čelik i nehrđajući čelik [7]. Ugljični čelik je najjednostavnija skupina čelika, gdje je ugljik glavni legirajući element. Ovaj čelik ima izvrsnu obradivost i lako se koristi u industrijskim procesima navarivanja, no njegova otpornost na koroziju i visoke temperature može biti ograničena. Legirani čelici, s dodatkom legirajućih elemenata poput nikla, kroma i molibdena, poboljšavaju svojstva čelika u smislu otpornosti na koroziju, visoke temperature i čvrstoće [1]. Ovi čelici posebno su korisni u aplikacijama koje zahtijevaju visoke mehaničke karakteristike, kao što su tlačne posude i oprema koja se koristi u industriji nafte i plina. Nehrđajući čelik, koji sadrži najmanje 10,5% kroma, poznat je po svojoj visokoj otpornosti na koroziju i često se koristi u uvjetima gdje je potrebna dugoročna zaštita od agresivnih kemikalija i visoke vlačne čvrstoće [8]. Ove vrste čelika najčešće se koriste u proizvodnji ploča za tlačne posude i drugih kritičnih komponenata u industrijama poput kemijske, energetske i brodograđevne. Na slici 2 prikazani su ugljični, legirani i nehrđajući čelici.



Ugljični čelik



Legirani čelik



Nehrđajući čelik

Slika 2. Ugljični, legirani i nehrđajući čelik [7]

Uloga čelika u industrijskom navarivanju ključna je za postizanje visokokvalitetnih spojeva koji omogućuju dugoročnu pouzdanost i sigurnost konstrukcija. Tijekom procesa navarivanja, čelik se koristi kao osnovni materijal na koji se nanosi navareni sloj, čime se poboljšavaju određena svojstva poput otpornosti na visoke temperature, koroziju i mehaničke udarce [9]. Primjena čelika u navarivanju omogućuje izradu komponenata koje moraju podnijeti visoke tlakove, ekstremne temperature i druge nepovoljne uvjete rada, kao što su tlačne posude, kotlovi, rezervoari i cjevovodi. U tom kontekstu, važnost odabira odgovarajuće vrste čelika za osnovni materijal i navareni sloj postaje očita jer pogrešan odabir može dovesti do neadekvatnih svojstava spoja, što može negativno utjecati na performanse i sigurnost proizvoda [7]. Odabir vrste čelika za navarivanje također uključuje razmatranje specifičnih mehaničkih svojstava kao što su čvrstoća, žilavost, otpornost na umor, kao i otpornost na visoke temperature i kemijske utjecaje. U tom smislu, proizvođači često koriste čelik s dodatkom legirajućih elemenata kako bi postigli određena svojstva koja su potrebna za specifične

aplikacije [10]. Na primjer, čelične ploče koje se koriste za tlačne posude često su legirane s kromom i molibdenom kako bi se povećala njihova otpornost na visoke temperature i agresivne medije. Ovi čelici mogu se dodatno obraditi kako bi se poboljšala njihova svojstva tijekom navarivanja, čime se povećava njihova dugovječnost i pouzdanost.

Prednosti i nedostaci različitih vrsta čelika mogu značajno utjecati na izbor materijala za specifične industrijske primjene, uključujući navarivanje, gdje se zahtijevaju različita svojstva u pogledu čvrstoće, otpornosti na koroziju, žilavosti i otpornosti na visoke temperature i tlaka [11]. Svaka vrsta čelika, ovisno o svom kemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima, ima svoje prednosti i nedostatke koji određuju njezinu primjenu u industrijskim procesima. Ugljični čelik je osnovna vrsta čelika, poznat po svojoj niskoj cijeni i jednostavnosti obrade. Njegove prednosti uključuju dobru obradivost, visoku čvrstoću i dugovječnost u primjenama koje ne zahtijevaju visoku otpornost na koroziju ili ekstremne temperature [1]. Međutim, nedostatak ugljičnog čelika je njegova ograničena otpornost na koroziju, osobito u agresivnim okruženjima, kao i smanjena otpornost na visoke temperature, što može ograničiti njegovu primjenu u sustavima pod tlakom ili povišenim temperaturama.

Legirani čelik s dodatkom elemenata poput nikla, kroma, molibdena i vanadija poboljšava otpornost na koroziju, visoke temperature i umor materijala [12]. Prednosti legiranih čelika uključuju veću čvrstoću, otpornost na oksidaciju i bolja svojstva pri visokom tlaku i temperaturama. Ovi čelici često se koriste u aplikacijama poput tlačnih posuda, kotlova i cjevovoda, gdje su potrebna dobra mehanička svojstva i otpornost na koroziju. Nedostaci legiranih čelika uključuju višu cijenu u odnosu na ugljične čelike i složeniju obradu, što može povećati troškove proizvodnje [10]. Nehrđajući čelik, koji sadrži najmanje 10,5% kroma, poznat je po izuzetnoj otpornosti na koroziju i sposobnosti održavanja svojih mehaničkih svojstava u agresivnim okruženjima. Prednosti nehrđajućeg čelika uključuju visoku otpornost na koroziju, dugovječnost, i sposobnost održavanja čvrstoće na visokim temperaturama, što ga čini idealnim za primjene u kemijskoj i energetskej industriji [13]. Međutim, nedostaci uključuju relativno visoku cijenu, teže zavarivanje zbog sklonosti stvaranju pukotina, kao i smanjenu otpornost na visoke udarne sile u usporedbi s nekim drugim vrstama čelika.

Specifičnosti čelika za visoke temperature i tlakove odnose se na vrstu čelika koja je dizajnirana za rad u ekstremnim uvjetima gdje su prisutni visoki tlakovi, temperature i agresivni mediji [12]. U takvim uvjetima, čelik mora zadržati svoja mehanička svojstva i ne smije doći do degradacije ili pucanja materijala. Legirani čelici, osobito oni s visokim udjelom kroma i

molibdena, koriste se za ove primjene zbog svoje sposobnosti da podnesu visoke temperature i tlakove bez gubitka čvrstoće ili žilavosti. Za visoke temperature, čelik mora posjedovati otpornost na oksidaciju i koroziju, kao i sposobnost zadržavanja svojih mehaničkih svojstava pri visokim temperaturama [14]. Materijali poput legura na bazi kroma (npr. 9 –12 % kroma) koriste se za izradu komponenata koje su izložene temperaturama iznad 500 °C, poput kotlova, peći i sustava za prijenos topline [14]. Ovi čelici obično sadrže i druge elemente poput molibdena, što im daje otpornost na visoke temperature i umor.

Čelici za tlačne namjene moraju posjedovati visoku čvrstoću i otpornost na pucanje pod naprezanjima koja nastaju zbog visokog tlaka. Ti čelici se odlikuju visokom vlačnom čvrstoćom, otpornosti na pucanje i lakoćom obrade, ali mogu biti osjetljivi na koroziju u agresivnim okruženjima. Za specifične primjene pod ekstremnim uvjetima, odabir pravog čelika temelji se na kombinaciji različitih svojstava, uključujući otpornost na visoke temperature, tlačne naprezanja, koroziju i umor [15]. Ponekad je potrebno koristiti i kompozitne materijale koji se mogu navarivati na osnovni čelik kako bi se poboljšala određena svojstva, poput otpornosti na koroziju ili povećanja čvrstoće na visokim temperaturama.

2.2. Čelične ploče u industrijskim aplikacijama

Čelične ploče imaju važnu ulogu u mnogim industrijskim primjenama, a posebno su značajne u industrijama poput brodogradnje, energetske i kemijske industrije, te proizvodnji tlačnih posuda. Zbog svojih izvanrednih mehaničkih karakteristika, čelične ploče pružaju visoku čvrstoću, otpornost na udarce, dugovječnost i izdržljivost, kao i otpornost na visoke temperature i tlakove [16]. Ova svojstva čine ih nezamjenjivim materijalom za izradu raznih industrijskih objekata i komponenti koje moraju izdržati ekstremne uvjete. U industriji tlačnih posuda, čelične ploče služe kao temeljni materijal za proizvodnju spremnika, kotlova, reaktora i drugih struktura koje moraju podnijeti visoke unutarnje tlakove. Ovisno o specifičnim zahtjevima primjene, čelične ploče mogu biti izrađene od različitih vrsta čelika, uključujući ugljični čelik, legirani čelik i nehrđajući čelik, koji se odabiru na temelju svojih mehaničkih svojstava, otpornosti na koroziju, visoke temperature i tlaka [13]. Na slici 3 prikazane su čelične ploče za navarivanje.

primjenama, čelične ploče moraju zadovoljiti određene standarde i regulative kako bi se osigurala njihova kvaliteta, sigurnost i dugovječnost u uvjetima visokih tlaka, temperatura i mehaničkih naprezanja. Među najvažnijim međunarodnim standardima za čelične ploče nalaze se ISO standardi, kao što je ISO 9001, koji se koristi za osiguranje kvalitete u proizvodnji čeličnih ploča, te ISO 13706 koji definira specifikacije za čelične ploče u brodogradnji [1]. Osim toga, u Sjedinjenim Američkim Državama primjenjuju se ASME kodovi, poput ASME Boiler and Pressure Vessel Code, koji postavljaju smjernice za odabir i upotrebu čeličnih ploča u tlačnim posudama.

Europski standardi, kao što su EN 10028 za proizvodnju čeličnih ploča za tlačne posude i EN 10204 za certifikaciju i inspekciju materijala, također reguliraju primjenu čeličnih ploča [1]. Uz same standarde, važno je da čelične ploče posjeduju odgovarajuće certifikate usklađenosti i da su prošle stroge inspekcije, uključujući ispitivanja čvrstoće, lomne žilavosti i otpornosti na koroziju, kako bi se osigurao njihov kvalitetan rad u uvjetima visokih temperatura i tlaka. Ovi standardi i regulative jamče da čelične ploče koje se koriste u industrijskim aplikacijama zadovoljavaju visoke tehničke zahtjeve, čime se osigurava dugoročna sigurnost, pouzdanost i učinkovitost u radu.

S obzirom na široku primjenu, čelične ploče moraju udovoljavati strogim tehničkim specifikacijama i zahtjevima koji osiguravaju njihovu sigurnost, dugovječnost i učinkovitost u radnim uvjetima. Tehničke specifikacije i zahtjevi za čelične ploče obuhvaćaju nekoliko ključnih parametara, kao što su kemijski sastav, mehanička svojstva, otpornost na koroziju i druga svojstva koja su bitna za određene industrijske primjene. Jedan od najvažnijih tehničkih zahtjeva za čelične ploče je kemijski sastav [19]. Za čelične ploče koje se koriste u zahtjevnim industrijskim primjenama, poput tlačnih posuda, brodskih konstrukcija ili struktura koje su podložne koroziji, ključni su visokokvalitetni legirani čelici koji mogu pružiti potrebnu čvrstoću, otpornost na koroziju i otpornost na visoke temperature. Na primjer, čelične ploče koje se koriste u industriji brodogradnje moraju imati visoki sadržaj nikla ili molibdena, dok čelične ploče za energetske sustave često sadrže visoke udjele kroma kako bi se osigurala potrebna otpornost na visoke temperature i oksidacijske procese [20].

Mehanička svojstva, uključujući čvrstoću na tlačno i vlačno naprezanje, također su ključni faktori u odabiru čeličnih ploča za određene industrijske primjene. Čelične ploče moraju biti u stanju podnijeti visoka naprezanja bez deformacija ili lomova. Čvrstoća materijala, zajedno s njegovom otpornosti na savijanje i udarce, osigurava dugovječnost i sigurnost

struktura u kojima se koriste [8]. Pored toga, važna su i svojstva poput elastičnosti i tvrdoće koja omogućuju da čelične ploče zadrže svoju stabilnost i funkcionalnost pod različitim opterećenjima. S obzirom na široku primjenu čeličnih ploča, oblici i dimenzije tih ploča variraju ovisno o industrijskim zahtjevima. U osnovi, čelične ploče proizvode se u različitim debljinama, širinama i duljinama, ovisno o potrebama konkretne primjene [11]. U industriji građevine i brodogradnje, ploče se često koriste u debljinama od nekoliko milimetara do nekoliko centimetara, dok u industriji energetske opreme mogu biti potrebne deblje ploče, s debljinama koje dosežu nekoliko desetaka centimetara, ovisno o specifičnim zahtjevima tlačnih sustava. Standardne dimenzije čeličnih ploča također variraju, a najčešće se kreću u širini od 1,5 do 2 metra i duljini od 3 do 12 metara [15]. Međutim, dimenzije se mogu prilagoditi specifičnim potrebama i tehničkim zahtjevima klijenata, a ploče se često režu na željene veličine kako bi odgovarale konkretnoj primjeni.

Oblici čeličnih ploča također variraju i mogu uključivati ravne ploče, zakrivljene ploče, te ploče specifičnih geometrijskih oblika koje se koriste za izradu složenijih struktura. U industriji brodogradnje, na primjer, čelične ploče često se režu u obliku zakrivljenih ploča koje se koriste za izradu brodskih trupa [17]. Slično tome, u automobilskoj industriji, čelične ploče se često oblikuju u specifične oblike koji omogućuju njihovu primjenu u proizvodnji karoserija i drugih dijelova vozila. U kontekstu standarda, čelične ploče moraju biti proizvedene u skladu s različitim nacionalnim i međunarodnim normama, kao što su ASTM, ISO i EN standardi, koji osiguravaju uniformnost i kvalitetu materijala [1]. Ovi standardi definiraju sve od minimalnih zahtjeva za čistoću čelika, do metoda ispitivanja koja se primjenjuju za provjeru kvalitete i sigurnosti čeličnih ploča. Osim toga, postoji i niz industrijskih certifikata koji osiguravaju da čelične ploče udovoljavaju specifičnim zahtjevima, kao što su certifikati o kvaliteti, sigurnosti i ekološkim standardima.

Čelične ploče imaju ključnu ulogu u mnogim industrijskim procesima i primjenama. Kako bi udovoljile zahtjevima za sigurnost, trajnost i učinkovitost, važno je da njihove tehničke specifikacije i dimenzije budu prilagođene specifičnim potrebama industrije, a kvaliteta materijala mora biti strogo kontrolirana.

2.3. Vrste čelika za tlačne posude i njihova svojstva

Čelik koji se koristi za izradu tlačnih posuda, kao što su kotlovi, rezervoari i drugi spremnici koji moraju podnijeti visoke unutarnje pritiske, mora posjedovati specifična svojstva

koja osiguravaju njegovu dugotrajnu izdržljivost i sigurnost u radnim uvjetima. Tlačne posude se koriste u različitim industrijskim sektorima, uključujući energetiku, kemijsku industriju, brodogradnju i proizvodnju nafte i plina, gdje su podložne visokim tlakovima i temperaturnim promjenama. Zbog toga, čelik za tlačne posude mora zadovoljiti visoke tehničke zahtjeve i posjedovati osobine koje mu omogućuju izdržavanje tih ekstremnih uvjeta. Jedan od ključnih tipova čelika koji se koristi za izradu tlačnih posuda je čelik za kotlove i tlačne rezervoare [5]. Ovaj čelik obično sadrži visoki udio legirajućih elemenata, poput kroma, molibdena i vanadija, koji mu omogućuju da podnese visoke temperature i unutarnje pritiske. Čelične ploče koje se koriste u kotlovima i tlačnim rezervoarima moraju posjedovati izvrsnu čvrstoću na tlak, kao i dobru otpornost na umor, jer su ove posude često podložne cikličnim opterećenjima koja mogu uzrokovati oštećenja ako materijal nije dovoljno izdržljiv [19]. Također, ove vrste čelika moraju biti otporne na oksidaciju i koroziju, s obzirom na to da su tlačne posude često izložene uvjetima visoke temperature, vlage i kemikalija koje mogu uzrokovati kemijske reakcije s materijalom.

Za čelik za kotlove i tlačne rezervoare, ključna svojstva uključuju visoku čvrstoću, otpornost na koroziju, dobru žilavost i mogućnost oblikovanja, a istovremeno mora biti pogodan za različite tehnike obrade, uključujući zavarivanje, valjanje i rezanje [21]. S obzirom na zahtjeve sigurnosti, ovaj čelik mora biti testiran na visoke pritiske, kako bi se osigurao njegov rad u uvjetima koji premašuju normalne operativne temperature i tlakove. Pored toga, čelik za kotlove mora imati i visoku otpornost na koroziju, jer tlačne posude često rade u agresivnim kemijskim okruženjima gdje su izložene kiselinama, vlazi i drugim korozivnim supstancama [18]. Svojstva čelika za tlačne posude u pogledu otpornosti na koroziju predstavljaju ključni faktor u njegovoj primjeni u industrijama gdje su čelične posude izložene kemijskim reakcijama i vanjskim uvjetima koji pogoduju nastanku korozije. Korozija je prirodan proces koji može značajno smanjiti dugovječnost i sigurnost tlačnih posuda, što čini otpornost na koroziju izuzetno važnom za odabir odgovarajućeg čelika. Čelične posude koje se koriste u industriji nafte i plina, kemijskoj industriji i energetici često su izložene kemijskim agensima, vrućim plinovima i vlazi, pa čelik koji se koristi za ove primjene mora biti izuzetno otporan na koroziju [22].

Za poboljšanje otpornosti na koroziju, čelik za tlačne posude često sadrži legirajuće elemente poput kroma i nikla, koji poboljšavaju stabilnost čelika u agresivnim uvjetima. Nehrđajući čelik, koji se često koristi za tlačne posude u kemijskoj industriji, sadrži visok udio

kroma (obično više od 10 %), što mu daje visoku otpornost na oksidaciju i koroziju [3]. Ovisno o specifičnim uvjetima, mogu se koristiti i drugi legirajući čelici koji uključuju mangan, silicij i molibden, koji poboljšavaju otpornost čelika na povišene temperature i kemijske reakcije, produžujući njegovu izdržljivost i smanjujući potrebu za održavanjem ili zamjenom. Otpornost na koroziju također uključuje mehaničku otpornost, odnosno sposobnost čelika da podnese unutarnje naprezanje koje nastaje zbog promjena tlaka i temperature. U uvjetima visoke vlažnosti, visoke temperature ili prisutnosti kemijskih tvari poput sumpornih spojeva, čelik mora biti dizajniran tako da se izbjegnu korozija i degradacija materijala [6]. Osim toga, moderni čelici za tlačne posude često imaju i premaze koji dodatno štite materijal od negativnih vanjskih utjecaja, čime se povećava njegov vijek trajanja i sigurnost u industrijskoj primjeni.

Mehanička svojstva čelika za tlačne posude ključna su za osiguranje sigurnosti, dugovječnosti i učinkovitosti tih posuda u industrijskim primjenama. Tlačne posude, koje se koriste u različitim industrijskim granama, kao što su kemijska industrija, energetika i brodogradnja, podložne su velikim naprezanjima koja mogu biti uzrokovana visokim tlakom i temperaturama [22]. Iz tog razloga, mehanička svojstva čelika, kao što su čvrstoća, duktilnost, čvrstoća na savijanje i otpornost na koroziju, moraju biti pažljivo odabrana i prilagođena specifičnim uvjetima rada tlačnih posuda. Jedno od najvažnijih svojstava čelika za tlačne posude je čvrstoća na tlačne naprezanja, koja osigurava da čelik može podnijeti visoke tlakove bez loma ili trajne deformacije [21]. Osim toga, čelik mora imati dovoljnu duktilnost, što znači da mora biti sposoban za deformaciju prije nego što dođe do loma. Ovo svojstvo omogućuje da tlačna posuda podnese promjene u tlaku i temperaturi, kao i vibracije i udarce koji mogu nastati tijekom rada. Uz to, čelik za tlačne posude mora imati visoku granicu plastične deformacije, što znači da mora izdržati velike sile bez značajnog gubitka oblika, čime se osigurava stabilnost posude tijekom operacija pod visokim tlakom.

Mehanička svojstva čelika također uključuju njegovu otpornost na koroziju, koja je osobito važna u industrijskim procesima gdje se čelične tlačne posude izlažu agresivnim kemijskim tvarima, vlazi ili visokim temperaturama [17]. Za ovakve uvjete koristi se legirani čelik koji ima poboljšane otpornosti na koroziju. Pored toga, čelik za tlačne posude mora imati dobru obradivost, što omogućuje laku proizvodnju čeličnih ploča i cijevi u obliku posuda, uz očuvanje svih potrebnih svojstava. S obzirom na specifične uvjete u kojima tlačne posude rade, utjecaj visokih temperatura i tlaka na čelik za tlačne posude također je ključan faktor koji treba uzeti u obzir pri njegovom odabiru. Visoke temperature mogu značajno utjecati na mehanička

svojstva čelika, smanjujući njegovu čvrstoću i duktilnost [9]. Naime, s porastom temperature, čelik postaje podložniji deformacijama, a granica plastične deformacije se smanjuje. To može dovesti do opasnosti od loma ili neplanirane deformacije tlačnih posuda, osobito kada se koriste u industrijskim procesima koji uključuju visoke temperature, kao što su rafinerije, kemijske tvornice ili energetske postrojenja.

Visoki tlak također može imati negativan utjecaj na čelik za tlačne posude, uzrokujući promjene u strukturi materijala. Visoki tlak može izazvati elastoplastične deformacije u čeliku, što može rezultirati njegovim oštećenjem tijekom vremena [19]. Kako bi se spriječile te negativne posljedice, čelik za tlačne posude mora imati odgovarajuće svojstvo otpornosti na umor, koji nastaje uslijed ponovljenih ciklusa opterećenja. Uz to, važno je da čelik zadrži svoju čvrstoću i stabilnost tijekom promjena tlaka i temperature, a to se postiže pažljivim odabirom legura i primjenom naprednih tehnologija obrade čelika. Utjecaj visokih temperatura na čelik također podrazumijeva mogući gubitak mehaničkih svojstava u uvjetima izlaganja ekstremnim toplinskim udarima ili stalnim visokim temperaturama, što je čest slučaj u industrijama poput petroindustrije, termoelektrana i brodogradnje [16]. Visoke temperature mogu izazvati oštećenja na mikrostrukturi čelika, smanjujući njegovu duktilnost i čvrstoću, što može povećati rizik od pucanja ili trajne deformacije tlačne posude [12]. Kako bi se osigurala otpornost na visoke temperature, u čelik se dodaju različite legure poput kroma, molibdena i vanadija, koje poboljšavaju otpornost na oksidaciju i koroziju pri visokim temperaturama.

2.4. Odabir dodanog materijala za navarivanje

Odabir dodanog materijala za navarivanje je ključni korak u procesima navarivanja, jer odabrani materijal mora odgovarati specifikacijama osnovnog materijala i primjeni u kojoj će se koristiti navareni spoj. Dodani materijali za navarivanje, poznati i kao navareni materijali, obično se koriste u obliku žice, elektroda ili praha, i njihova glavna funkcija je stvaranje čvrstih i izdržljivih spojeva koji će održati čvrstoću, otpornost na koroziju i druge poželjne karakteristike u završnoj konstrukciji [22]. Vrste materijala za navarivanje u industriji čelika obuhvaćaju širok raspon opcija, ovisno o specifičnim zahtjevima industrijskih aplikacija. Osnovni materijali, kao što su ugljični čelik, legirani čelik, nehrđajući čelik, čelik za kotlove i tlačne posude, zahtijevaju dodatne materijale koji mogu osigurati potrebnu otpornost na visoke temperature, vlagu, kemijske tvari i druge agresivne uvjete.

Jedan od najčešće korištenih materijala za navarivanje u industriji čelika je čelična žica. Ova vrsta navarenog materijala koristi se za spajanje čelika različitih vrsta, uključujući ugljični čelik, legirani čelik i nehrđajući čelik [13]. Žica za navarivanje može biti obložena raznim legiranim elementima, poput kroma, nikla, mangana ili molibdena, kako bi poboljšala svojstva spojnog materijala, uključujući otpornost na visoke temperature, mehaničku otpornost i otpornost na koroziju. Također, žice za navarivanje mogu biti korištene za restauraciju oštećenih dijelova ili za poboljšanje svojstava određenih dijelova, kao što su komponente izložene velikim naprezanjima [15]. Drugi tip materijala za navarivanje uključuje elektrode koje se često koriste u elektro-kontaktnom zavarivanju. Elektrode također mogu biti obložene posebnim premazima koji omogućuju stabilnost zavarivanja i stvaranje kvalitetnih spojeva s visokim mehaničkim svojstvima. Ovisno o specifičnoj primjeni, elektrode mogu biti prekrivene osnovnim legiranim elementima, što povećava otpornost na toplinske šokove, koroziju i druge fizičko-kemijske utjecaje [21].

U industriji čelika, često se koristi i praškasti materijal za navarivanje, osobito u procesima kao što je plazma navarivanje ili plinsko navarivanje. Ovaj materijal u prahu se koristi za navarivanje složenih spojeva ili za dodavanje specifičnih svojstava, poput otpornosti na visoke temperature, koroziju ili trošenje [18]. Prašci za navarivanje mogu biti složeni i koristiti različite kemijske elemente koji omogućuju preciznu kontrolu kvalitete zavarivanja. Kriteriji za odabir odgovarajućeg materijala za navarivanje temelje se na nekoliko ključnih čimbenika koji osiguravaju optimalne performanse zavarivanja. Jedan od najvažnijih kriterija je kompatibilnost s osnovnim materijalom. Odabrani navareni materijal mora biti kompatibilan s osnovnim materijalom tako da spojevi budu izdržljivi, homogeni i otporni na koroziju, mehaničko naprezanje i druge vanjske utjecaje [10]. Ako se osnovni materijal sastoji od legiranog čelika, potrebno je odabrati navareni materijal koji će omogućiti očuvanje tih svojstava.

Mehanička svojstva su također ključna za odabir materijala za navarivanje. Ovisno o primjeni, zavareni spojevi moraju imati odgovarajuću čvrstoću, žilavost i otpornost na umor. Čelični spojevi izloženi visokim temperaturama, tlakovima ili cikličnim opterećenjima zahtijevaju navarene materijale koji imaju slična mehanička svojstva kao osnovni materijal, ali i poboljšanja u određenim aspektima, kao što su otpornost na visoke temperature ili koroziju [1]. Otpornost na koroziju je još jedan bitan kriterij, posebno za aplikacije u kemijskoj industriji, energetici ili u uvjetima koji uključuju vlagu ili agresivne kemijske tvari. Za ove primjene,

potrebno je odabrati navareni materijal koji pruža dodatnu otpornost na oksidaciju i koroziju, čime se produžava vijek trajanja zavarene komponente. Odabir navarenog materijala mora uzeti u obzir tehnološke uvjete zavarivanja. Neki materijali zahtijevaju specifične uvjete za zavarivanje, kao što su određeni napon, struja ili brzina postupka zavarivanja [14]. Odabrani navareni materijal mora omogućiti optimalno zavarivanje, što znači da mora biti lako obradiv, mora omogućiti stvaranje čistog spoja i mora biti u mogućnosti podnijeti eventualne termičke šokove ili temperaturne promjene koje nastaju tijekom procesa.

Sastav i karakteristike dodanih materijala, posebice u kontekstu varenja čelika za tlačne posude, od ključne su važnosti za osiguranje potrebnih mehaničkih svojstava navarenog sloja [17]. Dodatni materijali, kao što su različite vrste elektrode i žice za navarivanje, izravno utječu na karakteristike navarenog sloja, čime se omogućava postizanje željenih čvrstoće, otpornosti na koroziju, termalne stabilnosti, te duktilnosti i elastičnosti navarenog spoja. Ovisno o vrsti i zahtjevima industrijskog procesa, pravilno odabrani dodani materijali omogućuju izradu navarenog sloja koji je stabilan, dugotrajan i siguran za primjenu u tlačnim posudama [22]. Jedan od osnovnih parametara kod odabira dodanih materijala je kemijski sastav koji mora biti kompatibilan s osnovnim materijalom, u ovom slučaju čelikom za tlačne posude. Osnovni materijali čeličnih ploča obično su legirani čelici koji zahtijevaju dodatne materijale koji se mogu uskladiti s njihovim kemijskim sastavom, kako bi se izbjegli problemi s oksidacijom ili korozijom, koji bi mogli ugroziti stabilnost posude pod visokim tlakom i temperaturama. Na primjer, za čelike legirane kromom i molibdenom, dodavanje žica koje sadrže te iste elemente može pomoći u očuvanju svih korisnih svojstava čelika i navarenih spojeva [11]. Također, kod visokotlačnih primjena, odabrani dodani materijali moraju osigurati i otpornost na umor i termalne cikluse.

Dodani materijali također mogu obuhvatiti i druge legure kao što su nikel, vanadij i mangan, koji poboljšavaju otpornost na koroziju i povećavaju duktilnost navarenog sloja [4]. Zavisno o vrsti procesa navarivanja, različiti tipovi elektrode (npr. rutilne ili bazične elektrode) mogu se koristiti za postizanje optimalnih svojstava za specifične primjene. Na primjer, bazične elektrode su često korištene za zavarivanje čelika pod visokim tlakom jer nude bolje rezultate u pogledu otpornosti na pukotine i bolju duktilnost. Rutilne elektrode se, s druge strane, koriste za poboljšanje kvalitete površine i lakšeg rukovanja [16]. Osim kemijskog sastava, osobite karakteristike dodanih materijala, poput njihove termalne stabilnosti i mogućnosti da podnose visoke temperature bez gubitka mehaničkih svojstava, također su ključne. U industriji tlačnih

posuda, zavarivanje često uključuje visoke temperature koje mogu izazvati toplinske udare na materijalu [13]. Dodatni materijali koji imaju dobru termalnu stabilnost omogućuju navarenom sloju da podnese te promjene temperature bez degradacije svojih svojstava, što je od esencijalne važnosti za dugoročnu sigurnost posude.

Utjecaj odabranog materijala na kvalitetu navarenog sloja ima direktne posljedice na stabilnost i sigurnost tlačnih posuda. Kvaliteta navarenog sloja određuje čvrstoću, otpornost na pucanje, fleksibilnost, kao i otpornost na koroziju i oksidaciju [10]. Ako su dodani materijali neprikladno odabrani, to može dovesti do problema poput slabije povezanosti između osnovnog i navarenog sloja, što povećava rizik od puknuća ili propadanja posude pod visokim tlakom. Neodgovarajući dodani materijali mogu također izazvati nepravilnosti u strukturi navarenog sloja, čime se smanjuje njegova sposobnost da izdrži stresove uzrokovane tlakom i temperaturom [7]. Na primjer, kod primjene neodgovarajuće žice za varenje može doći do stvaranja mikropukotina koje mogu rezultirati velikim oštećenjima tijekom vremena. Također, u slučajevima kada dodani materijali ne podnose visoke temperature, može doći do promjena u strukturi metala, što vodi do smanjenja čvrstoće navarenog sloja, čineći ga podložnim lomu [22].

Dobar odabir materijala za zavarivanje, u kombinaciji s odgovarajućim tehnikama i tehnologijama, ključan je za postizanje optimalnih svojstava navarenog sloja. Također, potrebno je redovito provoditi kontrolu kvalitete navarenih spojeva, uključujući metode poput ultrazvučnog ispitivanja, radiografije i mehaničkih ispitivanja, kako bi se osigurala dugovječnost i sigurnost tlačnih posuda [19]. Iz tih razloga, odabrani dodani materijali moraju odgovarati specifičnim tehničkim zahtjevima i mora se osigurati njihova dugoročna stabilnost i otpornost na okolinske uvjete.

3. KARAKTERIZACIJA NAVARENOG SLOJA

Postupci navarivanja imaju ključnu ulogu u poboljšanju svojstava materijala, produljenju vijeka trajanja komponenti i osiguravanju njihovih mehaničkih karakteristika, poput čvrstoće, otpornosti na koroziju i sposobnosti podnošenja termalnih i mehaničkih opterećenja. Neki od najčešće korištenih postupaka navarivanja, kao što su MIG/MAG, TIG, elektrolučno zavarivanje i lasersko navarivanje. Svaki od ovih postupaka ima svoje specifičnosti u pogledu tehnoloških zahtjeva, primjena, prednosti i ograničenja.

3.1. Struktura navarenog sloja

Struktura navarenog sloja ključna je za dugovječnost, čvrstoću i sigurnost zavarenih spojeva, a sastoji se od nekoliko mikrostrukturnih karakteristika koje se formiraju tijekom zavarivanja. Proces zavarivanja uzrokuje različite promjene u strukturi materijala koje ovise o parametrima zavarivanja, kao što su temperatura, brzina hlađenja, vrsta materijala i vrsta elektroda [37]. Mikrostruktura navarenog sloja ovisi o nizu faktora, uključujući vrstu metala, parametre zavarivanja i brzinu hlađenja. Glavni čimbenici koji utječu na mikrostrukturu navarenog sloja uključuju veličinu kristalnih zrna, raspodjelu faza i prisutnost nečistoća. U većini slučajeva, tijekom procesa zavarivanja dolazi do stvaranja martenzitne, perlitne ili austenitne strukture, ovisno o vrsti čelika ili legure koja se navaruje [37]. U čeličnim materijalima, kao što je niskolegirani čelik, brza hlađenja mogu uzrokovati formiranje martenzita, što može povećati tvrdoću, ali i krhkost navarenog sloja. Na suprotnom kraju spektra, spora hlađenja mogu dovesti do formiranja feritne ili perlitne strukture, što pruža bolju duktilnost, ali manju tvrdoću.

U legiranim čelicima, poput nehrđajućih čelika, obično se formira austenitna struktura u navarenom sloju, koja omogućuje bolje mehaničke osobine u uvjetima korozije [38]. Mikrostruktura može također uključivati prisutnost šupljina ili pora osobito u neurednim ili nepravilnim zavarivačkim postupcima [35]. Svi ovi mikrostrukturni čimbenici utječu na čvrstoću, otpornost na koroziju, duktilnost i druge osobine zavarenog spoja.

Prijelazna zona između osnovnog materijala i navarenog sloja je kritična jer predstavlja granicu gdje se mijenjaju mikrostrukturne karakteristike. Ova zona, koja se naziva i zona utjecaja topline (engl. *Heat affected zone* – HAZ), je specifična jer se u njoj javljaju promjene u strukturi koje nisu toliko izražene kao u samom navarenom sloju, ali ipak značajno utječu na

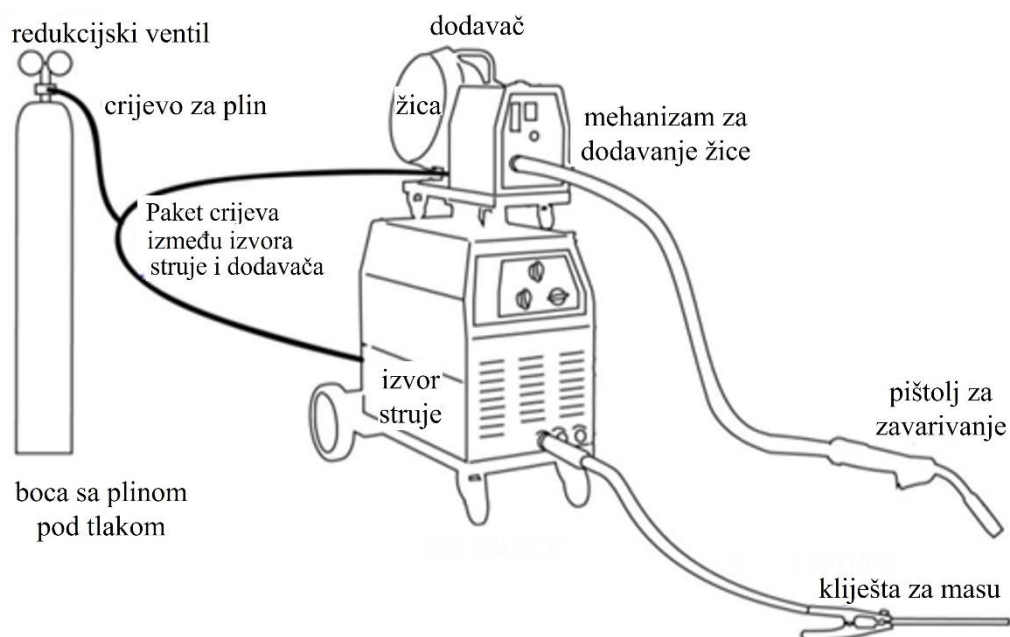
mehanička svojstva cijelog spoja [39]. Zbog promjena u temperaturi koje nastaju tijekom zavarivanja, u prijelaznoj zoni dolazi do promjena u strukturi osnovnog materijala. Ta zona može biti podložna mikropukotinama, što može smanjiti čvrstoću spoja. U nekim slučajevima, zbog prekomjernog zagrijavanja, može doći do otvrdnjavanja osnovnog materijala, što dovodi do smanjenja duktilnosti i pojave naprezanja u prijelaznoj zoni [39]. Važno je napomenuti da je debljina prijelazne zone obično manja nego kod samog navarenog sloja, ali njezina kvaliteta je ključna za dugovječnost spoja. Parametri zavarivanja kao što su brzina hlađenja i temperatura na koju se osnovni materijal zagrijava tijekom postupka zavarivanja mogu značajno utjecati na strukturu prijelazne zone.

Toplinska obrada nakon zavarivanja, poput žarenja ili kaljenja, može značajno utjecati na strukturu navarenog sloja i njihova mehanička svojstva. Toplinske obrade se obično primjenjuju kako bi se smanjila naprezanja nastala tijekom procesa zavarivanja, kontrolirale veličine zrna u mikrostrukturi i poboljšale mehaničke karakteristike spoja, kao što su čvrstoća, duktilnost i otpornost na koroziju [32]. Žarenje, kao najčešća toplinska obrada nakon zavarivanja, koristi se za smanjenje unutarnjih naprezanja i povećanje duktilnosti. Ovaj proces se provodi u kontroliranim uvjetima temperature i vremena, kako bi se omogućila potpuna rekristalizacija metalne strukture, smanjujući rizik od nastanka mikropukotina i loma [35]. Za različite vrste materijala, žarenje se izvodi na specifičnim temperaturama, ovisno o njihovoj leguri i zahtjevima konačnih svojstava.

Za specijalizirane primjene, kao što su tlakovi ili visoke temperature, može se koristiti kaljenje, koje uključuje brzo hlađenje materijala u određenim uvjetima (npr. hlađenjem u vodi ili ulju). Ovaj postupak omogućuje povećanje tvrdoće navarenog sloja, no može dovesti do smanjenja duktilnosti, što u nekim aplikacijama može biti problematično [40]. Utjecaj toplinske obrade na strukturu zavarenog spoja može biti izuzetno važan, posebno u uvjetima visoke mehaničke i termičke opterećenosti. U nekim industrijskim primjenama, kao što su tlakovi, brodogradnja ili zrakoplovna industrija, precizna kontrola toplinske obrade može produžiti životni vijek zavarenih spojeva i povećati njihovu otpornost na ekstremne uvjete.

3.1.1. MIG/MAG i TIG zavarivanje

MIG/MAG zavarivanje, poznato i kao zavarivanje metalnim inertnim plinom (engl. *Metal Inert Gas* – MIG) ili metalnim aktivnim plinom (engl. *Metal Active Gas* – MAG), predstavlja jednu od najraširenijih metoda zavarivanja u industriji, posebno kada se radi o zavarivanju čelika, aluminija i drugih metalnih materijala. Ova metoda zavarivanja pripada u grupu metoda zavarivanja elektrodama u zaštitnom plinu, a specifičnost MIG/MAG tehnologije leži u tome što se koristi žica za zavarivanje koja služi kao elektrodna žica, a također se koristi i zaštitni plin koji štiti zavareni spoj od vanjskih čimbenika poput oksidacije i kontaminacije [23]. Ovisno o vrsti plina koji se koristi, razlikujemo MIG zavarivanje, gdje se koristi inertni plin poput argona ili helija, i MAG zavarivanje, koje koristi aktivni plin poput ugljičnog dioksida ili smjesa plinova. Tehnologija MIG/MAG zavarivanja je vrlo fleksibilna, omogućujući zavarivanje širokog raspona debljina materijala s visokim stupnjem produktivnosti i preciznosti. Osnovni princip procesa je da se žica za zavarivanje kontinuirano dovodi kroz pištolj za zavarivanje prema spoju koji se želi zavariti, dok zaštitni plin izlazi iz mlaznice pištolja i stvara zaštitu oko žice i zavarenog spoja [24]. Ovo omogućuje visoku kvalitetu zavara i minimaliziranje neželjenih nuspojava poput oksidacije, što je česta pojava kod drugih metoda zavarivanja koje ne koriste plinove. Na slici 4 prikazan je uređaj za MIG zavarivanje.



Slika 4. Uređaj za MIG zavarivanje [25]

Parametri MIG/MAG zavarivanja ključni su za postizanje optimalnih rezultata. Jedan od najvažnijih parametara je brzina dovoda žice, koja mora biti usklađena s brzinom kretanja elektroda kako bi se osigurala stabilnost i kvaliteta zavarenog spoja [23]. Brzina dovoda žice utječe na veličinu i oblik zavarenog spoja, a također i na dubinu provale i potrošnju žice. Previsoka brzina dovoda može uzrokovati prekomjerni volumen materijala u spoju, dok preniska brzina može rezultirati nedovoljnom pokrivenošću i slabim zavarenim spojevima.

Osim brzine dovoda žice, drugi važan parametar je jačina struje. Jačina struje utječe na veličinu toplinskog utjecaja na materijal, što izravno utječe na kvalitetu zavarivanja [25]. Previsoka struja može uzrokovati pregrijavanje materijala, dok preniska struja može dovesti do neadekvatne povezanosti između dijelova [25]. Optimalna jačina struje ovisi o debljini materijala koji se vara, a odabir odgovarajuće struje može značajno poboljšati učinkovitost i kvalitetu zavarivanja. Napon je parametar koji utječe na oblik zavara i stabilnost luka. Previsoka napetost može uzrokovati prekomjernu disperziju materijala i neuredne zavare, dok preniska napetost može uzrokovati neravnomjerno taljenje i slabo prianjanje materijala [26]. Za precizno zavarivanje, balans napetosti i jačine struje je ključan za postizanje kvalitetnog i ravnomjernog spoja.

Vrsta i količina plina također imaju značajnu ulogu u ovom procesu. U MIG zavarivanju, gdje se koristi inertni plin poput argona ili helija, plin je odgovoran za stvaranje zaštitne atmosfere oko zavarivanja, čime se sprječava oksidacija i poboljšava stabilnost luka. U MAG zavarivanju, gdje se koristi aktivni plin poput ugljičnog dioksida ili mješavina plinova, plin ima i aktivnu ulogu u reakcijama s materijalom, što može dodatno poboljšati kvalitetu spoja, ali također može utjecati na formiranje sporednih reakcijskih proizvoda [27]. Važan čimbenik u MIG/MAG zavarivanju je također odabir vrste žice za zavarivanje, jer ona mora biti kompatibilna s osnovnim materijalom. Žica se mora pravilno slagati s osnovnim materijalom kako bi se izbjegla stvaranja neželjenih mikropukotina ili drugih defekata koji bi mogli oslabiti kvalitetu spoja [25]. Postoji širok izbor žica za zavarivanje, od kojih se svaka koristi ovisno o vrsti osnovnog materijala i zahtjevima primjene.

Kvaliteta zavarivanja ovisi i o održavanju ispravne temperature luka, što izravno utječe na brzinu taljenja žice, dubinu prodiranja i očuvanje svojstava čelika. Pored toga, i pozicija zavarivanja, kutovi i preciznost kretanja alata za zavarivanje također imaju veliku važnost u postizanju kvalitetnih rezultata. Zavarivanje MIG/MAG tehnikom koristi se u raznim industrijama zbog svoje svestranosti i brzine, uključujući automobilske industrije, brodogradnju, proizvodnju metalnih konstrukcija, te u industrijama koje se bave proizvodnjom tlačnih posuda [28]. Ovisno o specifičnostima procesa, MIG/MAG zavarivanje omogućuje brzo i efikasno zavarivanje s minimalnim posljedičnim efektima na materijal, čime se poboljšava strukturalna stabilnost i sigurnost gotovih proizvoda. Iako MIG/MAG zavarivanje nudi mnoge prednosti u pogledu brzine, efikasnosti i kvalitete, potrebno je pridržavati se preciznih parametara i uvjeta kako bi se postigao visokokvalitetni zavar [28]. Ova metoda zahtijeva visok stupanj kontrole i poznavanja svih aspekata zavarivačkog procesa, od odabira materijala i žice do preciznog upravljanja zavarivačkim uvjetima, a uspješna primjena MIG/MAG tehnologije može značajno doprinijeti kvaliteti gotovih proizvoda u različitim industrijama.

TIG zavarivanje, odnosno zavarivanje volframskom elektrodnom plamenom u zaštiti inertnih plinova (engl. *Tungsten Inert Gas* – TIG), jedan je od najpreciznijih i najkvalitetnijih postupaka zavarivanja, koji se koristi u širokom spektru industrijskih primjena. Ovaj postupak omogućuje visoku kontrolu nad zavarivačkim procesom, što je ključno za postizanje optimalnih svojstava zavarivačkih spojeva, osobito u aplikacijama gdje je potrebna visoka kvaliteta i preciznost [29]. TIG zavarivanje koristi volframsku elektrodu koja ne troši tokom zavarivanja, dok se za zaštitu zavara koristi inertni plin, najčešće argon ili helij. Zbog svoje visoke

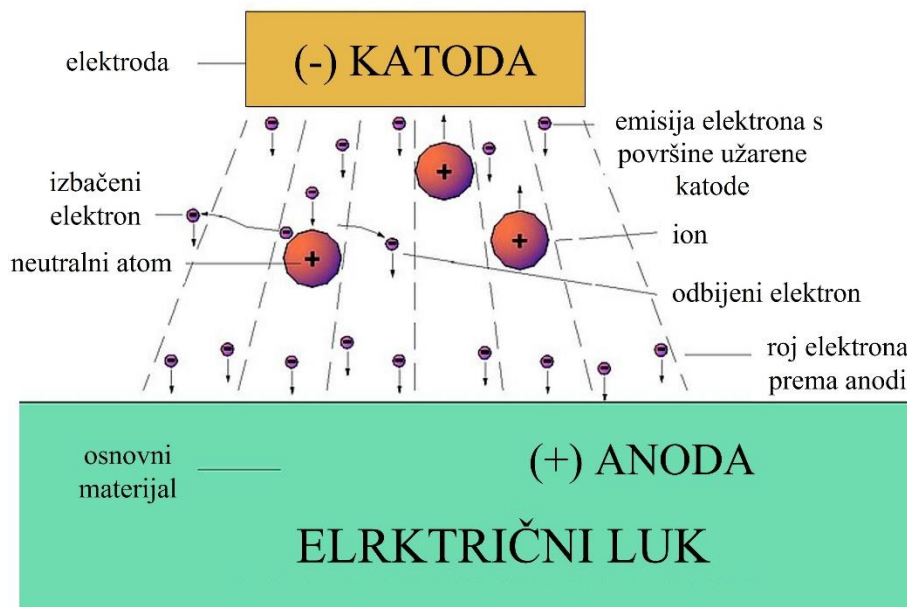
preciznosti i kontrole nad procesom, TIG zavarivanje je posebno pogodno za rad s tankim materijalima, kao i za materijale koji zahtijevaju precizne zavarivačke spojeve, poput čelika, aluminija, titana, bakra i njihovih legura [5]. Jedna od glavnih prednosti TIG zavarivanja je visoka kvaliteta zavara. Zbog mogućnosti preciznog upravljanja toplinskom energijom i minimalne količine plamenih i dimnih emisija, TIG zavarivanje rezultira zavarivačkim spojevima koji su izuzetno čisti, s minimalnim nagrizanjem osnovnog materijala i vrlo malim količinama neželjenih uklopljenih materijala [30]. Osim toga, proces omogućuje precizno zavarivanje u svim pozicijama, uključujući i vertikalne i invertirane pozicije, što ga čini izuzetno svestranim za razne industrijske aplikacije. TIG zavarivanje također omogućuje visoku kontrolu nad dubinom zavarivanja, širinom zavara i toplinskim utjecajem na materijal, čime se omogućuje postizanje zavara sa minimalnim deformacijama i visokom mehaničkom čvrstoćom.

TIG zavarivanje ima i nekoliko nedostataka koji mogu ograničiti njegovu primjenu u nekim industrijama. Jedan od glavnih nedostataka je sporost procesa, koji zahtijeva veće vrijeme za zavarivanje u odnosu na druge metode, kao što je MIG/MAG zavarivanje. Osim toga, TIG zavarivanje zahtijeva visoku razinu vještine od strane zavarivača, jer proces zahtijeva precizno rukovanje elektrodom, što može povećati rizik od grešaka [28]. Također, potrebno je korištenje zaštitnih plinova, što može povećati troškove i zahtijevati dodatnu opremu i logistiku za osiguranje sigurnih uvjeta rada. Ključni parametri TIG zavarivanja uključuju odabir vrste i veličine volframove elektrode, brzinu zavarivanja, napon i struju, kao i protok zaštitnog plina [31]. Za različite materijale i debljine materijala, parametri se mogu značajno mijenjati kako bi se postigla optimalna kvaliteta zavara. Na primjer, veće debljine materijala zahtijevaju veću struju, dok manji materijali zahtijevaju precizniju kontrolu temperature i manje energetske inpute kako bi se izbjegle deformacije i pregrijavanje [7]. Također, vrsta zaštitnog plina i njegov protok igraju ključnu ulogu u kvaliteti zavara, jer plin štiti rastopljeni materijal od atmosferskih onečišćenja i oksidacije.

Sve ove karakteristike čine TIG zavarivanje vrlo primjenjivim u industrijama poput zrakoplovne, energetske, medicinske i automobilske industrije, gdje se zahtijeva visoka kvaliteta zavara i preciznost. Iako je proces zahtjevniji u smislu brzine i cijene u odnosu na neke druge tehnike, njegova sposobnost da stvori izuzetno čiste i čvrste zavarivačke spojeve čini ga nezamjenjivim u aplikacijama koje zahtijevaju vrhunske standarde kvalitete i pouzdanosti.

3.1.2. Elektrolučno i lasersko zavarivanje

Elektrolučno zavarivanje je jedan od najstarijih i najraširenijih postupaka zavarivanja u industriji, koji se temelji na stvaranju visokotemperaturnog električnog luka između elektrode i osnovnog materijala. Ovaj postupak koristi električnu energiju za taljenje metala na mjestu spajanja, stvarajući snažnu fuziju koja omogućuje trajnu povezanost dvaju dijelova [32]. Elektrolučno zavarivanje obuhvaća različite tehnike, uključujući korištenje obloženih elektroda, pri čemu se koriste elektrode koje su prekrivene zaštitnim slojem, koji sprječava oksidaciju i nečistoće u procesu zavarivanja [30]. Glavni princip elektrolučnog zavarivanja je stvaranje električnog luka između elektrode i materijala koji se vara. Kada se elektroda približi osnovnom materijalu, dolazi do stvaranja luka, što dovodi do topljenja oba materijala. Ovisno o parametru struje i napetosti, može se postići različita dubina provale i širenje zavara. Električni luk također stvara plazmu koja je odgovorna za visoku temperaturu, koja može doseći više tisuća stupnjeva Celzija, čime se omogućava brzo taljenje i spajanje metala [26]. Na slici 5 je prikazan postupak elektrolučnog zavarivanja.



Slika 5. Elektrolučno zavarivanje [32]

Zavarivanje pomoću elektrolučnog postupka se često koristi za zavarivanje čelika, ali i drugih metala kao što su aluminij, bakar i njihovi legure, ovisno o primjeni i potrebama [4]. Elektroda koja se koristi u ovom postupku može biti od različitih materijala, uključujući osnovne i legirane metale, a njen odabir ovisi o vrsti osnovnog materijala koji se spaja, te uvjetima primjene [33.] Pokrovi na elektrodama obično služe kao zaštita od oksidacije i stvaraju zaštitnu plazmu koja štiti var od utjecaja zraka. Postupak elektrolučnog zavarivanja se koristi za zavarivanje debljih materijala, jer omogućuje postizanje visoke toplinske energije potrebne

za taljenje veće mase metala [33]. Ovaj postupak je vrlo fleksibilan, jer se može koristiti u različitim uvjetima – na primjer, zavarivanje može biti izvedeno u svim pozicijama, od horizontalne do vertikalne, što ga čini vrlo svestranom tehnikom.

Jedna od glavnih prednosti elektrolučnog zavarivanja je njegova brzina i relativno niski trošak u odnosu na druge tehnologije zavarivanja [27]. Zavarivanje se može izvoditi u različitim uvjetima rada, uključujući vanjske uvjete i neuredne radne prostore. Dodatno, elektrolučno zavarivanje omogućuje postizanje visoke kvalitete spojeva, uz minimalnu količinu neželjenih spojeva ili nečistoća, što je ključno za održavanje integriteta i dugovječnosti zavarenih konstrukcija [31]. Elektrolučno zavarivanje ima i nekoliko nedostataka. Na primjer, u ovom procesu potrebna je visoka stručnost zavarivača kako bi se postigla dobra kvaliteta zavarenog spoja. Nepravilno izvođenje procesa može dovesti do stvaranja previše vrućih točaka koje mogu oštetiti osnovni materijal ili uzrokovati stvaranje mikropukotina u zavarenom spoju [25]. Također, elektrolučno zavarivanje može biti neefikasno za zavarivanje vrlo tankih materijala, jer može dovesti do stvaranja prekomjerne topline, što uzrokuje deformacije ili nepovoljnu promjenu strukture materijala.

U industriji, elektrolučno zavarivanje se često koristi za izradu i održavanje infrastrukturnih objekata, poput mostova, cjevovoda, brodova, građevinskih konstrukcija, a također je prisutno u automobilske industriji, zrakoplovstvu i mnogim drugim sektorima. Postupak je osobito popularan za zavarivanje čeličnih i željeznih materijala, jer omogućuje brzo spajanje debljih komada metala [34]. Ova tehnika također pronalazi primjenu u specifičnim industrijama, poput brodogradnje, gdje je izuzetno važna čvrstoća i trajnost zavarenih spojeva. S obzirom na svoju dugovječnost, efikasnost i svestranost, elektrolučno zavarivanje ostaje osnovna tehnologija u industrijama koje zahtijevaju brzo, učinkovito i dugotrajno spajanje materijala. Kao jedna od najrasprostranjenijih metoda, ona osigurava visoku produktivnost i kvalitetu zavarivanja, što je ključno za mnoge moderne industrijske primjene.

Lasersko navarivanje predstavlja jednu od najsuvremenijih i najinovativnijih tehnologija u industriji zavarivanja. Ova tehnika koristi koncentriranu lasersku zraku kao izvor topline za fuziju i spajanje materijala. Lasersko navarivanje omogućava visoku preciznost i kvalitetu zavora, s minimalnim utjecajem na okolinu, što ga čini izuzetno pogodnim za rad s osjetljivim materijalima i primjenama koje zahtijevaju visok stupanj točnosti [35]. Laserska zraka, usmjeren na radnu površinu, tali materijal koji se potom spaja s dodanim materijalom, stvarajući visoko kvalitetan zavar. Jedna od ključnih prednosti laserskog navarivanja je njegov izuzetno

koncentrirani izvor topline, koji omogućava preciznu kontrolu nad dubinom zavarivanja i minimalnu toplinsku deformaciju okolnog materijala [35]. To znači da se laserskim navarivanjem mogu obraditi vrlo tanki materijali bez rizika od pregrijavanja ili stvaranja deformacija. Osim toga, lasersko navarivanje omogućava visoku brzinu zavarivanja, čime se postiže visoka produktivnost i učinkovitost, što je izuzetno važno u industrijama koje zahtijevaju visoke proizvodne kapacitete.

Lasersko navarivanje također omogućava minimalnu upotrebu dodatnog materijala, što smanjuje troškove i povećava ekonomske prednosti ove tehnologije. Proces je vrlo precizan, što smanjuje potrebu za naknadnim obradama, kao što su brušenje ili poliranje [36]. Zbog svoje visoke točnosti i niske razine deformacija, lasersko navarivanje se često koristi za proizvodnju dijelova u zrakoplovnoj, automobilskoj, medicinskoj i elektroničkoj industriji, gdje su potrebni visoki standardi kvalitete. Lasersko navarivanje nije bez svojih izazova i ograničenja. Jedan od glavnih nedostataka ove tehnologije je visoka početna cijena opreme, što može predstavljati prepreku za manja poduzeća koja žele implementirati ovu tehnologiju [34]. Također, lasersko navarivanje zahtijeva preciznu kontrolu svih parametara procesa, uključujući snagu lasera, brzinu pomicanja, udaljenost između lasera i materijala, te vrstu zaštitnog plina [34]. Bilo kakvo odstupanje u tim parametrima može dovesti do smanjenja kvalitete zavara ili čak do kvara opreme.

Ključni parametri laserskog navarivanja uključuju snagu lasera, što određuje količinu topline koju laser isporučuje materijalu. Također, brzina pomicanja lasera mora biti pažljivo kontrolirana kako bi se postigla željena dubina i širina zavara, dok tip zaštitnog plina ima važnu ulogu u zaštiti zavara od oksidacije i kontaminacije tijekom procesa [32]. S obzirom na složenost tehnologije, lasersko navarivanje zahtijeva visoko kvalificirane operatere i sustav za preciznu kontrolu parametara procesa. Lasersko navarivanje postavlja visoke standarde u industriji zavarivanja, nudeći tehnologiju koja je istovremeno brza, precizna i ekonomski učinkovita za specijalizirane primjene. Dok početna ulaganja mogu biti visoka, dugoročne koristi ove tehnologije čine je vrlo atraktivnom za primjene koje zahtijevaju vrhunsku kvalitetu, preciznost i visoku produktivnost.

3.2. Mehanička svojstva navarenog sloja

Mehanička svojstva navarenog sloja od ključne su važnosti za dugotrajnost i funkcionalnost zavarenih konstrukcija. Proces navarivanja značajno utječe na tvrdoću, čvrstoću i žilavost materijala, pri čemu različiti parametri postupka, kao što su vrsta dodanog materijala, količina unesenog toplinskog opterećenja i brzina hlađenja, određuju konačna svojstva zavarenog sloja [38]- Kako bi se osigurala optimalna kvaliteta, provode se različita mehanička ispitivanja, pri čemu su ispitivanja tvrdoće, čvrstoće i žilavosti najčešće korištene metode. Ispitivanje tvrdoće provodi se kako bi se ocijenila otpornost materijala na lokalne deformacije, a u industriji se najčešće koriste metode po Vickersu (HV) i po Rockwellu (HRC) [37]. Vickersova metoda koristi dijamantni indentor u obliku piramide pod definiranom silom, dok Rockwellova metoda mjeri dubinu prodiranja indentora pod konstantnim opterećenjem [37]. Tvrdoća navarenog sloja varira ovisno o kemijskom sastavu osnovnog i dodanog materijala, toplinskoj obradi te mikrostrukturnim promjenama uzrokovanim procesom navarivanja.

Ispitivanje čvrstoće i žilavosti ključno je za procjenu sposobnosti materijala da podnese mehanička opterećenja bez pucanja ili loma. Čvrstoća materijala određuje se vlačnim ispitivanjem, pri čemu se mjeri maksimalna sila koju materijal može podnijeti prije loma [38]. Žilavost, koja je pokazatelj otpornosti materijala na udarno opterećenje, ispituje se Charpyjevim ili Izodovim testom, pri čemu se mjeri energija potrebna za lom ispitnog uzorka [36]. Na ova svojstva značajno utječe brzina hlađenja nakon navarivanja – brže hlađenje može dovesti do povećane tvrdoće i smanjene žilavosti, dok sporije hlađenje omogućava bolju unutarnju prilagodbu naprezanjima.

3.3. Otpornost na trošenje

Otpornost na trošenje i koroziju još su jedan ključni aspekt kvalitete navarenog sloja, osobito u industrijama gdje su materijali izloženi abrazijskom, erozijskom ili kemijskom trošenju [40]. Abrazijsko trošenje javlja se uslijed djelovanja čvrstih čestica na površinu materijala, dok erozijsko trošenje nastaje zbog djelovanja fluida ili plinova pod visokim tlakom. Metode ispitivanja otpornosti na trošenje uključuju testove u kojima se simuliraju radni uvjeti, a rezultati se analiziraju kako bi se optimizirao izbor materijala i parametara navarivanja [40].

Mikrostruktura navarenog sloja ima značajan utjecaj na njegovu otpornost na trošenje i koroziju. Struktura kristalnih zrna, prisutnost karbida i udio legirajućih elemenata određuju mehaničke karakteristike zavara [36]. Na primjer, povećani udio kroma i molibdena može značajno poboljšati otpornost na koroziju i trošenje. Elektrokemijska ispitivanja provode se kako bi se ocijenila otpornost sloja na korozijske procese, pri čemu se mjeri elektrokemijski potencijal i brzina korozije u kontroliranim uvjetima. Dodatno, testovi u slanoj komori simuliraju dugotrajnu izloženost agresivnim okolišnim uvjetima, omogućujući procjenu otpornosti na koroziju u realnim uvjetima eksploatacije [40]. Odabir optimalnih parametara navarivanja ima važnu ulogu u postizanju visokih mehaničkih svojstava i otpornosti zavarenih slojeva. Kontrola toplinskog unosa, debljine sloja i vrste dodanog materijala omogućava prilagođavanje strukture zavara specifičnim uvjetima rada, čime se postiže dugotrajan i pouzdan spoj.

4. ANALIZA GREŠAKA U NAVARENOM SLOJU

Analiza grešaka u navarenom sloju ključan je aspekt kontrole kvalitete zavarenih spojeva jer čak i najmanje greške mogu značajno utjecati na mehaničke karakteristike, trajnost i sigurnost konstrukcija. Greške u navarima mogu biti rezultat nepravilnih parametara zavarivanja, neodgovarajućeg dodatnog materijala, loše pripreme spoja ili utjecaja vanjskih čimbenika tijekom zavarivanja [35]. Razumijevanje vrsta defekata, njihovih uzroka i metoda prevencije ključno je za osiguravanje optimalne kvalitete zavarenih spojeva i produljenje vijeka trajanja konstrukcija.

4.1. Vrste grešaka

Najčešće vrste grešaka u navarenim slojevima uključuju pukotine, poroznost i segregaciju. Pukotine su jedan od najozbiljnijih defekata, jer značajno smanjuju nosivost zavarenog spoja i povećavaju rizik od loma materijala tijekom eksploatacije. Mogu nastati tijekom zavarivanja (vruće pukotine) ili nakon završetka procesa (hladne pukotine). Vruće pukotine javljaju se zbog visokih temperatura i naglih promjena u metalnoj strukturi, dok hladne pukotine često nastaju kao rezultat vodikove krhkosti i zaostalih naprezanja [37]. Njihova prevencija uključuje upotrebu niskovodikovih elektroda, pravilno predgrijavanje osnovnog materijala te kontrolirano hlađenje nakon zavarivanja.

Poroznost u navarima predstavlja pojavu sitnih šupljina unutar zavarenog spoja koje nastaju zbog zarobljenih plinova tijekom procesa zavarivanja [36]. Ovaj defekt može značajno oslabiti mehaničku čvrstoću spoja i smanjiti njegovu otpornost na vanjske utjecaje. Uzroci poroznosti uključuju prisutnost vlage, nečistoća na površini zavara, nepravilnu zaštitu plinom i neodgovarajuće parametre zavarivanja. Prevencija se postiže upotrebom suhog dodatnog materijala, pravilnim čišćenjem površine, optimizacijom parametara zavarivanja i osiguranjem stabilne zaštite zavarenog područja inertnim plinom [39]. Segregacija je defekt koji se javlja kada dolazi do nehomogenosti u kemijskom sastavu zavarenog sloja, što može rezultirati lokalnim područjima s nižim mehaničkim svojstvima. Ova pojava često je povezana s neodgovarajućim postupkom zavarivanja, nepravilnim odabirom dodatnog materijala ili prisutnošću nečistoća [39]. Kako bi se spriječila segregacija, važno je osigurati optimalne

parametre zavarivanja, koristiti kvalitetne dodatne materijale i provesti pravilnu toplinsku obradu nakon zavarivanja kako bi se omogućila ravnomjerna distribucija legirajućih elemenata.

4.2. Uzroci nastanka i metode prevencija

Uzroci nastanka defekata u navarima mogu biti različiti, a često su rezultat kombinacije više faktora. Nepravilno podešeni parametri zavarivanja, poput prevelike ili premale struje, pogrešne brzine zavarivanja ili neodgovarajuće zaštite plinom, mogu uzrokovati širok spektar grešaka [40]. Također, loša priprema spoja, uključujući prisutnost oksida, ulja, vlage ili drugih nečistoća, može negativno utjecati na kvalitetu zavarenog sloja. Osim toga, neodgovarajući dodatni materijal ili nepravilna tehnika zavarivanja mogu dovesti do nepovoljnih metalurških promjena u strukturi zavara, čime se povećava vjerojatnost pojave defekata. Metode prevencije grešaka u navarenim spojevima uključuju strogu kontrolu parametara zavarivanja, pravilnu pripremu spojeva, korištenje visokokvalitetnih dodatnih materijala i provođenje adekvatnih postupaka toplinske obrade [37]. Precizna regulacija toplinskog unosa tijekom zavarivanja može smanjiti rizik od pukotina i segregacije, dok pravilan izbor zaštitnog plina i postupaka sušenja elektroda može značajno smanjiti poroznost. Osim toga, provođenje redovitih nedestruktivnih ispitivanja, poput ultrazvučnog ili radiografskog pregleda, omogućava pravovremenu detekciju i korekciju eventualnih defekata prije nego što zavarenim spojem bude izložen operativnim opterećenjima [38].

4.3. Razorne i nerazorne metode ispitivanja

Nedestruktivno ispitivanje (engl. *Non destructive testing* – NDT) predstavlja ključnu metodu u analizi kvalitete navarenog sloja jer omogućava otkrivanje grešaka bez oštećenja ispitivanog materijala. Cilj ovih metoda je identifikacija unutarnjih i površinskih nesavršenosti, kao što su pukotine, inkluzije, pore, nepravilni oblici zavara i drugi defekti koji mogu utjecati na mehaničke karakteristike spoja. [36] Među najčešće korištenim metodama u industriji su radiografsko ispitivanje (engl. *Radiographic testing* – RT), ultrazvučno ispitivanje (engl. *Ultrasonic testing* – UT), penetrantsko ispitivanje (engl. *Penetrant testing* – PT) i magnetsko ispitivanje (engl. *Magnetic particle testing* – MT). Radiografsko ispitivanje koristi rendgenske (X-ray) ili gama (γ) zrake za detekciju unutarnjih grešaka u navarenom sloju [38]. Ova metoda omogućava prikaz unutrašnje strukture materijala na radiografskom filmu ili digitalnim

senzorima. Zrake prolaze kroz materijal, a razlike u gustoći i homogenosti materijala uzrokuju različitu apsorpciju zračenja, što omogućava otkrivanje nepravilnosti kao što su pukotine, pore i inkluzije. Glavne prednosti radiografske metode uključuju sposobnost detektiranja unutarnjih grešaka bez potrebe za destrukcijom materijala, relativno jednostavnu interpretaciju rezultata putem radiografskih snimaka te primjenu na različite vrste materijala i debljine zavara [40].

Međutim, radiografska metoda ima i određene nedostatke, poput potrebe za zaštitom od zračenja, visokih troškova i dužeg vremena ispitivanja u odnosu na neke druge metode. Ultrazvučno ispitivanje temelji se na upotrebi visokofrekventnih zvučnih valova koji se šalju kroz materijal pomoću ultrazvučnih sonda [36]. Kada val naiđe na granicu između različitih materijala ili na nepravilnost unutar materijala, reflektira se natrag do senzora, a vrijeme povratka vala omogućava određivanje lokacije i veličine greške. Prednosti ultrazvučne metode uključuju veliku osjetljivost na unutarnje greške, uključujući vrlo male pukotine i pore, mogućnost ispitivanja debljih zavara u usporedbi s radiografskim metodama te trenutno dobivanje rezultata u stvarnom vremenu [40]. Nedostaci ultrazvučne metode su složenija interpretacija rezultata, potreba za obučanim operaterima te ograničena primjena na materijale s neravnim površinama. Penetrantsko ispitivanje koristi kapilarnu akciju tekućeg penetranta za otkrivanje površinskih nesavršenosti u navarenom sloju.

Proces uključuje nanošenje tekućeg penetranta na površinu materijala, njegovo prodiranje u pukotine i pore, uklanjanje viška penetranta te nanošenje kontrastnog razvojnog sredstva koje omogućuje vizualizaciju defekata [38]. Glavne prednosti penetrantske metode uključuju jednostavnu primjenu i niske troškove, veliku osjetljivost na površinske pukotine i diskontinuitete te primjenjivost na širok raspon materijala, uključujući metale i nemetale. Nedostaci metode uključuju nemogućnost detekcije unutarnjih grešaka te potrebu za temeljitim čišćenjem ispitivanih površina prije i poslije ispitivanja. Magnetsko ispitivanje temelji se na principu induciranja magnetskog polja u feromagnetskom materijalu te detekcije diskontinuiteta putem magnetskog praha ili indikatorske tekućine [36]. Kada se u materijalu pojavi pukotina ili druga nepravilnost, dolazi do lokalnog curenja magnetskog polja, što omogućava vizualno uočavanje grešaka.

Prednosti metode ispitivanja magnetskim česticama uključuju visoku osjetljivost na površinske i blizu-površinske greške, brzinu izvođenja i jednostavnu interpretaciju rezultata te relativno niske troškove [39]. Međutim, ograničenja metode ispitivanja magnetskim česticama uključuju nemogućnost ispitivanja nemagnetičnih materijala te ograničenu učinkovitost na vrlo

grubim ili oksidiranim površinama. Odabir odgovarajuće metode nedestruktivnog ispitivanja ovisi o vrsti materijala, debljini zavarenog sloja, očekivanim vrstama grešaka i industrijskim standardima. Dok su radiografske i ultrazvučne metode najpogodnije za otkrivanje unutarnjih nesavršenosti, penetrantske i metode ispitivanja magnetskim česticama su izvrsne za detekciju površinskih defekata [38]. Analiza grešaka i poremećaja u navarenom sloju od ključne je važnosti za osiguranje dugotrajnosti i pouzdanosti zavarenih konstrukcija. Identifikacija i razumijevanje uzroka nastanka defekata omogućava poduzimanje adekvatnih mjera prevencije, čime se značajno poboljšava kvaliteta zavarenih spojeva. Implementacija suvremenih metoda kontrole kvalitete i optimizacija parametara zavarivanja predstavljaju ključne strategije za postizanje visoke razine sigurnosti i funkcionalnosti zavarenih konstrukcija u različitim industrijama, uključujući energetske, naftne, brodograđevne i automobilske industrije. Kombinacija ovih metoda često se koristi za osiguravanje visoke kvalitete i pouzdanosti zavarenih spojeva, osobito u industrijama s visokim sigurnosnim zahtjevima poput naftne, kemijske i nuklearne industrije.

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Cilj rada i provedena ispitivanja

Cilj ovog završnog rada je provesti postupak karakterizacije navarenog sloja na ploči od čelika koji se koristi za tlačne namjene, za rad na normlanim temperaturama. Materijal navarenog sloja je legura koja se koristi za zavarivanje nehrđajućih čelika i čelika otpornih na visoke temperature. Navareni sloj ima ulogu poboljšanja toplinskih, korozivskih i mehaničkih svojstava osnovnog materijala.

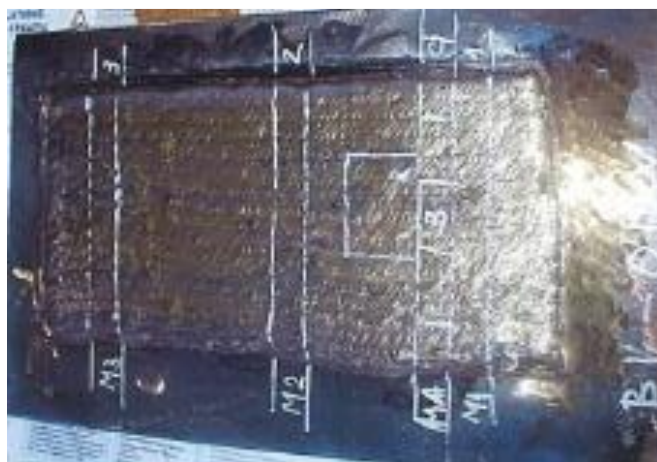
U cilju karakterizacije osnovnog materijala i navarenog sloja provede se sljedeća ispitivanja:

- analiza kemijskog sastava osnovnog materijala i materijala navara
- analiza makrostrukture navarenog spoja
- analiza mikrostrukture materijala ploče i materijala navara
- mjerenje makrotvrdoće HV10 i mikrotvrdoće HV0,2.

Na temelju dobivenih rezultata donijet će se odgovarajući zaključci o kvaliteti provedenog navarivanja.

5.2. Materijal za ispitivanje

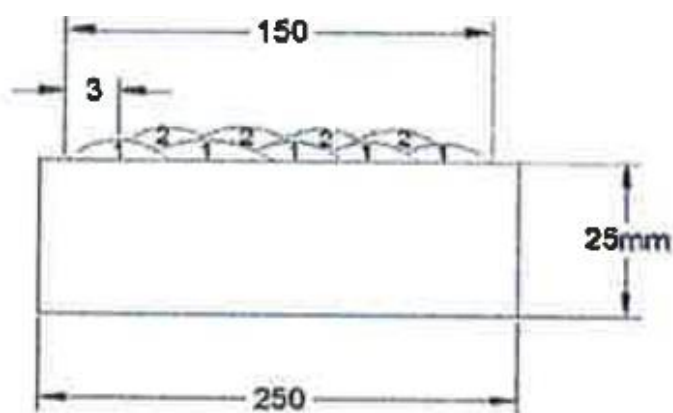
Na slici 6 prikazana je čelična ploča debljine od 25 mm i širine od 250 mm, s navarenim slojem debljine od 6 do 10 mm.



Slika 6. Čelična ploča s navarenim slojem

Prema navodima proizvođača, čelik od kojeg je izrađena ploča prema hrvatskoj normi ima oznaku P355GH, a prema američkoj normi American Society of Mechanical Engineers – ASME, ima oznaku SA 516 Gr.70. Navar je nanešen na osnovni materijal MIG postupkom zavarivanja pod zaštitom plina (Ar 99,9 %), u vodoravnom položaju (PA). Žica za navarivanje, prema normi HRN EN ISO 14343-A, ima oznaku G 19 9 L Si. Na slici 6 naznačene su pozicije s kojih su uzeti uzorci za sva potrebna ispitivanja.

Na slici 7 shematski je prikazan je raspored navarenih slojeva na ploči od čelika oznake P355GH, a u tablici 2 prikazani su parametri navarivanja.



Slika 7. Raspored navarenih slojeva na čeličnoj ploči

Tablica 1. Parametri navarivanja

| Parametri zavarivanja | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|---------------------------------|------------------|----------|---------------------|-----------|
| Prolaz | Oznaka postupka | Debljina dodanog materijala, mm | Jakost struje, A | Napon, V | Brzina žice, cm/min | Polaritet |
| 1 | 131 | 1,2 | 150 - 160 | 22 - 26 | 18,5 | DC/+ |
| 2 | 131 | 1,2 | 144 - 158 | 22 - 24 | 18,5 | DC/+ |

Protok plina tijekom navarivanja iznosio je između 12 i 16 l/min. Ploča nije predgrijavana prije nanošenja slojeva niti je provedena ikakva naknadna toplinska obrada. Maksimalno njihanje iznosilo je oko 10 mm.

5.3. Analiza kemijskog sastava

Kvantitativna analiza kemijskog sastava materijala provedena je u Laboratoriju za analizu metala u sklopu Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Kao metoda određivanja kemijskog sastava korištena je optička emisijska spektroskopija. Uređaj na kojem je provedena kemijska analiza je optički emisijski spektrometar GDS 850A, proizvođača LECO. Uređaj je prikazan na slici 8. Analiziran je kemijski sastav osnovnog materijala i metala navara.



Slika 8. Uređaj za analizu kemijskog sastava GDS 850A-LECO

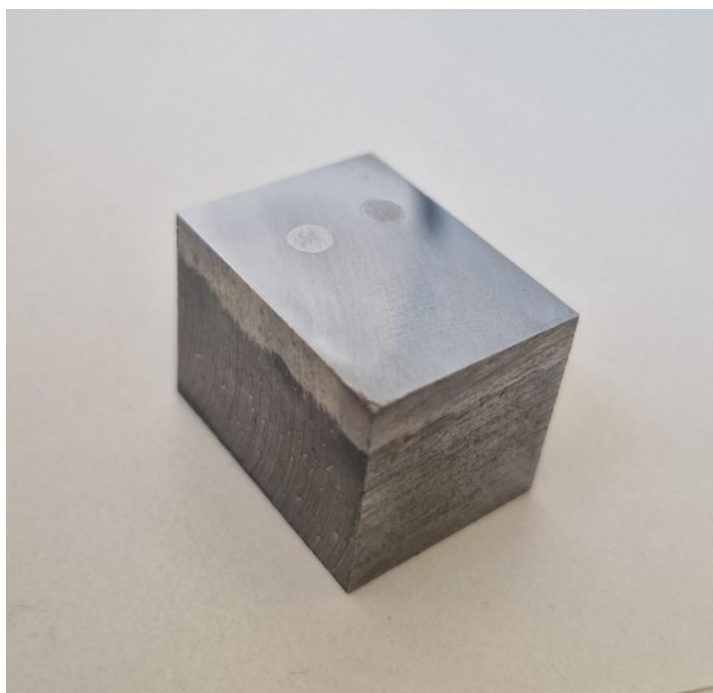
Na slici 9 prikazan je izrezani uzorak za analizu kemijskog sastava, a na slici 10 vide se tragovi ispitivanja kemijskog sastava u području navarenog sloja.

Dobiveni rezultati pri analizi kemijskog sastava materijala ploče i metala navara prikazani su u tablicama 3 i 4.

Kemijski sastav žice za navarivanje, deklariran od strane proizvođača dodatnih materijala za zavarivanje, prikaz je u tablici 5.



Slika 9. Izrezan uzorak za analizu kemijskog sastava



Slika 10. Tragovi određivanja kemijskog sastava na navaru

Tablica 2. Rezultati analize kemijskog sastava materijala ploče

| Maseni udio elementa, % | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| C | Si | Mn | P | S | N | Cu | Mo | Ni | Cr | V | Fe |
| 0,17 | 0,38 | 1,19 | 0,010 | 0,011 | 0,007 | 0,002 | 0,009 | 0,002 | 0,028 | 0,001 | ostatak |

Tablica 3. Rezultati analize kemijskog sastava metala navara

| Maseni udio elementa, % | | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|-------|-------|------|------|---------|--|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Fe | |
| 0,02 | 0,65 | 1,86 | 0,02 | 0,009 | 19,53 | 9,61 | 0,06 | ostatak | |

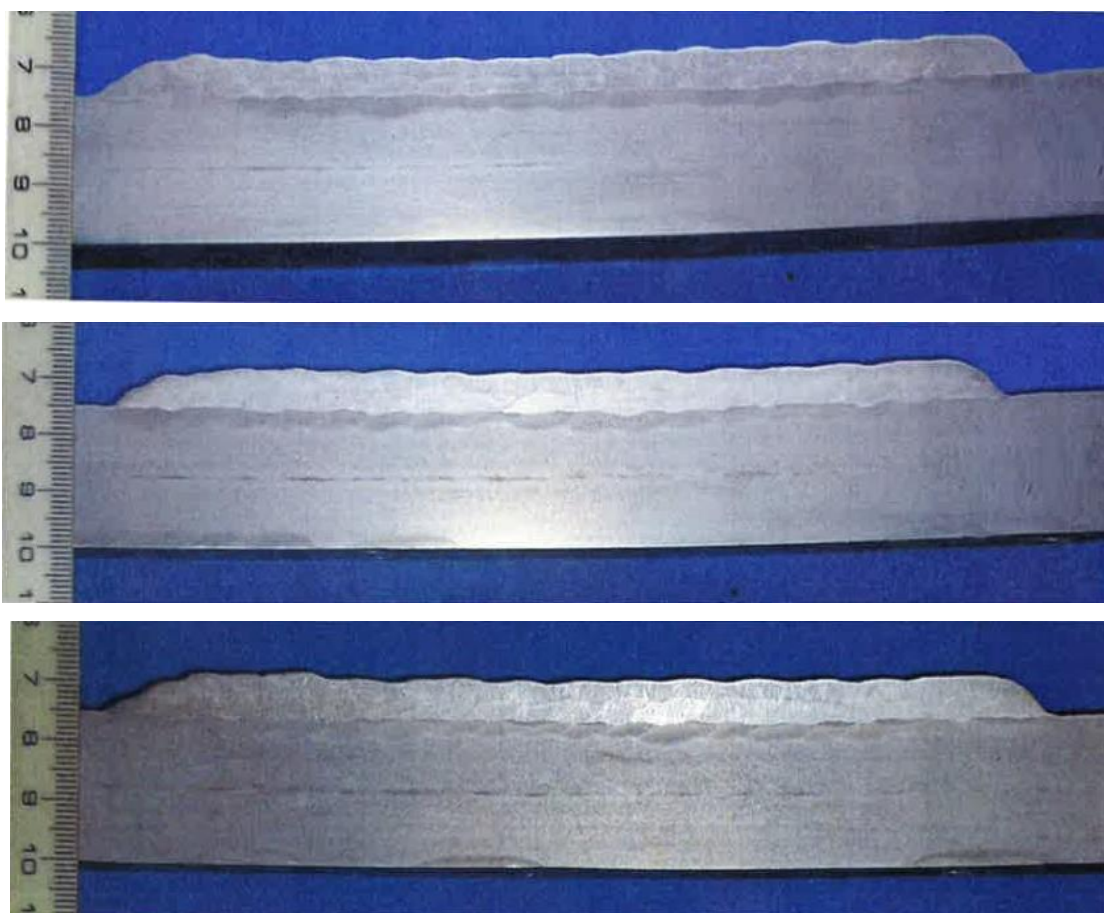
Tablica 4. Kemijski sastav žice za navarivanje zajamčen od strane proizvođača

| Maseni udio elementa, % | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|---|---|-------|-------|----|---------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Fe |
| < 0,02 | 0,80 | 1,95 | - | - | 20,00 | 10,00 | - | ostatak |

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da kemijski sastav materijala ploče odgovara čeliku oznake P355GH, a kemijski sastav metala navara se vrlo dobro podudara s kemijskim sastavom žice za navarivanje zajamčenim od strane proizvođača.

5.4. Analiza makrostrukture navarenog sloja

Analiza makrostrukture provedena je u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju u Zagrebu. Izrezana su tri uzorka i pripremljena za analizu makrostrukture, slika 11. Na pripremljenim uzorcima promatran je izgled linije staljivanja između metala zavara i osnovnog materijala, geometrija pojedinih prolaza, eventualna prisutnost pora i pukotina te ostalih nepravilnosti



Slika 11. Makroizbrusci čelične ploče s navarenim slojem

Ni na jednom od tri promatrana uzorka nisu uočene nikakve nepravilnosti. Linija staljivanja relativno je jasno izražena. Dubina provarenog sloja ujednačena je po cijeloj širini navara. Visina navara je također ujednačena i nalazi se u dopušrenom rasponu od 6 do 10 mm. Geometrija pojedinih prolaza je pravilna. Nema vidljivih pukotina, čvrstih uključaka i pora

5.5 Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U okviru analize mikrostrukture provodi se priprema metalografskog uzorka koja uključuje izrezivanje reprezentativnog uzorka, zalijevanje tog uzorka u polimernu masu, brušenje, poliranje te nagrizanje. Mikrostruktura uzorka promatra se u poliranom i nagrizenom stanju na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51. Na istom uzorku, na poliranoj površini, provedeno je mjerenje mikrotvrdoće HV0,2.

Uzorak za analizu mikrostrukture i mjerenje mikrotvrdoće izrezan je uz rub navarenog sloja. Nakon toga zaliven je u polimernu masu. Nakon toga je površina na kojoj se promatrala mikrostruktura brušena i polirana. Brušenje je obavljeno na uređaju za brušenje u pet koraka brzinom od 300 okretaja u minuti. Pritom se u svakom sljedećem koraku povećava granulacija papira. Redom granulacije papira su bile 320, 600, 1000, 2400 i završno brušenje je obavljeno s granulacijom brusnih čestica od 4000. Tijekom brušenja po brusnom papiru je tekla voda koja je hladila uzorak, služila kao lubrikant i odnosila abradirane čestice iz zone brušenja. Brušenje metalografskog uzorka prikazano je na slici 12.



Slika 12. Brušenje uzorka

Poslije brušenja slijedilo je poliranje površine uzorka koje se sastojalo od dva koraka. U prvom koraku kao abrazivno sredstvo korištena je dijamantna pasta srednjeg promjera čestica od oko 3 mikrometara, a podloga za poliranje okretala se brzinom od 150 okretaja po minuti. U drugom koraku površina uzorka polirana je tekućinom za poliranje s abrazivnim česticama od oko 0,03 mikrometara. Nakon što su oba koraka poliranja završena, uzorak je bio spreman za analizu na svjetlosnom mikroskopu. Na slici 13 vidi se uređaj za poliranje.



Slika 13. Poliranje uzorka

Površina metalografskih uzoraka uvijek se promatra u poliranom stanju jer se na tako pripremljenoj površini najbolje uočavaju pore, pukotine i različiti uključci.

Na slici 14 prikazan je metalografski uzorak s poliranom površinom spreman za analizu mikrostrukture, a na slici 15 vidi se svjetlosni mikroskop na kojem je analizirana mikrostruktura uzorka.



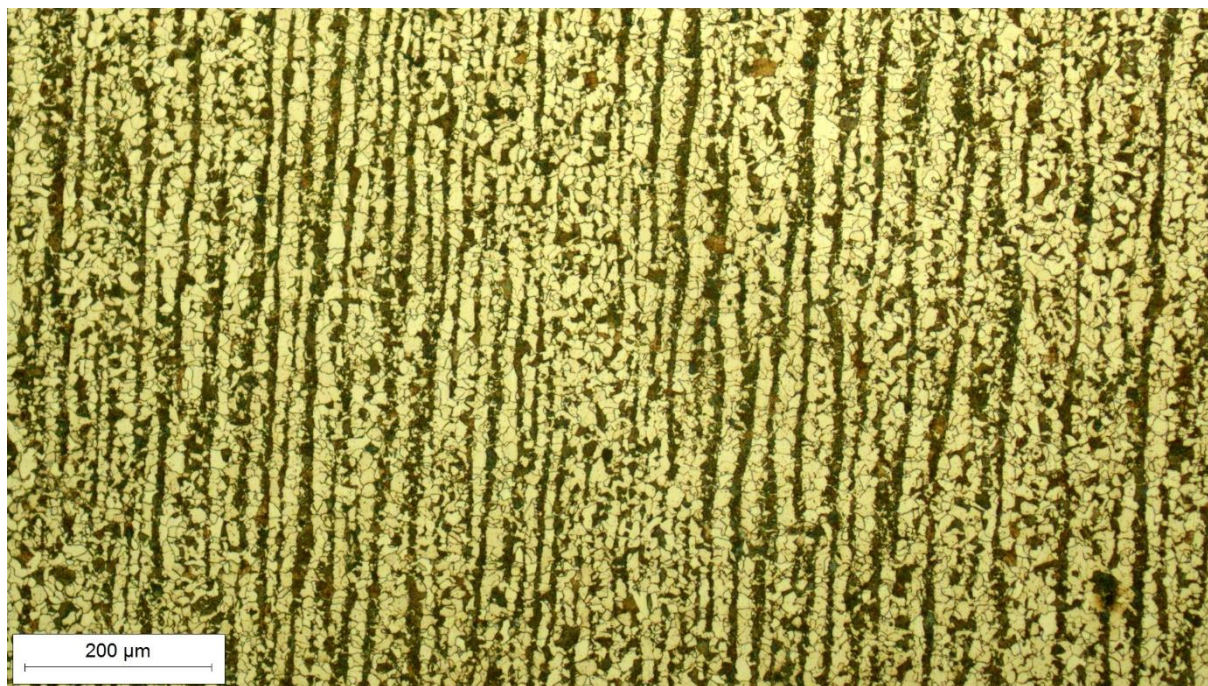
Slika 14. Metalografski uzorak nakon brušenja i poliranja površine



Slika 15. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

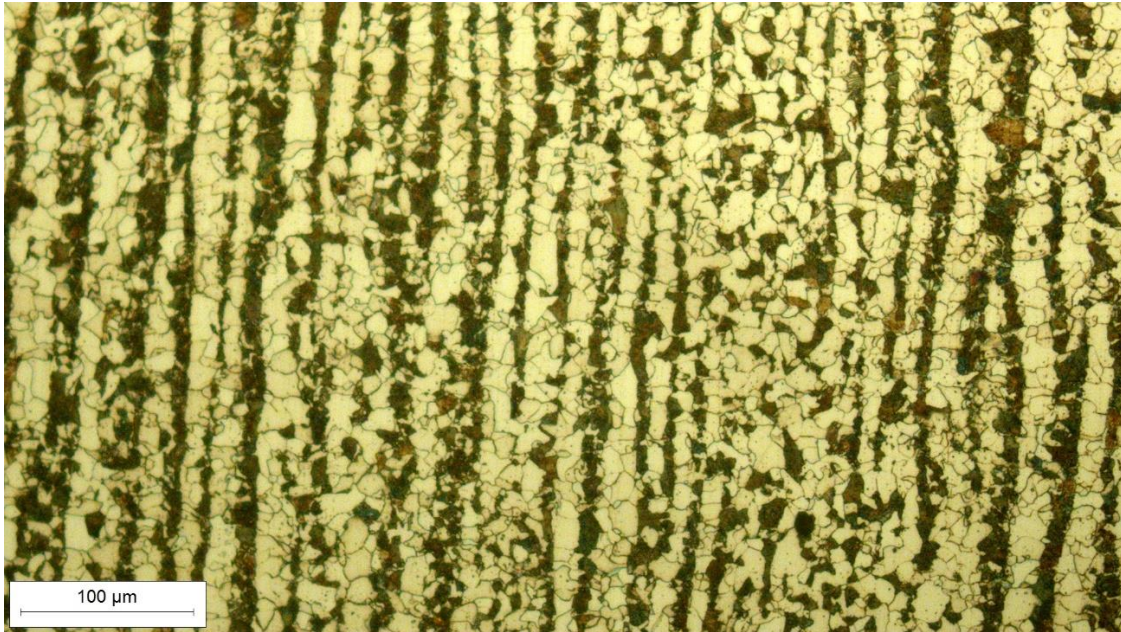
Nakon promatranja površine u poliranom stanju, pri kojem nisu uočene nikakve nepravilnosti u materijalu ploče i metalu navara, površina uzorka je nagrizena. Uzimajući u obzir kemijski sastav osnovnog materijala, korišteno je sredstvo za nagrizanje poznato pod nazivom Nital. To je 5 %-tna otopina dušične kiseline u etilnom alkoholu. Nakon nagrizanja u navedenom sredstvu postaje vidljiva mikrostruktura materijala ploče. S obzirom na udio ugljika od 0,17 %, očekivana mikrostruktura u ovom podeutektoidnom čeliku je feritno-perlitna, s puno većim udjelom ferita. Nital nagriza perlitna zrna, a ne nagriza feritna zrna.

Na slici 16 prikazana je osnovna mikrostruktura ploče od čelika oznake P355GH snimljena pri povećanju 100×. Mikrostruktura se sastoji od feritnih kristalnih zrna koja su svijetla i perlitnih kristalnih zrna koja su tamno obojena. Ferita ima oko dva puta više od perlita. Mikrostruktura je izrazito usmjerena što je uobičajeno kod valjanih čeličnih ploča.



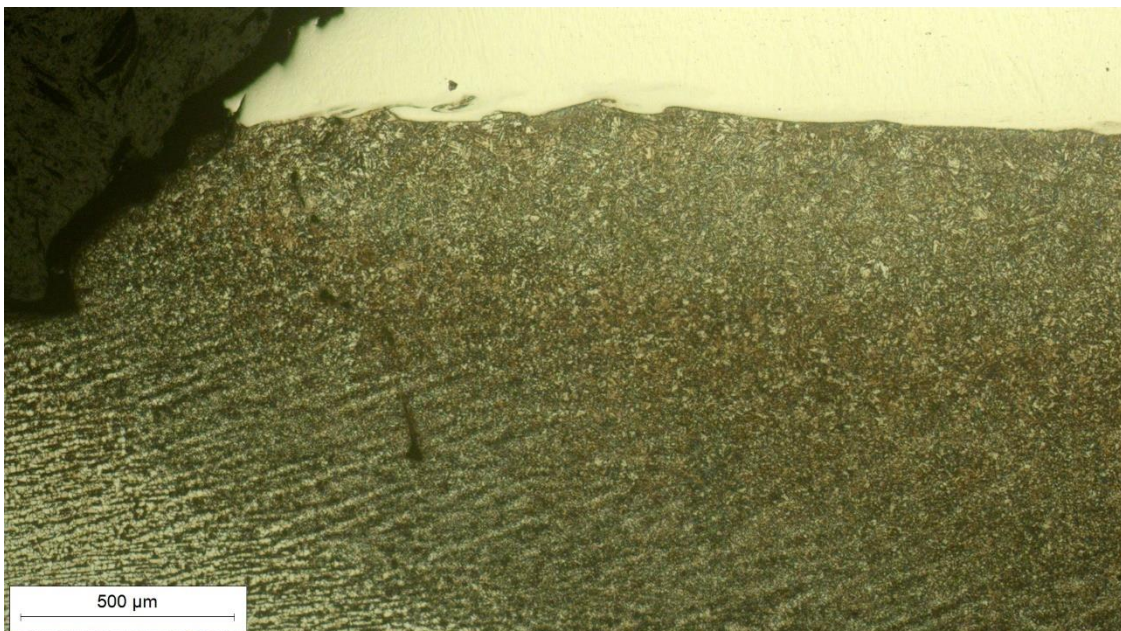
Slika 16. Osnovna mikrostruktura valjane ploče čelika P355GH snimljena pri povećanju 100×

Na slici 17 prikazana je ista mikrostruktura osnovnog materijala snimljena pri većem povećanju od 200 ×. Na većem povećanju jasnije se može vidjeti oblik kristalnih zrna ferita i perlita.



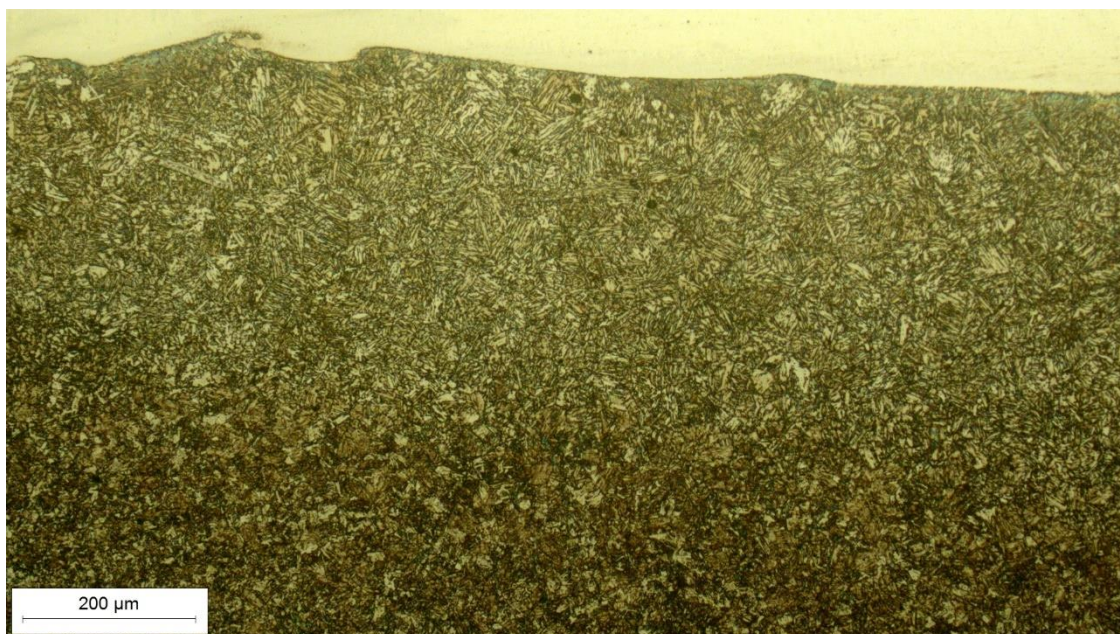
Slika 17. Osnovna mikrostruktura valjane ploče čelika P355GH snimljena pri povećanju 200×

Na slici 18 prikazana je mikrostruktura u zoni utjecaja topline uz rub navara. Zbog velikog unosa topline promijenjena je osnovna mikrostruktura čelične ploče. S približavanjem liniji staljivanja sve više nestaje usmjerenost mikrostrukture. Linija staljivanja je jasno izražena.

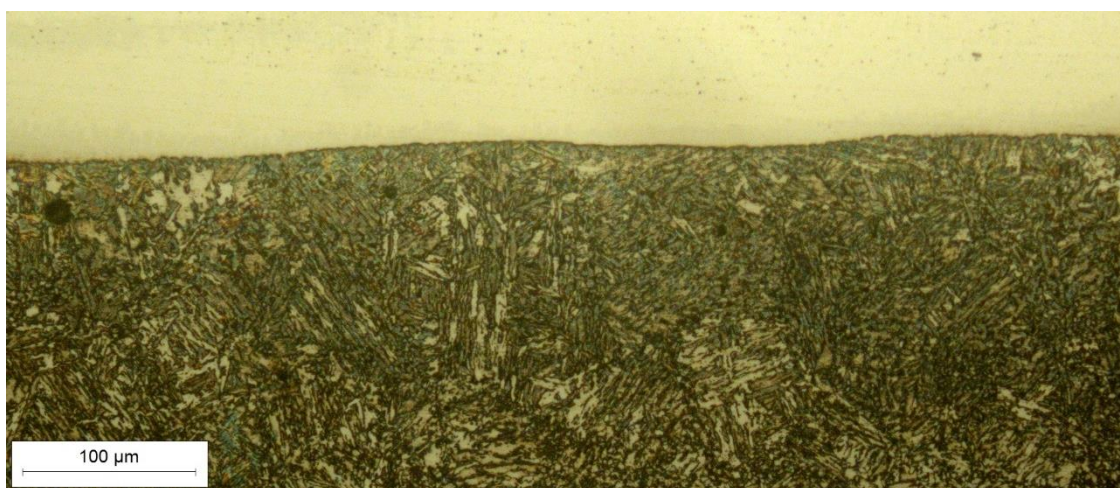


Slika 18. Mikrostruktura u zoni utjecaja topline uz rub navara, snimljena pri povećanju 50×

Na slici 19 prikazano je isto područje kao na slici 18 snimljeno uz veće povećanje (100×). Na slici 20 vidi se također mikrostruktura uz liniju staljivanja snimljena dalje od ruba navara, uz još veće povećanje (200×). Na obje navedene slike vidi se velika promjena mikrostrukture u odnosu na feritno-perlitnu mikrostrukturu osnovnog materijala ploče. Zbog velikog unosa topline pri nanošenju navarenih slojeva, mikrostruktura je postala gotovo igličasta.

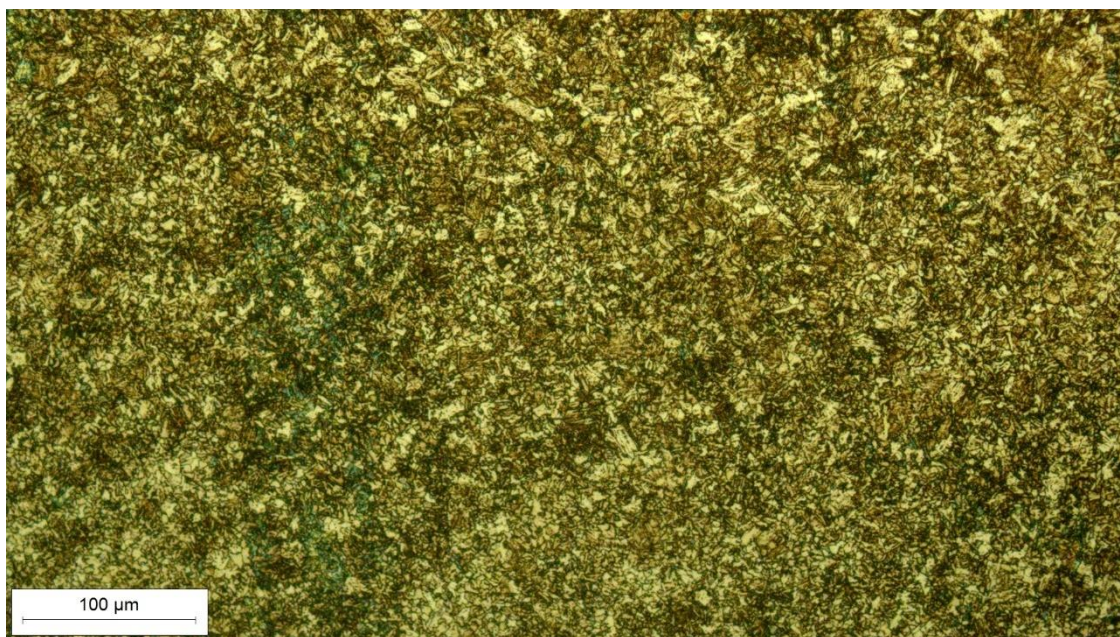


Slika 19. Mikrostruktura u zoni utjecaja topline uz rub navara, snimljena pri povećanju 100×

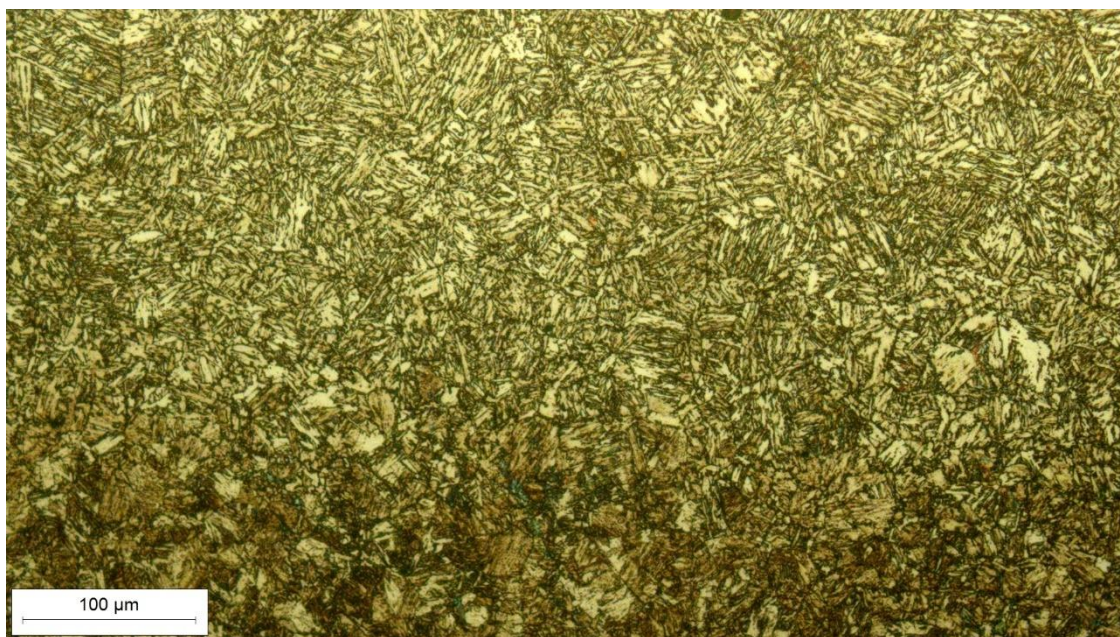


Slika 20. Mikrostruktura u zoni utjecaja topline u sredini navara, snimljena pri povećanju 200×

Na slici 21 prikazana je mikrostruktura u području niskotemperaturnog ZUT-a, a na slici 22 mikrostruktura u području visokotemperaturnog ZUT-a koja je bliže liniji staljivanja. Zbog viših temperatura kristalna zrna u visokotemperaturnom ZUT-u su krupnija od kristalnih zrna koja su udaljenija od linije staljivanja.



Slika 21. Mikrostruktura u niskotemperaturnom ZUT-u, snimljeno pri povećanju 200×



Slika 22. Mikrostruktura u visokotemperaturnom ZUT-u, snimljeno pri povećanju 200×

Na slici 23 vidi se mikrostruktura u području navara. S obzirom na visoki stupanj legiranosti žice za navarivanje Nital nije nagrizao metal navara pa se ne mikrostruktura ne može razlučiti. S obzirom na kemijski sastav žice za navarivanje može se s velikom sigurnošću zaključiti da je mikrostruktura metala navara potpuno austenitna.



Slika 23. Mikrostruktura metala navara, snimljeno pri povećanju od 100×

5.6 Mjerenje makrotvrdoće HV10 i mikrotvrdoće HV0,2

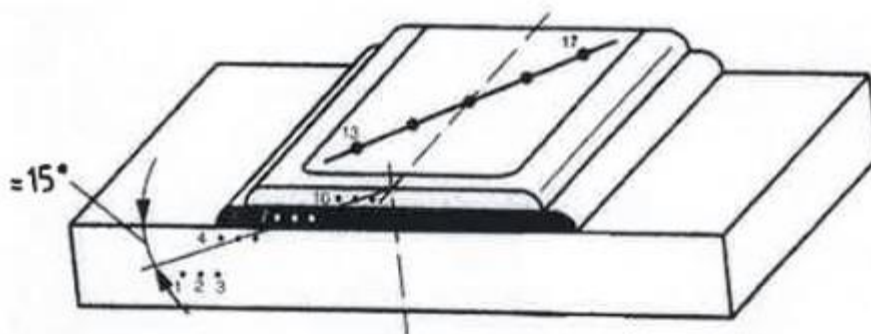
Ispitivanje tvrdoće HV10 provedeno je u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju u Zagrebu, prema normi HRN EN ISO 6507–1:2008. Za mjerenje tvrdoće korištena je metoda po Vickersu. Ispitivanje je provedeno na način da se dijamantni utiskivač, koji je u obliku četverostrane piramide s kvadratnom bazom i kutom od 136° utisne u uzorak te se izmjeri dijagonalna udaljenost na otisku. Ispitivanje tvrdoće HV10 provedeno je na tvrdomjeru prikazanom na slici 24.



Slika 24. Uređaj za ispitivanje makrotvrdoće HV10

Shema prikaza mjerenja vidi se na slici 25. Napravljeno je ukupno sedamnaest mjerenja u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline, u prvom sloju navara, u drugom sloju navara te po površini uzorka.

U tablici 5 prikazani su rezultati mjerenja makrotvrdoće HV10.



Slika 25 Shematski prikaz pozicija za mjerenje tvrdoće HV10

Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10

| | Oznaka mjerenja | HV10 |
|-----------------------|-----------------|------|
| Osnovni materijal | 1 | 165 |
| | 2 | 179 |
| | 3 | 168 |
| Zona utjecaja topline | 4 | 233 |
| | 5 | 224 |
| | 6 | 212 |
| Prvi sloj navara | 7 | 206 |
| | 8 | 199 |
| | 9 | 203 |
| Drugi sloj navara | 10 | 184 |
| | 11 | 184 |
| | 12 | 197 |
| Površina navara | 13 | 181 |
| | 14 | 199 |
| | 15 | 236 |
| | 16 | 254 |
| | 17 | 264 |

Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 variraju od 165 do 264 HV10 pri čemu su najmanje vrijednosti tvrdoće izmjerene u osnovnom materijalu, a najveće na površini navara. Srednja vrijednost tvrdoće u osnovnom materijalu iznosi 171 HV10. U zoni utjecaja topline srednja vrijednost tvrdoće iznosi 223 HV10. Srednja vrijednost tvrdoće u prvom sloju navara je 203 HV10 i viša je od srednje vrijednosti u drugom sloju koja iznosi 188 HV10. Srednja vrijednost tvrdoće na površini navara je najviša i iznosi 227 HV10.

Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2 provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, prema normi HRN EN ISO 6507-1:2023. Ispitivanje je provedeno na Zwick Roell Indetec uređaju, prikazanom na slici 26. Provedeno je ukupno 60 mjerenja, od površine navara prema osnovnom materijalu ploče.



Slika 26. Oprema za mjerenje mikrotvrdoće HV0,2

U tablici 6 prikazani su rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2, a u dijagramu na slici 27 isti rezultati su prikazani grafički. Na prikazu su s lijeve strane rezultati mjerenja tvrdoće u navarenom sloju, a s desne rezultati mjerenja tvrdoće u osnovnom materijalu ploče.

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće variraju od 167 do 306 HV0,2. Najviša vrijednost mikrotvrdoće izmjerena je u zoni utjecaja topline uz liniju staljivanja.

Tablica 6. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV 0,2

| Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2 | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| mjerenje | HV 0,2 | mjerenje | HV 0,2 | mjerenje | HV 0,2 | mjerenje | HV 0,2 |
| 1 | 183 | 16 | 181 | 31 | 197 | 46 | 174 |
| 2 | 185 | 17 | 179 | 32 | 180 | 47 | 173 |
| 3 | 189 | 18 | 177 | 33 | 182 | 48 | 172 |
| 4 | 194 | 19 | 180 | 34 | 306 | 49 | 170 |
| 5 | 179 | 20 | 187 | 35 | 228 | 50 | 163 |
| 6 | 177 | 21 | 192 | 36 | 224 | 51 | 166 |
| 7 | 185 | 22 | 196 | 37 | 201 | 52 | 170 |
| 8 | 176 | 23 | 192 | 38 | 188 | 53 | 158 |
| 9 | 167 | 24 | 178 | 39 | 178 | 54 | 172 |
| 10 | 174 | 25 | 178 | 40 | 180 | 55 | 205 |
| 11 | 174 | 26 | 174 | 41 | 171 | 56 | 169 |
| 12 | 180 | 27 | 187 | 42 | 163 | 57 | 165 |
| 13 | 178 | 28 | 186 | 43 | 181 | 58 | 166 |
| 14 | 176 | 29 | 191 | 44 | 183 | 59 | 181 |
| 15 | 172 | 30 | 199 | 45 | 168 | 60 | 166 |

6. ZAKLJUČAK

Na temelju rezultata dobivenih pri karakterizaciji navara na ploči od čelika oznake P355GH, a koja je uključivala analizu kemijskog sastava, analizu makrostrukture, analizu mikrostrukture i ispitivanja tvrdoće, može se zaključiti sljedeće:

- Kemijski sastavi materijala ploče i navara odgovaraju propisanom kemijskom sastavu od strane proizvođača.
- Analiza makrostrukture navarenog sloja na osnovni materijal ploče pokazala je da nema nikakvih nepravilnosti i da je navarivanje izvedeno korektno.
- Mikrostruktura osnovnog materijala je ferlitno-perlitna, izrazito usmjerena i s puno većim udjelom ferita. Linija staljivanja je jasno izražena i pravilna. U zoni utjecaja topline narušena je mikrostruktura osnovnog materijala ploče, nema usmjerenosti strukture, kristalna zrna su bila veća osobito u blizini linije staljivanja. U metalu navara nema uočenih nepravilnosti, a prema kemijskom sastavu mikrostruktura je vrlo vjerovatno potpuno austenitna.
- Srednja vrijednost tvrdoće osnovnog materijala iznosi 171 HV10. U zoni utjecaja topline tvrdoća je nešto viša i iznosi 223 HV10. U prvim prolazima navarenog sloja srednja vrijednost tvrdoće je 202 HV10, a u drugom navarenom sloju je nešto viša i iznosi 188 HV10. Najviše vrijednosti tvrdoće dobivene su mjerenjem na površini navara, s prosjekom od 227 HV10.
- Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu, navarenim slojevima i na površini navara slične su vrijednostima dobivenim pri mjerenju makrotvrdoće HV10.

Prema svemu navedenom kvaliteta navara je zadovoljavajuća.

LITERATURA

- [1] Filetin, T., Kovcačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [3] Pavlović, P.: Materijal čelik, Zagreb : SKTH, Kemija u industriji, 1990.
- [4] Gojić, M.: Razvoj metalurgije i proizvodnje čelika u Republici Hrvatskoj, agreb : Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, 2024.
- [5] Hrgović, D.: Tehnički materijali 2 : za srednje strojarske škole, Zagreb : Školska knjiga, 1996.
- [6] Sulyok, M.: Čelične konstrukcije: udžbenik za studij arhitekture, Zagreb : Golden marketing [etc.], 2003.
- [7] Nikšić, M.: Strojarsvo: osnove teorije, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2017.
- [8] Mulc, A.: Proizvodno strojarstvo, Zagreb : Školska knjiga, 1998.
- [9] Kovačićek, F.: Proizvodno strojarstvo – materijali, Školska knjiga, Zagreb, 2002.
- [10] Leksikografski zavod Miroslav Krleža: Hrvatska tehnička enciklopedija - Brodogradnja, pomorstvo, promet, strojarstvo, zrakoplovstvo, LHMZ, Zagreb, 2018.
- [11] Babić, A.: Ispitivanje tehničkih materijala : priručnik za učenike za trogodišnja i četverogodišnja zanimanja u području strojarstva i brodogradnje, Zagreb : Školska knjiga, 2021.
- [12] Lacković, Z.: Upravljanje tehničkim procesima, Zagreb : Hrvatska akademija tehničkih znanosti, 2015.
- [13] Easterling, K. E. (1992). Introduction to the Physical Metallurgy of Welding. Butterworth-Heinemann.
- [14] Lancaster, J. F. (1999). Handbook of Structural Welding: Processes, Materials, and Methods Used in the Welding of Major Structures, Pipelines, and Process Plant. Woodhead Publishing.
- [15] Gourd, L. M. (1995). Principles of Welding Technology. Butterworth-Heinemann.
- [16] Messler, R. W. (2008). Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. Wiley.
- [17] Davies, A. C. (1993). The Science and Practice of Welding: Volume 1 & 2. Cambridge University Press.

-
- [18] Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. Wiley.
- [19] O'Brien, A., Scully, J. (2004). *Welding Handbook, Volume 1: Welding Science and Technology*. American Welding Society.
- [20] Lippold, J. C., Kotecki, D. J. (2005). *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. Wiley.
- [21] Mills, A. K. Childs, T. H. C. (1992). *Steel and Its Heat Treatment: Bofors Handbook*. Elsevier.
- [22] Grong, Ø. (1997). *Metallurgical Modelling of Welding*. Institute of Materials.
- [23] O'Brien, A. & Scully, J. (2004). *Welding Handbook, Volume 1: Welding Science and Technology*. American Welding Society.
- [24] Lancaster, J. F. (1999). *Handbook of Structural Welding: Processes, Materials, and Methods Used in the Welding of Major Structures, Pipelines, and Process Plant*. Woodhead Publishing.
- [25] Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. Wiley.
- [26] Hughes, R., 2013. *Welding: A Comprehensive Guide to MIG, TIG, ARC, and Oxyacetylene Welding*. McGraw-Hill Education.
- [27] Lippold, J. C., & Kotecki, D. J. (2005). *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. Wiley.
- [28] Grong, Ø. (1997). *Metallurgical Modelling of Welding*. Institute of Materials.
- [29] Hall, K., 2018. *Practical Welding Safety: Managing Risks in Welding Operations*. CRC Press.
- [30] Haynes, S., 2005, *MIG Welding: Principles and Practice*, CRC Press
- [31] Hickey, R., 2019. *The Basics of MIG Welding*. Elsevier.
- [32] Messler, R. W. (2008). *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. Wiley.
- [33] Davis, J. R. (1993). *Welding: ASM Specialty Handbook*. ASM International.
- [34] Davies, G., 2021. *Industrial Welding Engineering*. Butterworth-Heinemann.
- [35] Easterling, K. E. (1992). *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*. Butterworth-Heinemann.
- [36] Davies, A. C. (1993). *The Science and Practice of Welding: Volume 1 & 2*. Cambridge University Press.
- [37] Ahmed, N. (2005). *New Developments in Advanced Welding*. Woodhead Publishing.
- [38] Dutton, C., 2017. *Advanced Welding Technology*. Springer.

[39] Fields, J., 2017, MIG Welding Essentials, Industrial Press

[40] Glicksman, M. 2014. Welding: Principles and Applications. Delmar Cengage Learning.