

Analiza zavarljivosti Cr-Mo čelika P91

Širić, Petra

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:474044>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-12**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Petra Širić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Petra Širić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću i asistentici dr. sc. Maji Jurici na uloženom vremenu, strpljenju i pomoći oko izrade diplomskog rada.

Najviše se zahvaljujem obitelji, prijateljima i kolegama koji su mi beskrajna podrška u svemu.

Petra Širić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|--|-----------------------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum: | Prilog: |
| Klasa: | 602 - 04 / 20 - 6 / 3 |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 20 - | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **PETRA ŠIRIĆ** Mat. br.: **0035201850**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA ZAVARLJIVOSTI Cr-Mo ČELIKA P91**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WELDABILITY ANALYSIS OF P91 Cr-Mo STEEL**

Opis zadatka:

Na temelju literature detaljno obrazložiti problematiku zavarljivosti čelika P91 koji se primjenjuje u izgradnji i reparaturi termoenergetskih postrojenja. Opisati utjecaj zavarivanja na strukturne transformacije u zoni utjecaja topline i prikazati specifične tehnologije zavarivanja i toplinske obrade. Dati prikaz prikladnih dodatnih materijala te zaštitnih plinova koji se koriste pri zavarivanju čelika P91.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno odrediti odgovarajuću metodu ispitivanja zavarljivosti kojom se mogu kvantificirati utjecaji devijacije režima toplinskog ciklusa što uključuje pregrijavanje, međuprolaznu temperaturu i naknadnu toplinsku obradu. Zavarivanje provesti u određenom rasponu parametara koji odgovara provjerenoj praksi i preporukama normi. Na uzorcima provesti odgovarajuća nerazorna i razorna ispitivanja. Na temelju rezultata odrediti kritične vrijednosti parametara toplinskog ciklusa te dati preporuke za daljnja istraživanja.

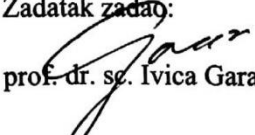
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
24. rujna 2020.


Rok predaje rada:
26. studenog 2020.

Predviđeni datum obrane:
30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadan:


prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:


prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| POPIS SLIKA | IV |
| POPIS TABLICA..... | VI |
| POPIS KRATICA | VII |
| POPIS OZNAKA | VIII |
| SAŽETAK..... | IX |
| SUMMARY | X |
| 1. UVOD 1 | |
| 2. MATERIJALI ZA RAD NA POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA | 2 |
| 2.1. Promjene svojstava materijala porastom temperature | 4 |
| 2.1.1. Puzanje materijala..... | 6 |
| 2.2. Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama | 9 |
| 2.2.1. Ugljični (nelegirani) čelici | 9 |
| 2.2.2. Niskolegirani čelici..... | 10 |
| 2.2.3. Visokolegirani martenzitni čelici..... | 11 |
| 2.2.4. Visokolegirani austenitni čelici | 13 |
| 3. VISOKOLEGIRANI MARTENZITNI ČELICI P91 ZA RAD NA VISOKIM TEMPERATURAMA | 15 |
| 3.1. Kemijski sastav, fizikalna i mehanička svojstva čelika P91 | 16 |
| 3.2. Ponašanje tijekom transformacije čelika P91 | 20 |
| 3.3. Mikrostruktura čelika P91..... | 21 |
| 3.4. Svojstva nakon dozrijevanja čelika P91..... | 22 |
| 3.5. Svojstvo puzanja | 23 |
| 4. ZAVARIVANJE ČELIKA P91 | 24 |
| 4.1. Odabir dodatnog materijala za zavarivanje čelika P91 | 24 |
| 4.2. Utjecaj zavarivanja na strukturne transformacije u zoni utjecaja topline | 26 |
| 4.3. Toplinska obrada čelika P91 | 28 |
| 4.3.1. Predgrijavanje | 29 |
| 4.3.2. Održavanje međuprolazne temperature | 30 |
| 4.3.3. Naknadna toplinska obrada | 31 |
| 4.4. Postupci zavarivanja čelika P91 | 31 |
| 4.4.1. REL postupak zavarivanja..... | 33 |
| 4.4.2. TIG postupak zavarivanja..... | 35 |
| 4.4.2.1. Zaštitni plinovi kod TIG postupka zavarivanja | 39 |
| 5. EKSPERIMENTALNI RAD | 42 |
| 5.1. Oprema za zavarivanje..... | 43 |
| 5.2. Osnovni materijal..... | 46 |
| 5.3. Zaštitni plin | 47 |

| | |
|---|----|
| 5.4. Postupak protaljivanja uzoraka od čelika P91 | 49 |
| 5.5. Priprema i izrada ispitnih uzoraka | 54 |
| 5.6. Analiza makrostrukture | 54 |
| 5.7. Analiza mikrostrukture | 64 |
| 5.8. Mjerenje tvrdoće | 70 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 75 |
| LITERATURA..... | 77 |
| PRILOZI..... | 79 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Ovisnost modula elastičnosti i modula smičnosti čelika o temperaturi [1]..... | 4 |
| Slika 2. | Ovisnost koeficijenta toplinskog istezanja čelika o temperaturi [1] | 5 |
| Slika 3. | Promjena mehaničkih svojstava uz povišenje temperature [2] | 5 |
| Slika 4. | Promjena savojne dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika X10NiCrWTi36-15 s porastom temperature [2] | 6 |
| Slika 5. | Utjecaj legiranja na promjenu statičke izdržljivosti pri različitim radnim temperaturama [1] | 8 |
| Slika 6. | Utjecaj mikrostrukture na statičku izdržljivost pri 500 °C [1] | 8 |
| Slika 7. | Ovisnost statičke izdržljivosti o temperaturi [1] | 9 |
| Slika 8. | Ovisnost toplinske vodljivosti i temperature [4] | 17 |
| Slika 9. | Ovisnost koeficijenta linearnog toplinskoga širenja i temperature [4]..... | 18 |
| Slika 10. | Ovisnost modula elastičnosti i temperature za čelik P91 [4] | 18 |
| Slika 11. | Vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja za trajnu deformaciju od 0,2 % za čelik P91 u odnosu na temperaturu [4]..... | 19 |
| Slika 12. | Vrijednosti vlačne čvrstoće za čelik P91 u odnosu na povišenje temperature [4] | 19 |
| Slika 13. | Vrijednosti žilavosti u odnosu na promjenu temperature [4] | 19 |
| Slika 14. | CCT dijagram za čelik P91 [4]..... | 20 |
| Slika 15. | Utjecaj popuštanja na mehanička svojstva čelika P91 [4] | 21 |
| Slika 16. | Karakteristična mikrostruktura čelika P91 nakon normalizacije i popuštanja [4] | 22 |
| Slika 17. | Konvencionalna granica razvlačenja za čelik P91 nakon dozrijevanja [4] | 22 |
| Slika 18. | Vlačna čvrstoća čelika P91 nakon dozrijevanja [4] | 22 |
| Slika 19. | Žilavost čelika P91 nakon dozrijevanja [4] | 22 |
| Slika 20. | Istezljivost čelika P91 nakon dozrijevanja [4] | 23 |
| Slika 21. | Rezultati testa puzanja za čelik P91 na tri različite temperature [4] | 23 |
| Slika 22. | Tipične promjene u strukturi kod zavarivanja čelika P91 [10] | 26 |
| Slika 23. | Karakterističan ciklus toplinske obrade čelika P91 prije, tijekom i nakon zavarivanja [4] | 29 |
| Slika 24. | Postavka prilikom predgrijavanja cijevi od čelika [12]..... | 30 |
| Slika 25. | Zavarivanje cijevi od čelika P91 [12]..... | 30 |
| Slika 26. | Zavarivanje čelika T/P91 sa čelikom T/P91 [4]..... | 32 |
| Slika 27. | Zavarivanje čelika T/P91 s 12 % Cr materijalima [4]..... | 32 |
| Slika 28. | Zavarivanje čelika T/P91 sa T/P22 [4]..... | 33 |
| Slika 29. | Shematski prikaz REL zavarivanja: 1 – obložena elektroda; 2 – obloga; 3 – žica; 4 – zaštitni plinovi; 5 – troska; 6 – metal zavara; 7 – rastaljeni materijal; 8 – električni luk; 9 – osnovni materijal [15] | 34 |
| Slika 30. | REL zavarivanje cjevovoda celuloznom elektrodom (silazna tehnika) [15] | 35 |
| Slika 31. | Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja: 1 – netaljiva elektroda; 2 – sapnica gorionika; 3 – električni luk; 4 – rastaljeni materijal; 5 – metal zavara; 6 – dodatni materijal; 7 – visokofrekventni generator; 8 – izvor struje [16]..... | 36 |
| Slika 32. | Shematski prikaz standardne opreme za TIG zavarivanje: 1 – boca sa zaštitnim plinom; 2 – izvor struje za zavarivanje; 3 – gorionik; 4 – dodatni materijal; 5 – radni komad [16] | 36 |
| Slika 33. | Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja [16] | 40 |
| Slika 34. | Uređaj za zavarivanje Fronius MagicWave 230i EF [21]..... | 43 |
| Slika 35. | Sustav za automatsko upravljanje „Bugo Systems“ s postavljenim pištoljem za zavarivanje u odnosu na radni komad | 44 |
| Slika 36. | Infracrveni termometar Fluke 568 [23] | 45 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 37. | Postupak predgrijavanja uzorka | 45 |
| Slika 38. | Izmjerena temperatura na termometru Fluke 568 neposredno prije protaljivanja | 45 |
| Slika 39. | Uzorak 1 pozicioniran u odnosu na pištolj za zavarivanje prije početka protaljivanja..... | 46 |
| Slika 40. | Pripremljeni očišćeni uzorci prije protaljivanja | 47 |
| Slika 41. | Boca zaštitnog plina Argon 4.8 | 48 |
| Slika 42. | Boca zaštitnog plina Aluline He15..... | 48 |
| Slika 43. | Postupak protaljivanja uzorka od čelika P91 pod zaštitom 100 % Ar | 49 |
| Slika 44. | Postupak protaljivanja uzorka od čelika P91 pod zaštitom 85 % Ar / 15 % He ... | 50 |
| Slika 45. | Uzorci nakon postupka protaljivanja..... | 51 |
| Slika 46. | Usporedba toplina unesenih prilikom protaljivanja za svaki uzorak pojedinačno (zelenom bojom označeni su uzorci protaljivani pod zaštitom 100 % Ar, a plavom bojom uzorci protaljivani pod zaštitom 85 % Ar / 15 % He)..... | 53 |
| Slika 47. | Izrezivanje makroizbrusaka pomoću tračne pile | 54 |
| Slika 48. | Makroizbrusak uzorka 1 | 55 |
| Slika 49. | Makroizbrusak uzorka 2 | 55 |
| Slika 50. | Makroizbrusak uzorka 3 | 56 |
| Slika 51. | Makroizbrusak uzorka 4..... | 56 |
| Slika 52. | Makroizbrusak uzorka 5..... | 57 |
| Slika 53. | Makroizbrusak uzorka 6..... | 57 |
| Slika 54. | Makroizbrusak uzorka 7 | 58 |
| Slika 55. | Makroizbrusak uzorka 8..... | 58 |
| Slika 56. | Makroizbrusak 1 s označenim mjerenim veličinama (širina zone taljenja, dubina zone taljenja i širina zone utjecaja topline) | 59 |
| Slika 57. | Usporedba širina zone taljenja za svaki uzorak pojedinačno (zelenom bojom označeni su uzorci protaljivani pod zaštitom 100 % Ar, a plavom bojom uzorci protaljivani pod zaštitom 85 % Ar / 15 % He)..... | 61 |
| Slika 58. | Usporedba dubina zone taljenja za svaki uzorak pojedinačno (zelenom bojom označeni su uzorci protaljivani pod zaštitom 100 % Ar, a plavom bojom uzorci protaljivani pod zaštitom 85 % Ar / 15 % He)..... | 62 |
| Slika 59. | Usporedba širina zone utjecaja topline za svaki uzorak pojedinačno (zelenom bojom označeni su uzorci protaljivani pod zaštitom 100 % Ar, a plavom bojom uzorci protaljivani pod zaštitom 85 % Ar / 15 % He)..... | 63 |
| Slika 60. | Mikrostruktura osnovnog materijala (čelik P91), povećanje 100x | 64 |
| Slika 61. | Označena područja promjene mikrostrukture (zona taljenja, zona utjecaja topline i osnovni materijal) na uzorku 1 | 65 |
| Slika 62. | Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 1, povećanje 500x..... | 65 |
| Slika 63. | Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 2, povećanje 500x..... | 66 |
| Slika 64. | Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 3, povećanje 500x..... | 66 |
| Slika 65. | Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 4, povećanje 500x..... | 67 |
| Slika 66. | Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 5, povećanje 500x..... | 67 |
| Slika 67. | Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 6, povećanje 500x..... | 68 |
| Slika 68. | Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 7, povećanje 500x..... | 68 |
| Slika 69. | Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 8, povećanje 500x..... | 69 |
| Slika 70. | Uređaj za mjerenje tvrdoće Reicherter | 70 |
| Slika 71. | Makroizbrusak uzorka 1 s označenim točkama mjerenja tvrdoće | 71 |
| Slika 72. | Usporedba prosječnih iznosa tvrdoće za svako područje svakog uzorka..... | 73 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature nekih metala [1] | 3 |
| Tablica 2. Kemijski sastav i mehanička svojstva najčešće korištenih čelika za kotlovske limove [3] | 10 |
| Tablica 3. Mehanička svojstva najčešće korištenih niskolegiranih čelika za rad pri povišenim temperaturama [1] | 11 |
| Tablica 4. Mehanička svojstva nekih visokolegiranih martenzitnih čelika [1] | 12 |
| Tablica 5. Mehanička svojstva nekih visokolegiranih austenitnih čelika [1] | 14 |
| Tablica 6. Kemijski sastav čelika P91 [4] | 16 |
| Tablica 7. Glavna fizikalna svojstva čelika P91 [4] | 17 |
| Tablica 8. Mehanička svojstva čelika P91 [6] | 18 |
| Tablica 9. Tipične vrijednosti kemijskog udjela pojedinih elemenata u metalu zavora [4] ... | 25 |
| Tablica 10. Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [16] | 38 |
| Tablica 11. Usporedba karakteristika zavarivanja prilikom primjene različitih zaštitnih plinova i mješavina [16] | 41 |
| Tablica 12. Plan pokusa | 42 |
| Tablica 13. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje MagicWave 230i [21] | 43 |
| Tablica 14. Kemijski sastav osnovnog materijala [4] | 46 |
| Tablica 15. Mehanička svojstva osnovnog materijala [6] | 46 |
| Tablica 16. Postavljeni i očitani parametri protaljivanja uzoraka | 52 |
| Tablica 17. Vrijednosti unosa topline svakog uzorka | 53 |
| Tablica 18. Geometrijska analiza makroizbrusaka | 60 |
| Tablica 19. Rezultati mjerenja tvrdoće | 71 |
| Tablica 20. Prosječne vrijednosti tvrdoće za svako područje svakog uzorka | 73 |

POPIS KRATICA

| Kratice | Opis |
|-----------------|---|
| A | Austenit |
| ASTM | Američko društvo za ispitivanja i materijale |
| B | Bainit |
| BCC | Prostorno centrirana kubična rešetka |
| C | Ugljik |
| CO ₂ | Ugljikov dioksid |
| Cr | Krom |
| Cu | Bakar |
| DVM | njem. <i>Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung</i> |
| EPP | Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom |
| F | Ferit |
| FCC | Plošno centrirana kubična rešetka |
| HB | Tvrdoća po Brinellu |
| HV | Tvrdoća po Vickersu |
| M | Martenzit |
| MAG | Elektrolučno zavarivanje u zaštiti aktivnog plina |
| MIG | Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog plina |
| Mn | Mangan |
| Mo | Molibden |
| Mp | Popušteni martenzit |
| N | Dušik |
| Nb | Niobij |
| Ni | Nikal |
| OM | Osnovni materijal |
| P | Fosfor |
| P | Perlit |
| REL | Ručno elektrolučno zavarivanje |
| S | Sumpor |
| Si | Silicij |
| Ti | Titan |
| TIG | Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina |
| V | Vanadij |
| ZT | Zona taljenja |
| ZUT | Zona utjecaja topline |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|------------|-------------------|--|
| A_5 | % | Istezanje |
| A_{c1} | °C | Temperatura austenitizacije |
| A_{c3} | °C | Temperatura austenitizacije |
| E | MPa | Modul elastičnosti |
| I | A | Jakost struje protaljivanja |
| k | - | Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja |
| M_f | °C | Temperatura završetka stvaranja martenzita |
| M_s | °C | Temperatura početka stvaranja martenzita |
| Q | kJ/cm | Unos topline |
| R_d | N/mm ² | Dinamička izdržljivost |
| R_e | N/mm ² | Granica tečenja |
| R_m | N/mm ² | Vlačna čvrstoća |
| $R_{m/t}$ | N/mm ² | Statička izdržljivost |
| $R_{p0,2}$ | N/mm ² | Konvencionalna granica razvlačenja za trajnu deformaciju 0,2 % |
| $R_{pe/t}$ | N/mm ² | Granica puzanja |
| T_r | °C | Radna temperatura |
| T_t | °C | Temperatura tališta |
| U | V | Napon protaljivanja |
| v_z | cm/min | Brzina protaljivanja |

SAŽETAK

Opisani su čelici koji su za vrijeme rada izloženi visokim temperaturama te su navedeni specifični uvjeti rada kojima su podvrgnuti navedeni čelici. Detaljni pregled martenzitnog čelika P91 dan je u nastavku. Martenzitni čelik P91 karakterizira primjena prilikom izgradnje i reparacije energetskih postrojenja. Brojne prednosti i nedostaci prikazani su kako bi se doskočilo uspješnosti izvedbe zavarenog spoja. Pravilna primjena rezultira kvalitetnim zavarenim spojem kojim se postiže veća učinkovitost rada postrojenja i smanjenje troškova. Najčešće korišteni postupci prilikom zavarivanja čelika P91 su REL i TIG koji su detaljnije analizirani.

U eksperimentalnom dijelu uzorci od čelika P91 protaljivani su TIG postupkom na način da su kombinirani parametri za svaki uzorak. Konkretno, korištena su dva zaštitna plina (100 % Ar i 85 % Ar / 15 % He), neki su uzorci predgrijavani i regulirana je jakost struje protaljivanja tako što je postignut različit unos topline kod pojedinih uzoraka. Nakon postupka protaljivanja izrađeni su makroizbrusci na kojima je provedena analiza mikrostrukture i mjerenje tvrdoće. Analizom rezultata dobivenih ispitivanjima doneseni su zaključci o zavarljivosti čelika P91.

Ključne riječi: čelik P91, zavarljivost

SUMMARY

The thesis describes steels that are exposed to high temperatures during operation. The specific operating conditions are stated to which these steels are subjected. A detailed overview of P91 martensitic steel is given below. Martensitic steel P91 is characterized by application during construction and repair of thermal power plants. Numerous advantages and disadvantages have been shown to outperform the performance of a welded joint. Proper application results a quality welded joint which achieves greater plant efficiency and reduced costs. The most commonly used procedures for welding P91 steel are MMAW and GTAW.

In the experimental part, the P91 steel samples were melted by the GTAW process in such way that the parameters for each sample were combined. In this experimental work two shielding gases (100 % Ar and 85 % Ar / 15 % He) were used and some samples were preheated. By achieving different heat inputs for individual samples, the melting current was regulated. The samples were subjected to microstructure analysis and hardness measurement after the melting process. Conclusions about the weldability of P91 steel were made by analyzing the results obtained by tests.

Key words: P91 steel, weldability

1. UVOD

Fosilna goriva iako imaju puno jasnih nedostataka prednjače u proizvodnji energije zbog niske cijene pa su i danas goleme subvencije za proizvodnju i potrošnju nafte, zemnog plina, ugljena i treseta. Koliko god se nastoji doskočiti alternativnim metodama proizvodnje energije, nijedna još nije pokazala dovoljnu djelotvornost kako bi se zamijenilo dobivanje energije iz fosilnih goriva. Danas su postrojenja učinjena ekološki prihvatljivima na način da je smanjena potrošnja fosilnih goriva za istu proizvedenu energiju. Povećana učinkovitost postrojenja postignuta je podizanjem radnih temperatura i tlakova medija, što je dovelo do korištenja visokolegiranih čelika. Zahtjevi koje dijelovi postrojenja moraju ispunjavati uključuju mogućnost oblikovanja, zavarljivost i toplinsku obradivost. Također, čelici korišteni u takvim postrojenjima trebaju imati karakteristična mehanička svojstva koja omogućuju dugotrajan rad pri visokim temperaturama i postojanost prilikom cikličkih opterećenja.

S vremenom su razvijani čelici koji su postojaniji na visokim temperaturama i zadovoljavaju potrebne uvjete. Tako je postignuta veća fleksibilnost i smanjenje troškova kod energetskih postrojenja korištenjem, među ostalim, čelika P91. Visokolegirani martenzitni čelici P91 cjenovno su pristupačni i imaju visoku otpornost na puzanje, no postoje zahtjevi koje je potrebno osigurati prije, za vrijeme i nakon zavarivanja. Čelik P91 zahtijeva predgrijavanje, održavanje propisane međuprolazne temperature i propisanu toplinsku obradu nakon zavarivanja. Kad se ne bi ispoštovali navedeni zahtjevi, svojstva zavarenog spoja čelika P91 bila bi narušena.

2. MATERIJALI ZA RAD NA POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

Prilikom uporabe pojedinih dijelova strojeva postoji mogućnost izlaganja dijelova povišenim i visokim radnim temperaturama pa se postavlja zahtjev kojim konstrukcijski materijali moraju zadržati mehaničku otpornost pri tim temperaturama. Povišene ili visoke temperature prevladavaju u termoenergetskim postrojenjima, kemijskim i procesnim postrojenjima, u metalurškim pogonima, u nuklearnim električnim centralama, raketama i svemirskim brodovima, i dr. Iz tog razloga se od materijala za rad na povišenim i visokim temperaturama izrađuju dijelovi parnih kotlova, dijelovi uređaja za preradu nafte, kolektori pare kotlova i turbina, dijelovi parnih i plinskih turbina (osovine, rotor, lopatice), cijevi i oplata pregrijača pare, toplinski čvrsti vijci i matice te dijelovi motora s unutarnjim izgaranjem (posebno velikih brodskih motora) [1].

Promjene ponašanja kod pojedinih materijala, prilikom povišenja radne temperature, individualne su, odnosno svakoj se skupini materijala može pridružiti karakteristično područje temperatura kod kojih nastupaju izraženije promjene svojstava. Brzina nekih kemijskih reakcija može se udvostručiti prilikom povišenja temperature i za samo desetak kelvina. Do bitnijih promjena svojstava dolazi iznad graničnih temperatura koje ovise o talištu pojedinog materijala (T_t). Uspoređujući čelike s aluminijem, bakrom, njihovim legurama, polimernim ili nekim drugim materijalima čelici imaju relativno visoku temperaturu tališta. Zbog navedenog razloga i zbog bolje mehaničke otpornosti pri povišenim temperaturama čelici imaju prednost pokraj navedenih materijala [1].

Uobičajena je podjela radnih temperatura na [1]:

- niske temperature: $T_r < 0,25 \cdot T_t$,
- povišene temperature: $T_r = (0,25 - 0,4) \cdot T_t$,
- visoke temperature: $T_r > 0,4 \cdot T_t$ (pritom je temperatura izražena u Kelvinima).

Kod čelika i željeznih materijala do 180 °C ne dolazi do bitnije promjene mehaničkih svojstava zbog čega se temperature u navedenom rasponu nazivaju niskim temperaturama. Nadalje, radne temperature u rasponu od 180 °C do 450 °C smatraju se povišenim temperaturama, a iznad 450 °C su visoke temperature prilikom kojih započinje puzanje čelika. Iskustveno je dokazano da se zadovoljavajuća mehanička svojstva postižu do temperatura od približno $2/3 T_t$, premda su u praksi maksimalne radne temperature često znatno niže [2]. Niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature za ostale metale prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature nekih metala [1]

| Vrsta metala | Talište (T_t), °C | Niske temperature, °C | Povišene temperature, °C | Visoke temperature, °C | Potencijalna radna temperatura ($2/3 T_t$), °C |
|--------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|--|
| Al | 660 | < -40 | od -40 do +100 | > 100 | 350 |
| Cu | 1083 | < 66 | 66 – 270 | > 270 | 630 |
| Ni | 1453 | <160 | 160 – 420 | > 420 | 880 |
| Ti | 1670 | < 212 | 212 – 504 | > 504 | 1020 |
| Zr | 1852 | < 258 | 258 – 577 | > 577 | 1150 |
| Cr | 1900 | < 270 | 270 – 596 | > 596 | 1180 |
| Hf | 2222 | < 351 | 351 – 725 | > 725 | 1390 |
| Nb | 2468 | < 412 | 412 – 823 | > 823 | 1550 |
| Mo | 2610 | < 448 | 448 – 880 | > 880 | 1650 |
| Ta | 2996 | < 544 | 544 – 1035 | > 1035 | 1910 |
| W | 3410 | < 648 | 648 – 1200 | > 1200 | 2180 |

Materijal je danas jedini ograničavajući faktor daljnjem povišenju temperature i to zbog naprezanja ili preskupe primjene. Danas se zato pridaje velika važnost daljnjem unapređenju materijala za rad pri visokim temperaturama. Primjena pojedinih materijala ovisna je, osim o temperaturi, i o visini radnog naprezanja i vremenskom trajanju opterećenja (kratkotrajno ili dugotrajno opterećenje). Na povišenim i visokim temperaturama dolazi do procesa puzanja, odnosno do nepovratne deformacije nastale uslijed dugotrajnog djelovanja statičkog naprezanja pri povišenim i visokim temperaturama. Također, na dijelove strojeva izložene dugotrajnom djelovanju naprezanja pri povišenoj ili visokoj temperaturi djeluje i okolišni medij te postoji mogućnost nastanka kemijskih promjena u površinskim slojevima, najčešće oksidacije, ali i grešaka uzrokovanih vodikom, sumporovodikom i ugljikovim oksidima. Nažalost, još uvijek nije moguće osigurati istovremenu otpornost čelika na puzanje i koroziju pri visokim temperaturama. Zbog toga se danas čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama dijele na [1]:

- toplinski postojane (dobra mehanička svojstva, slabija otpornost na kemijsko djelovanje),
- vatrootporne (slabija mehanička svojstva, visoka otpornost na oksidaciju).

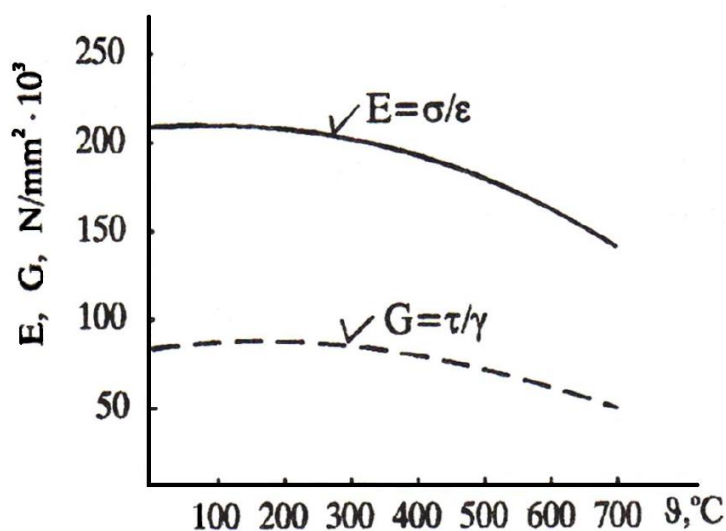
Prilikom odabira materijala za određenu konstrukciju odlučujuću ulogu ima konstruktor koji odlučuje kojem će zahtjevu dati prednost. Dodatan zahtjev prilikom izbora optimalnog materijala jest mogućnost rada nekih uređaja bez prekida godinama. Primjeri takvih uređaja su u suvremenoj procesnoj industriji, nuklearnim pogonima, svemirskim letjelicama, kod kojih se zahtijeva i potpuna sigurnost prilikom rada. Ukratko, problemi su izraženiji kod materijala kod kojih je veće radno naprezanje, viša radna temperatura i predviđena trajnost [1].

2.1. Promjene svojstava materijala porastom temperature

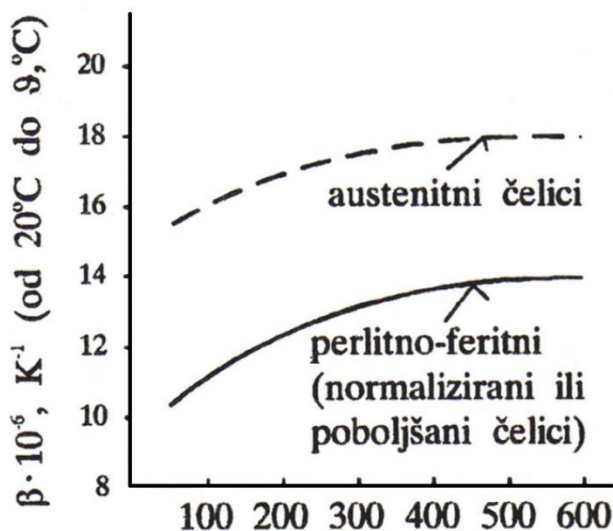
Dijelovi konstrukcija koji rade na povišenim i visokim radnim temperaturama dimenzioniraju se, u području gdje još ne dolazi do puzanja, na temelju mehaničkih svojstava utvrđenih pri definiranoj temperaturi koja najčešće odgovara radnoj temperaturi. Prilikom proračuna uzimaju se sljedeća svojstva [1]:

- $R_{m/\vartheta}$ – vlačna čvrstoća pri radnoj temperaturi,
- $R_{p0,2/\vartheta}$ – konvencionalna granica razvlačenja pri radnoj temperaturi,
- E_{ϑ} – modul elastičnosti pri radnoj temperaturi,
- A_{ϑ} – istežljivost pri radnoj temperaturi,
- $R_{d/\vartheta}$ – dinamička izdržljivost pri radnoj temperaturi.

Navedena svojstva određuju se iz dugotrajnih ispitivanja vlačno napregnute epruvete pri povišenim ili visokim temperaturama. Modul elastičnosti (E) i modul smičnosti (G) snižavaju se povećanjem temperature, a koeficijent toplinskog istežanja (β) raste [1]. Navedeni odnosi između svojstava i temperature prikazani su na slikama 1 i 2.

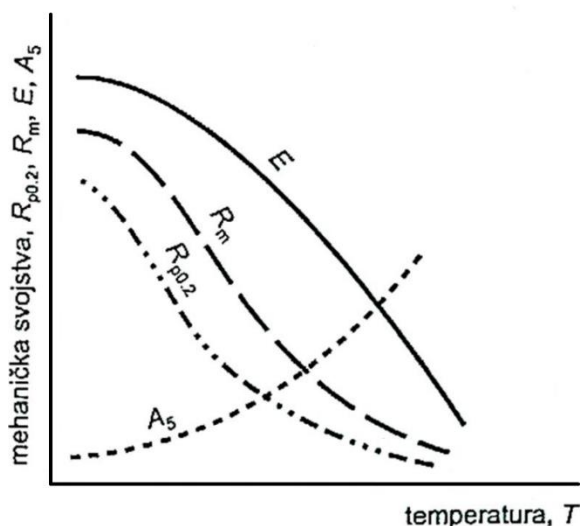


Slika 1. Ovisnost modula elastičnosti i modula smičnosti čelika o temperaturi [1]



Slika 2. Ovisnost koeficijenta toplinskog istežanja čelika o temperaturi [1]

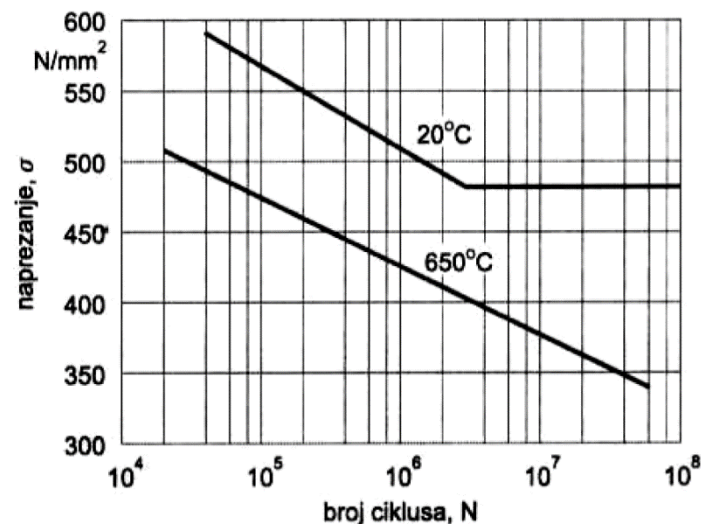
Sljedeća svojstva koja se snižavaju povišenjem temperature su granica razvlačenja i čvrstoća materijala. Uz porast temperature istovremeno se povećava istezljivost, suženje poprečnog presjeka i žilavost. Navedena svojstva u ovisnosti o temperaturi prikazana su na slici 3.



Slika 3. Promjena mehaničkih svojstava uz povišenje temperature [2]

Također, uz povišenje temperature smanjuje se dinamička izdržljivost ili uopće nije izražena, odnosno dolazi do loma kod određenog broja promjena opterećenja. Na slici 4 prikazana je promjena savojne dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika X10NiCrWTi36-15 s porastom temperature.

Dakle, do radnih temperatura iznad kojih počinje puzanje dijelovi se proračunavaju prema vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih kratkotrajnim statičkim vlačnim ispitivanjem. Iznad granične temperature vrijednosti pomoću kojih se odabire prikladan materijal i vrši proračun su granica puzanja i statička izdržljivost [1].



Slika 4. Promjena savojne dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika X10NiCrWTi36-15 s porastom temperature [2]

2.1.1. Puzanje materijala

Prilikom izlaganja strojnog dijela dugotrajnom vlačnom napreznju, osobito ako je radna temperatura iznad 450 °C, rezultati kratkotrajnog statičkog pokusa nisu mjerodavni, odnosno mogu biti samo orijentacijski. Rezultati se ne uzimaju u obzir pri proračunu dimenzija dijela zato što postoji razlika u ponašanju metalnih materijala pri kratkotrajnom pokusu razvlačenja od onog pri dugotrajnom ispitivanju. Dugotrajnim ispitivanjem razvlačenje je zaustavljeno na vrijednosti napreznja $\sigma < R_{p0,2}$, što označava elastično područje. Izlaganjem na visokim temperaturama uz održavanje napreznja konstantnim doći će do trajnih i nepovratnih istežanja materijala, a ta pojava naziva se puzanje. Dakle, puzanje označava toplinski aktiviran, ireverzibilan proces deformacije materijala koji se javlja prilikom dugotrajnog djelovanja konstantnog opterećenja na povišenoj ili visokoj temperaturi. Pojava puzanja ne odnosi se samo na materijale izložene visokim temperaturama, već nastupa kod nekih materijala i pri 20 °C, no iznosi trajnih istežanja su pritom obično mali pa se u praksi ne uzimaju u obzir [3].

Nakon dovoljno dugotrajnog ispitivanja dolazi do loma uslijed deformacije materijala. Brzina puzanja tim je veća i vrijeme do loma tim kraće što je viša temperatura i veće naprezanje. Puzanje metala obično nastupa u temperaturnom području iznad $0,3 T_t$, a u području od $1/3 T_t$ do $2/3 T_t$ brzina puzanja, pri umjerenom napreznju, ostaje konstantna dulji period.

Mehanička svojstva koja su bitna kada se radi o dimenzioniranju dijelova koji rade pri visokim temperaturama gdje nastupa puzanje su [1]:

- $R_{pe/t/\vartheta}$ – granica puzanja pri radnoj temperaturi za definirano vrijeme ispitivanja; vlačno naprezanje koje nakon određenog trajanja ispitivanja (t) pri zadanoj temperaturi (ϑ) uzrokuje određene trajne deformacije epruvete (najčešće 0,5 ili 1 %),
- $R_{m/t/\vartheta}$ – statička izdržljivost pri radnoj temperaturi za određeno vrijeme djelovanja opterećenja; vlačno naprezanje koje nakon definiranog vremena djelovanja (t) pri zadanoj temperaturi (ϑ) uzrokuje lom epruvete.

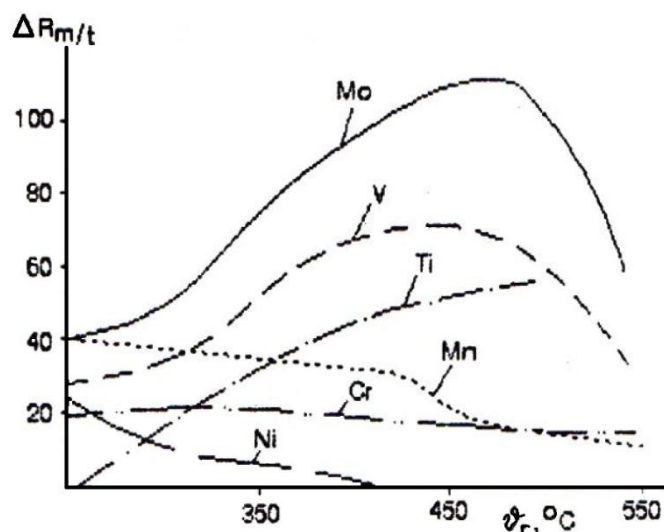
Podaci o statičkoj izdržljivosti i granici puzanja se prilikom dimenzioniranja upotrebljavaju za 100000 sati ili statičkoj izdržljivosti za čak 200000 sati pri radnoj temperaturi. Uz navedena svojstva koja su karakteristična za dugotrajna ispitivanja, otpornost puzanju definira i granica puzanja R_{DVM} prema DVM-u (njem. *Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung*) za definiranu radnu temperaturu. Granicu puzanja prema DVM-u označava vlačno naprezanje koje između 25. i 35. sata ispitivanja pri zadanoj temperaturi izaziva brzinu puzanja od $10 \cdot 10^{-4}$ %/h, a nakon 45. sata djelovanja i rasterećenja trajna deformacija mora biti manja od 0,2 % [1].

Različite legure pokazuju različitu otpornost puzanju pri određenim radnim temperaturama i radnom naprezanju. Također, otpornost puzanju ovisi o temperaturi tališta materijala, tipu atomske veze i kristalne rešetke materijala te mikrostrukturnom stanju materijala. Dodatno se na otpornost prema puzanju može utjecati izborom sastava legiranih elemenata i polaznog mikrostrukturnog stanja. Konkretno, ključni načini za povećanje otpornosti prema puzanju kod metalnih materijala su [1]:

- izbor legura sa što višom temperaturom tališta i rekristalizacije,
- očvrnuće kristalima mješancima, odnosno poželjno je da čelici u kristalu mješancu sadrže legirne elemente koji koče pokretljivost atoma (npr. Mo i Co),
- legiranje elementima koji tvore toplinski stabilne spojeve u obliku karbida, nitrida, karbonitrida, oksida i intermetalnih faza – očvrnuće precipitacijom i disperzijom faza. Tijekom popuštanja ili dozrijevanja događa se izlučivanje precipitata kojima se ostvaruje najveći učinak na povećanje otpornosti puzanju. Čelici se legiraju elementima kroma, molibdena, volframa, vanadija, titana koji tvore teško topive stabilne spojeve izlučene u obliku sitno disperziranih čestica koje otežavaju gibanje dislokacija i na taj način otežavaju puzanje. Na slici 5 prikazan je utjecaj legiranja različitim legirnim elementima na promjenu statičke izdržljivosti pri različitim radnim temperaturama.
- izbor legura s kubičnom plošno centriranom rešetkom (FCC) kod koje je pokretljivost atoma znatno manja u odnosu na pokretljivost atoma kod prostorno centrirane rešetke

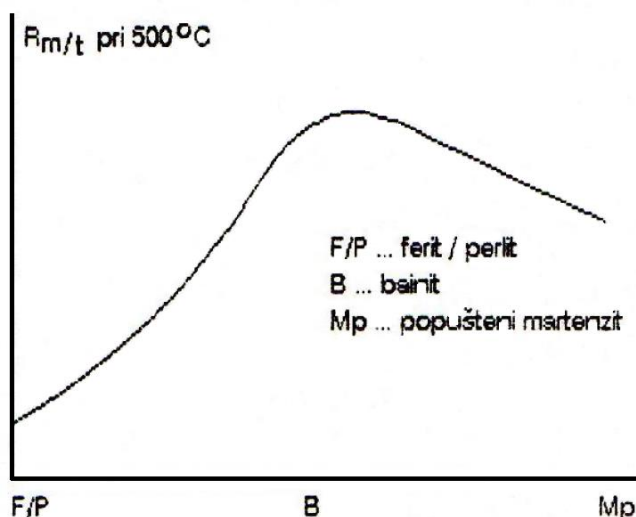
(BCC), pa je austenitna mikrostruktura s gusto složenom FCC rešetkom otpornija na puzanje od feritne mikrostrukture s BCC rešetkom,

- upotreba materijala grubozrnate ili čak monokristalne mikrostrukture.



Slika 5. Utjecaj legiranja na promjenu statičke izdržljivosti pri različitim radnim temperaturama [1]

Optimalnu otpornost na puzanje daje bainitna struktura pri temperaturama oko 500 °C, što je prikazano dijagramom na slici 6.

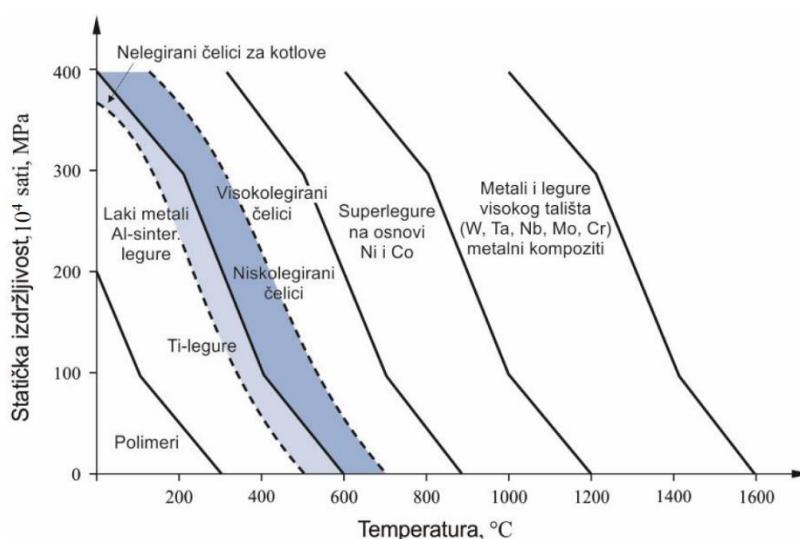


Slika 6. Utjecaj mikrostrukture na statičku izdržljivost pri 500 °C [1]

Temperaturna područja primjene pojedinih skupina materijala prema vrijednosti statičke izdržljivosti nakon 10000 sati prikazana su na slici 7. Općenito, metalni materijali mogu izdržati veća naprezanja pri višim temperaturama u usporedbi s nemetalnim materijalima, npr. s polimerima. Razlog tome je visoka temperatura tališta metala i stabilna mikrostruktura koja ostaje nepromijenjena na visokim temperaturama. Također, za metalne materijale porast

temperature za 100 °C ne utječe zamjetno na promjenu mehaničkih svojstava, dok kod većine polimernih materijala već malo povišenje temperature uzrokuje znatnije puzanje materijala.

Nadalje, aluminijske legure primjenjive su do najviše 200 °C, a u području viših radnih temperatura rabe se materijali na osnovi titana iz razloga što izdržavaju temperature i do 550 °C (α -legure titana). Kada su uvjeti rada na još višim radnim temperaturama primjenjuju se legure na osnovi nikla, odnosno kobalta (tzv. superlegure) koje su zbog vrlo dobre otpornosti na puzanje, kemijske postojanosti i otpornosti na oksidaciju sposobne izdržati temperature do 1000 °C. Najveću otpornost puzanju pokazuju metali i legure visokog tališta na osnovi elemenata: W, Ta, Nb, Mo, Cr [1].



Slika 7. Ovisnost statičke izdržljivosti o temperaturi [1]

2.2. Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama

Razlikuju se četiri osnovne podskupine čelika kada se promatra temperaturno područje [1]:

- ugljični (nelegirani) čelici (za rad pri povišenim temperaturama, $\vartheta_r < 450$ °C),
- niskolegirani čelici (za rad pri visokim temperaturama, $\vartheta_r < 550$ °C),
- visokolegirani martenzitni čelici (za rad pri visokim temperaturama, $\vartheta_r < 600$ °C),
- visokolegirani austenitni čelici (za rad pri visokim temperaturama, $\vartheta_r < 750$ °C).

2.2.1. Ugljični (nelegirani) čelici

Najčešće se kao predstavnik ove skupine čelika uzimaju čelici za kotlovske limove koji se razlikuju od općih konstrukcijskih čelika po tome što se na njih postavljaju posebni zahtjevi. Ti posebni zahtjevi su: dovoljna čvrstoća pri povišenim temperaturama radi djelovanja tlaka, zadovoljavajuća duktilnost (žilavost) kako bi se plastičnom deformacijom razgradila lokalna

koncentracija naprezanja ili moguća preopterećenja, otpornost na dozrijevanje (iz razloga što čelik može biti hladno očvrstnut tijekom oblikovanja deformiranjem), umjerena korozivna otpornost prema vodi, vodenoj pari i lužinama, otpornost na interkristalnu koroziju te vrlo dobra zavarljivost.

Sastavom nelegiranih čelika za kotlovske limove propisan je: nizak % C (< 0,2 %) radi zavarljivosti, > 0,40 (0,55) % Mn radi postojanosti na dozrijevanje, > 0,02 % Al radi dezoksidacije taljevine, < 0,30 % Cr [2]. Kemijski sastav i mehanička svojstva za najčešće korištene čelike za kotlovske limove P235GH i P265GH prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav i mehanička svojstva najčešće korištenih čelika za kotlovske limove [3]

| Oznaka čelika | Kemijski sastav, % | | R_m , N/mm ² | $R_{p0,2}$ min., N/mm ² pri ϑ , °C | | | R_{DVM} , N/mm ² pri ϑ , °C | | |
|---------------|--------------------|----------|---------------------------|---|-----|-----|--|-----|------|
| | C, maks. | Mn, min. | | - | 20 | 200 | 400 | 400 | 450 |
| P235GH | 0,16 | 0,40 | 350 – 450 | 210 | 160 | 100 | 90 | 50 | (30) |
| P2365GH | 0,20 | 0,50 | 410 – 500 | 240 | 180 | 120 | 100 | 60 | (40) |

Konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,2}$) pri sobnoj i povišenim temperaturama uzima se do 400 °C, dok se granica pužanja (R_{DVM}) uzima pri temperaturama od 400 °C do 475 °C. Vrijednost minimalne istezljivosti računa se $9810/R_m$ %.

Kotlovski čelici isporučuju se u obliku toplovaljanih limova ili ploča, a primjenjuju se za izradu oplata parnih kotlova te za cijevi i spremnike većih promjera izloženih okolišnoj temperaturi [2].

2.2.2. Niskolegirani čelici

Prilikom dugotrajnog izlaganja na temperaturama višim od 450 °C kod nelegiranih kotlovskih čelika dolazi do rekristalizacije matrice i koagulacije cementita. Kako bi se spriječile te pojave, niskolegirani čelici za povišene temperature legiraju se karbidotvorcima Mo, Cr i V koji stvaraju kvalitetnije karbide (Cr_7C_3 , Mo_2C , V_4C_3) koji koč gibanje dislokacija i usporavaju pužanje, povećavaju prokaljivost i otpornost na popuštanje. Molibden dodatno povisuje temperaturu rekristalizacije i sprječava pojavu krhkosti popuštanja. Temperaturno područje primjene je do 550 °C jer pri višim temperaturama Mo_2C karbidi postepeno prelaze u Mo_6C te koaguliraju, a metalna matrica osiromašuje na molibden, što snižava temperaturu rekristalizacije [1].

Niskolegirani čelici za rad pri povišenim temperaturama imaju vrlo raširenu primjenu u termoenergetskim postrojenjima, konkretno kod dijelova parnih kotlova (oplate, kotlovske cijevi, cijevi pregrijača, kolektori pare), velikih otkivaka, vijaka, matrica, svornjaka i prirubnica. Mikrostruktura im je feritno-perlitna ako su u normaliziranom stanju, a bainitna u poboljšanom stanju [1]. Najčešće korišteni niskolegirani čelici za rad pri povišenim temperaturama su 15Mo3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10, 22CrMo4-4, 24CrMoV5-5, čija su mehanička svojstva prikazana u tablici 3.

Tablica 3. Mehanička svojstva najčešće korištenih niskolegiranih čelika za rad pri povišenim temperaturama [1]

| Oznaka čelika | Mehanička svojstva | | | | | | | | | | |
|---------------|---|---|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-------------------|---------------|
| | R_m , N/mm ² pri 20 °C | $R_{p0,2}$, N/mm ² , pri ϑ , °C | | | | $R_{p1/10000}$, N/mm ² , pri ϑ , °C | | | | A_5 , % min. | KV, J min. |
| | | 20 | 200 | 400 | 500 | 450 | 500 | 530 | 580 | | |
| C35E | 500 – 650 | 280 | 216 | 147 | - | 59 | 25 | - | - | 21 | - |
| 15Mo3 | 440 – 570 | 260 | 255 | 177 | 147 | 216 | 147 | 85 | - | 23 | 48 |
| 13CrMo4-4 | 440 – 590 | 290 | 275 | 206 | 177 | - | 186 | 78 | - | 18 | 41 |
| 22CrMo4-4 | 640 – 790 | 490 | - | 343 | - | 255 | 172 | 74 | - | 18 | 41 |
| 10CrMoV8-10 | 440 – 590 | 260 | 245 | 206 | 186 | - | 157 | 83 | 47 | 20 | 55 |
| 24CrMoV5-5 | 690 – 830 | 540 | 412 | 304 | 235 | 324 | 206 | 98 | - | 17 | 57 |

2.2.3. Visokolegirani martenzitni čelici

Visokolegirani martenzitni čelici razvijeni su iz martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 koji je postojan na temperaturama do 400 °C i duljim radom na višim temperaturama postaje krhak. Kako bi se povećala mehanička otpornost pri visokim temperaturama i istovremeno zadržala visoka postojanost na opću koroziju navedeni čelici sadrže oko 1 % Mo i do 12 % Cr. Sadržaj kroma ispod 12 % u čvrstoj otopini ukazuje na nepotpunu korozijsku postojanost [1].

Toplinska obrada visokolegiranih martenzitnih čelika sastoji se od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja (poboljšavanja). Gašenjem čelika s temperatura 1020 °C do 1080 °C dobiva se martenzitna mikrostruktura s manje od 5 % ferita koja se popušta pri 550 °C do 750 °C, radi izlučivanja specijalnih karbida popuštanja (Mo_2C , V_4C_3 , Cr_7C_3) i intermetalnih faza (Fe_2Mo , $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ i eventualno $FeCr$). Procesu su to istovremenog popuštanja kaljenog čelika i dozrijevanja precipitacijski očvrstljive legure. Disperzija karbida i precipitata

intermetalnih spojeva otežava gibanje dislokacija što uz otapanje kroma i molibdena u martenzitu (koji povisuju temperaturu rekristalizacije) doprinosi povišenju otpornosti puzanju. Dugotrajno izlaganje temperaturama iznad 620 °C uzrokuje umnožavanje i koagulaciju karbida i intermetalnih spojeva čime se dodatno snižava udio kroma u martenzitnoj matrici i time smanjuje korozivna postojanost, ali i manje učinkovito koči gibanje dislokacija, što pogoduje puzanju [1].

Najčešće korišteni tzv. super 12 % Cr martenzitni toplinski visokopostojani čelici su: X19CrMo12-1, X11CrMoV12-1, X20CrMoV12-1, X19CrMoVNb11-1, X20CrMoWV12-1. Mehanička svojstva ovih čelika prikazana su u tablici 4.

Tablica 4. Mehanička svojstva nekih visokolegiranih martenzitnih čelika [1]

| Oznaka čelika | Popušteno ϑ_p , °C | Mehanička svojstva pri 20 °C | | | | Kratkotrajno vlačno ispitivanje | | | | Dugotrajno vlačno ispitivanje | | |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|----------------------|---------------------|--|-----|-----|-----|--|-----|-----|
| | | R_m , N/mm ² | $R_{p0,2}$, N/mm ² min. | A_5 , % min. | KV , J min. | $R_{p0,2}$, N/mm ² , pri ϑ , °C | | | | $R_{p1/10^4}$, N/mm ² , pri ϑ , °C | | |
| | | | | | | 200 | 400 | 500 | 600 | 500 | 550 | 600 |
| X19CrMo12-1 | 700 – 750 | 700 – 800 | 500 | 16 | 40 | 432 | 353 | 264 | 108 | 245 | 140 | 60 |
| X11CrMoV12-1 | 560 – 620 | 930 – 1130 | 785 | 14 | 48 | 700 | 600 | 500 | 300 | 200 | 85 | 35 |
| X20CrMoV12-1 | 680 – 750 | 700 – 850 | 500 | 16 | 40 | 432 | 353 | 264 | 108 | 245 | 145 | 77 |
| X22CrMoV12-1 | 720 – 750 | 800 – 950 | 600 | 14 | 27 | 530 | 423 | 344 | 206 | 295 | 168 | 80 |
| X19CrMoVNb11- 1 | 550 – 700 | 900 – 1050 | 780 | 10 | 20 | 700 | 580 | 470 | 315 | 360 | 200 | 12 |
| X20CrMoWV12- 1 | 700 – 750 | 800 – 950 | 600 | 14 | 27 | 530 | 423 | 377 | 206 | 260 | 160 | 60 |

Zbog udjela specijalnih karbida molibdena, vanadija i kroma visokolegirani martenzitni čelici su otporni na djelovanje vodika i na sulfidnu napetosnu koroziju (SSC). Visokolegirani

martenzitni čelici moraju biti popušteni na tvrdoću ≤ 24 HRC, što se postiže popuštanjem pri 700 °C [1].

Ovi čelici primjenjuju se za dugotrajni rad pri temperaturama do 600 °C uz blago korozivno djelovanje okolnog medija. Koriste se za sljedeće dijelove: turbinske lopatice parnih turbina, rotore parnih turbina, brodske propelere, kućišta turbina, dijelove izložene visokim temperaturama u okolišu morske vode, pare, slabih organskih kiselina, cijevi pregrijača pare, dijelova uređaja u industriji papira, umjetnih vlakana, celuloze, nafte i plina, itd [1].

2.2.4. Visokolegirani austenitni čelici

Visokolegirani austenitni čelici zbog dodatnog legiranja s molibdenom, volframom, vanadijem, titanom i niobijem izlučuju karbide i intermetalne faze koje im povećavaju mehaničku otpornost pri visokim temperaturama. Iako je čvrstoća austenitnih čelika pri 20 °C niža od martenzitnih čelika, ona porastom temperature sporo pada tako da su ovi čelici primjereni za rad na visokim temperaturama. Austenitni Cr-Ni čelici mogu se dugotrajno primjenjivati pri temperaturama do 750 °C zbog visoke temperature rekristalizacije (900 – 1000 °C) i mehaničke otpornosti, koja je rezultat kubične plošno centrirane (FCC) kristalne strukture (koeficijent difuzije kod FCC rešetke je oko 100 puta manji u odnosu na BCC rešetku pa su austenitni čelici vrlo pogodni za eksploataciju na visokim temperaturama) te dodatnog legiranja s Mo, W, V, Ti i Nb koji omogućuju izlučivanje karbida i precipitaciju toplinski postojanih intermetalnih faza koje dodatno povisuju mehaničku otpornost [1].

Primjenjuju se većinom u rastopno žarenom i gašenom (ne kaljenom!) stanju (skupina I), pri čemu se neki nakon homogenizacije podvrgavaju dozrijevanju na temperaturama 50 °C višim od radnih temperatura (skupina II) i na taj način precipitacijski očvršćuju. Austenitni čelici imaju višu granicu razvlačenja u odnosu na one rastopno žarene i gašene. Višestruko visokolegirani čelici (X50CoCrNi20-20-20, X5NiCrTi26-15, X6NiCrMoTi28-15) dozrijevanjem postižu vrlo veliku čvrstoću. Uz to su neki austenitni čelici prikladni za očvrstnuće kombinacijom postupaka toplo/hladnog valjanja i dozrijevanja (skupina III) [1].

Također, austenitne čelike karakterizira visoka otpornost na puzanje, kao i vrlo dobra kemijska postojanost i vatrootpornost. Zbog brojnih prednosti nalaze primjenu prilikom izrade: dijelova parnih i turbinskih turbina (lopatice, prirubnice, ventili, sapnice, svornjaci), komore izgaranja, plamenika, dijelova uređaja reaktorske tehnike, dijelova u kemijskoj i petrokemijskoj industriji, pogonskih sustava mlaznih motora i raketa [1].

Najčešće korišteni austenitni čelici za rad pri temperaturama 600 – 800 °C su: X6CrNi18-11, X8CrNiMoNb16-16, X40CrNiCoNb13-13, X40CoCrNi20-20-20, X12CrNiWTi16-13, X50CoCrNi20-20-20, X6NiCrMoTi28-15, itd. Njihova mehanička svojstva prikazana su u tablici 5.

Tablica 5. Mehanička svojstva nekih visokolegiranih austenitnih čelika [1]

| Skupina čelika | Oznaka čelika | Mehanička svojstva | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------|---------------------------|---|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|
| | | R_m , N/mm ² | $R_{p0,2}$, N/mm ² , pri ϑ , °C | | | | $R_{p1/10000}$, N/mm ² , pri ϑ , °C | | | | |
| | | | 20 | 400 | 600 | 700 | 550 | 650 | 700 | 750 | 800 |
| I | X6CrNi18-11 | 490 – 690 | 185 | 98 | 78 | 69 | 180 | 80 | 49 | 34 | - |
| | X8CrNiMoNb16-16 | 530 – 690 | 215 | 147 | 132 | - | 324 | 226 | 137 | 83 | 54 |
| II | X40CrNiCoNb13-13 | 640 – 830 | 345 | 245 | 196 | - | - | 186 | 127 | 78 | 49 |
| | X40CoCrNi20-20-20 | 780 – 980 | 390 | 314 | 345 | 206 | 294 | 216 | 147 | 98 | 64 |
| III | X12CrNiWTi16-13 | 640 – 750 | 450 | 420 | 400 | 300 | 335 | 216 | 157 | 103 | 64 |
| IV | X50CoCrNi20-20-20 | min. 980 | 540 | 539 | 500 | 412 | 290 | 175 | 118 | 93 | 74 |
| | X5NiCrTi26-15 | 930 – 1180 | 635 | 520 | 451 | 314 | 451 | 304 | 206 | 118 | 54 |
| | X6NiCrMoTi28-15 | 900 – 1150 | 600 | 520 | 450 | 310 | 450 | 300 | 205 | 120 | 50 |

3. VISOKOLEGIRANI MARTENZITNI ČELICI P91 ZA RAD NA VISOKIM TEMPERATURAMA

Čelici za rad pri visokim temperaturama koriste se za izradu dijelova konstrukcija za termoelektrane. Prije više od 50 godina čelične legure s 2,25 % Cr i 1 % Mo standardizirane su u svim državama i danas se koriste diljem svijeta u termoelektranama visokog kapaciteta s odličnim radnim učinkom. Povećanje radnih parametara (tlak, temperatura) i veličine dijelova zahtijeva razvoj visokočvrstih čelika. U Europi su ranih šezdesetih godina 20. stoljeća razvijena dva čelika s povećanom granicom puzanja za navedenu primjenu: EM12 u Francuskoj i Belgiji te X20CrMoV12-1 u Njemačkoj. EM12 je čelik s 9 % Cr, 2 % Mo, uz dodatak vanadija i niobija, te je korišten samo za izradu cijevi. X20CrMoV12-1 je čelik s 12 % Cr, 1 % Mo i dodatkom vanadija. Koristio se u europskim i mnogim drugim zemljama diljem svijeta za izradu cijevi. Sljedeći korak naprijed bio je razvoj modificiranog čelika s 9 % Cr u SAD-u, koji je također bio popraćen u Europi i Japanu. Nazvan je T/P91 te je prihvaćen diljem svijeta kasnih 80-tih godina prošlog stoljeća. Danas se čelici EM12 i X20CrMoV12-1 često zamjenjuju čelikom T/P91 [4].

Oznaka P91 dodijeljena je američkim standardom (prema ASTM-u), a europska oznaka za ovaj čelik je X10CrMoVNb9-1. Nacionalni i međunarodni standardi određuju vrijednost granice puzanja ili maksimalno dopušteno naprezanje za materijale korištene u kotlovima i cjevovodima. Stvarna primjena u postrojenju regulirana je dodatnim zahtjevima normi. U modernim postrojenjima s fosilnim pogonom čelik P91 dopušta primjenu viših radnih parametara (tlak, temperatura) i samim time pruža veću učinkovitost. Temeljeno na europskim iskustvima P91 može se koristiti unutar parnih kotlova (za pregrijače i međupregrijače) za temperature para iznad 560 °C (maksimalne temperature metala oko 600 °C). Izvan kotlova P91 je postojan na temperaturama pare iznad otprilike 610 °C. U budućnosti bi termoelektrane s konvencionalnim parametrima pare dobivale više fleksibilnosti i smanjili bi se troškovi uporabom T/P91 čelika umjesto T/P22. Upotrebom čelika T/P91 reducirala bi se debljina stijenke te bi se dokazala svojstva puzanja i otpornost na oksidaciju. Prilikom destilacije i nastanka pukotina, kao kod rafinerija, cijevi i ploče od čelika P22 i P5 zamijenjene su onima od čelika P91 zahvaljujući boljim mehaničkim svojstvima na visokim temperaturama i otpornosti nastanku vodikovih pukotina [4].

3.1. Kemijski sastav, fizikalna i mehanička svojstva čelika P91

Iz europske oznake X10CrMoVNb9-1 vidljivo je da su glavni legirni elementi čelika P91 krom, molibden, vanadij i niobij, a točan kemijski sastav, odnosno udio pojedinih elemenata prikazan je u tablici 6.

Tablica 6. Kemijski sastav čelika P91 [4]

| Oznaka čelika | Sadržaj kemijskih elemenata, % | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|
| | C | Mn | Si | Cr | Ni | Mo | V | Nb | N | Al |
| P91 | 0,08 – 0,12 | 0,30 – 0,60 | 0,20 – 0,50 | 8,00 – 9,50 | 0,40 | 0,85 – 1,05 | 0,18 – 0,25 | 0,06 – 0,10 | 0,03 – 0,07 | 0,04 |

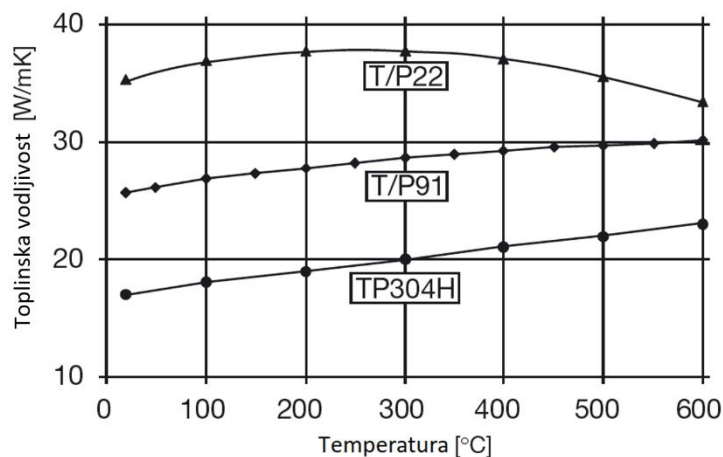
Uz navedene elemente u tablici 6 u jako malom udjelu pojavljuju se sumpor ($< 0,01$ %) i fosfor ($< 0,02$ %). Svaki legirni element dodaje se kako bi se postigla određena svojstva. Tako se dodatkom kroma povisuje toplinska čvrstoća, vatrootpornost (otpornost na visokotemperaturnu koroziju, odnosno stvaranje ogorine) i otpornost na djelovanje komprimiranog vodika. Krom poseban učinak daje na temperaturama iznad 500 °C, kada krom formira tanki sloj kromovih oksida pa se tako usporava unutarnja difuzija kisika i predstojeća reakcija. Dodatkom molibdena povećava se prokaljivost i čvrstoća čelika, dok se pritom sprječava pojava visokotemperaturne krhkosti popuštanja. Molibden je karbidotvorac zbog čega utječe na sitnozrnatost čelika i u kombinaciji s kromom povećava otpornost čelika prema općoj i rupičastoj koroziji. Nadalje, legiranjem s manganom povećava se prokaljivost čelika, a u nekaljenim čelicima poboljšava se čvrstoća i žilavost. Također dodatak mangana može uzrokovati povišenje granice razvlačenja. Mangan je dezoksidator i austenitotvorac pa tako snižava temperature A_{c3} i A_{c1} u odnosu na ugljične čelike. Dodavanje nikla uzrokuje proširenje područja austenita i zbog vrlo slabog afiniteta prema ugljiku nikal ne stvara karbide. Dodatkom nikla kao legirajućeg elementa povisuje se žilavost čelika i postiže korozijska postojanost. Legiranjem s vanadijem može se postići usitnjavanje primarnog austenitnog zrna te je vanadij jaki karbidotvorac i nitridotvorac. Najčešće se dodaje zajedno s niobijem kako bi se postigla stabilizacija čelika postojanih na djelovanje kiselina. Dodavanjem silicija povisuje se čvrstoća i otpornost na trošenje, a posebno granica razvlačenja. Također, silicij je dezoksidator [5].

U tablici 7 prikazana su glavna fizikalna svojstva čelika P91 potrebna za konstruiranje dijelova.

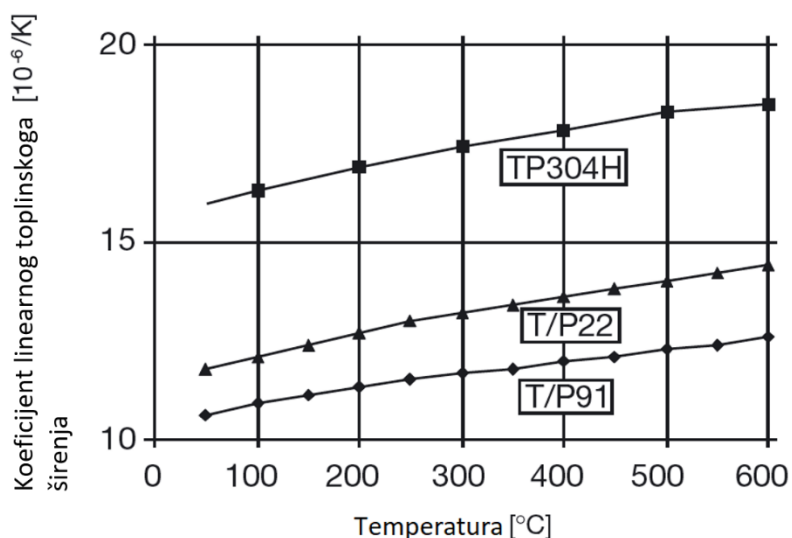
Tablica 7. Glavna fizikalna svojstva čelika P91 [4]

| Temperatura, °C | 20 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 | 650 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| Modul elastičnosti, GPa | 218 | 216 | 213 | 210 | 207 | 203 | 199 | 195 | 190 | 186 | 181 | 175 | 168 | 162 |
| Toplinska vodljivost, W/mK | 26 | 26 | 27 | 27 | 28 | 28 | 28 | 29 | 29 | 29 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Koeficijent linearnog topl. širenja, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | 0,0 | 10,6 | 10,9 | 11,1 | 11,3 | 11,5 | 11,7 | 11,8 | 12 | 12,1 | 12,3 | 12,4 | 12,6 | 12,7 |
| Specifični toplinski kapacitet, J/kg K | 440 | 460 | 480 | 490 | 510 | 530 | 550 | 570 | 600 | 630 | 660 | 710 | 770 | 860 |
| Masa po volumenu, $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ | 7,77 | | | | | | | | | | | | | |

Uspješna primjena čelika P91 usporedno s nehrđajućim čelicima temeljena je na boljoj toplinskoj vodljivosti i manjem koeficijentu linearnog toplinskoga širenja, što je prikazano na slikama 8 i 9.

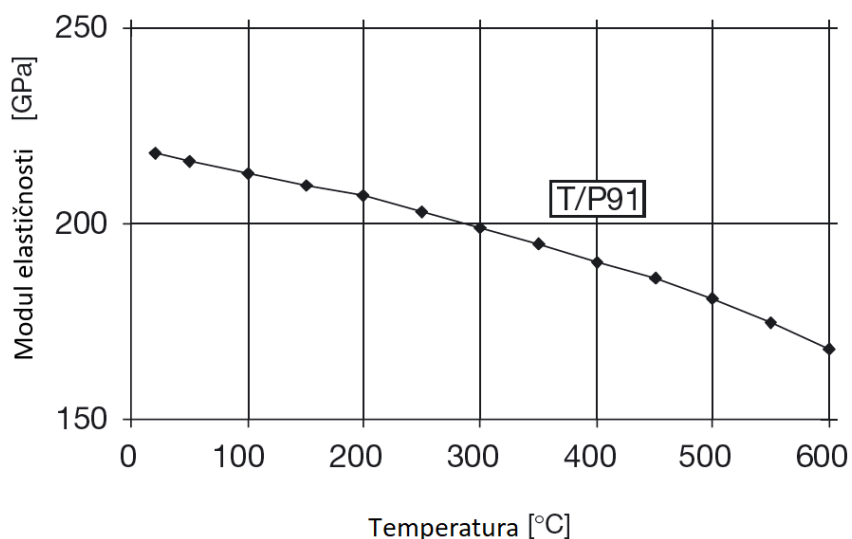


Slika 8. Ovisnost toplinske vodljivosti i temperature [4]



Slika 9. Ovisnost koeficijenta linearnog toplinskoga širenja i temperature [4]

Na slici 10 prikazan je odnos modula elastičnosti čelika P91 i temperature.



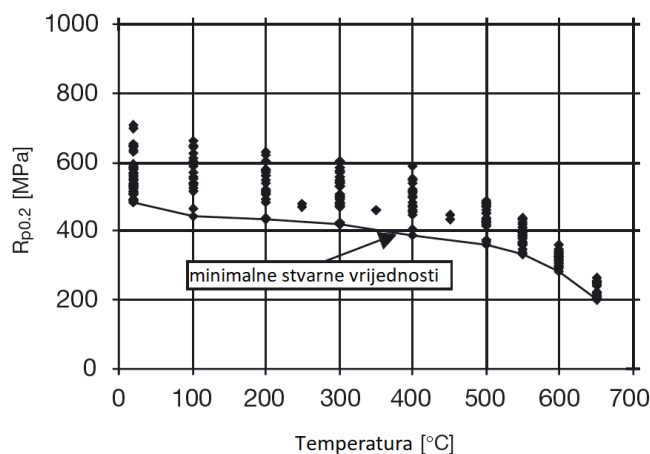
Slika 10. Ovisnost modula elastičnosti i temperature za čelik P91 [4]

Vrijednosti mehaničkih svojstava na sobnoj temperaturi sumirane su u tablici 8.

Tablica 8. Mehanička svojstva čelika P91 [6]

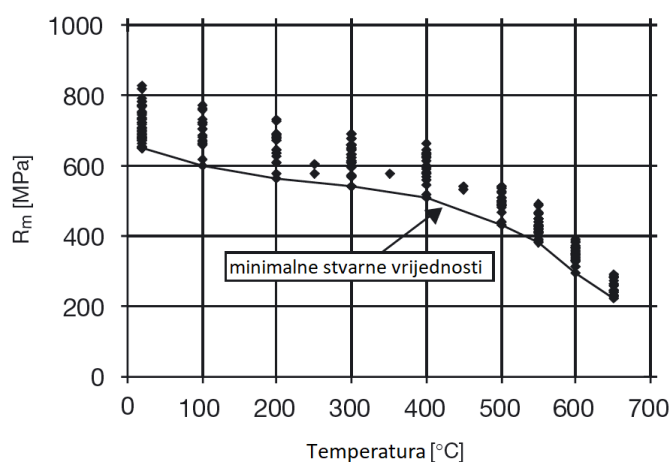
| Oznaka čelika | R_m , N/mm ² | $R_{p0,2}$, N/mm ² min. | A_5 , % min. | KV , J min. |
|---------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------|---------------|
| P91 | 620 | 450 | 19 | 190 |

Vlačna svojstva čelika P91 određena su za temperature od 20 °C do 650 °C. Na slici 11 prikazana je konvencionalna granica razvlačenja za trajnu deformaciju 0,2 % za čelik P91 u odnosu na temperaturu.



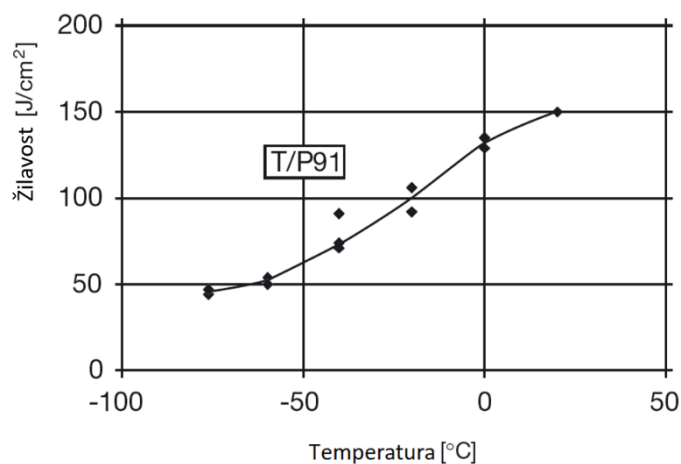
Slika 11. Vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja za trajnu deformaciju od 0,2 % za čelik P91 u odnosu na temperaturu [4]

Na slici 12 prikazan je odnos vlačne čvrstoće za čelik P91 u odnosu na povišenje temperature.



Slika 12. Vrijednosti vlačne čvrstoće za čelik P91 u odnosu na povišenje temperature [4]

Dodatno uz vlačno ispitivanje provodi se ispitivanje udarnog rada loma materijala, što je mjera za žilavost materijala. Na slici 13 prikazan je tipičan primjer ispitivanja udarnog loma na čeliku P91 u odnosu na promjenu temperature.



Slika 13. Vrijednosti žilavosti u odnosu na promjenu temperature [4]

Kao rezultat dinamičke promjene temperature kod zavarivanja, u metalu zavara i u okolini zone utjecaja topline, javlja se lokalno otvrdnjavanje pa je ta tvrđa područja potrebno reducirati toplinskom obradom unutar određenog temperaturnog intervala.

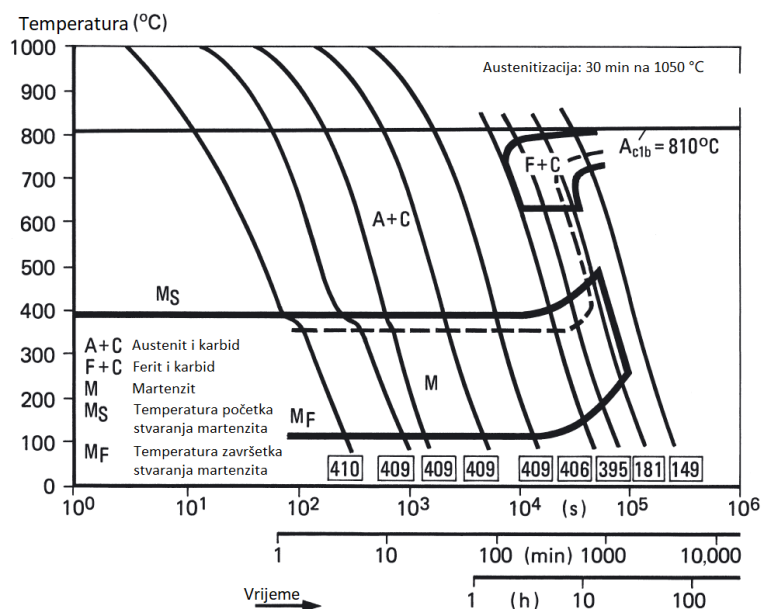
3.2. Ponašanje tijekom transformacije čelika P91

Transformacijske temperature se determiniraju diferencijalnom dilatometrijskom analizom. Ovisno o kemijskom sastavu utvrđeno je da je temperatura A_{c1} između 800 °C i 830 °C. Temperatura A_{c3} je vrijednosti između 890 °C i 940 °C.

Čelik P91 koristi se u normaliziranom i popuštenom stanju. Struktura čelika P91 se prilikom hlađenja s temperature austenitizacije na sobnu temperaturu transformira preko širokog područja stope hlađenja, potpuno u martenzitno područje. Maksimalna tvrdoća martenzita je manja od 450 HV. Martenzitna mikrostruktura je općenito najpovoljnija i postiže se martenzitnom transformacijom zavara hlađenjem ispod temperature M_f .

M_s temperatura (temperatura početka stvaranja martenzita) je prilično visoka, oko 400 °C. M_f temperatura (temperatura završetka stvaranja martenzita) leži iznad 100 °C varirajući s prethodnom veličinom zrna austenita [4].

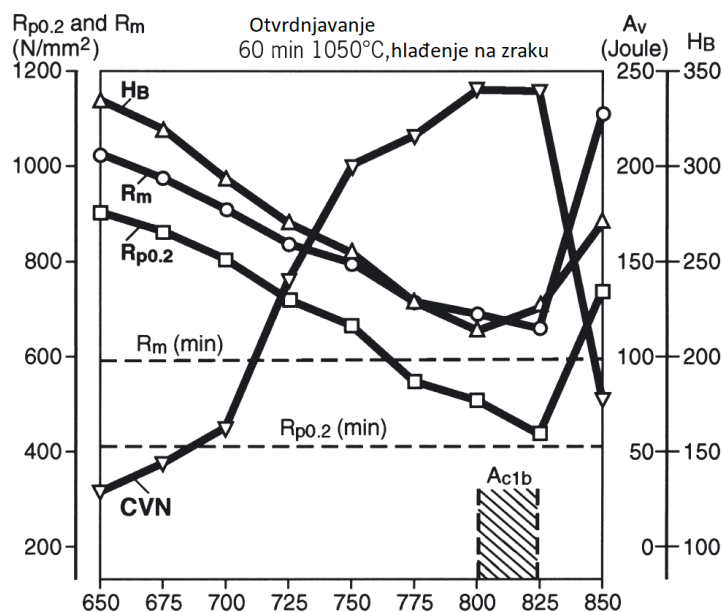
Na slici 14 prikazan je dijagram CCT (dijagram kontinuiranog hlađenja) za čelik P91.



Slika 14. CCT dijagram za čelik P91 [4]

Toplinska obrada kojom se postižu optimalni kompromisi između visoke granice puzanja, ograničene tvrdoće i dobre žilavosti, utemeljena je dugogodišnjim iskustvom. Provodi se normalizacija na temperaturama između 1040 °C i 1080 °C, što omogućuje otapanje većine

karbida bez značajnog rasta zrna. Popuštanje na temperaturi od 750 °C do 780 °C omogućuje karbidima homogenu precipitaciju unutar martenzitne strukture, pridonoseći tako poboljšanju ponašanja prilikom puzanja. Na slici 15 prikazan je utjecaj popuštanja na različitim temperaturama između 650 °C i 850 °C za 1 sat s mehaničkim svojstvima razreda čelika 91: R_m (vlačna čvrstoća), $R_{p0,2}$ (konvencionalna granica razvlačenja za trajnu deformaciju 0,2 %), HB (tvrdoća po Brinellu) i CVN (eng. *Charpy V-Notch test*; žilavost) [4].



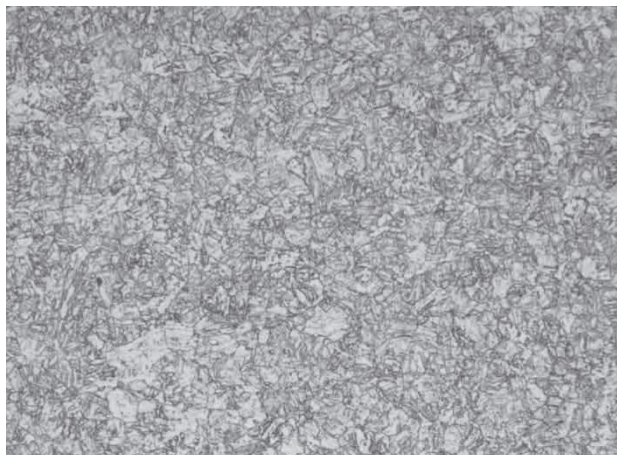
Slika 15. Utjecaj popuštanja na mehanička svojstva čelika P91 [4]

Također, na slici 15 prikazano je smanjenje konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2}$), vlačne čvrstoće (R_m) i tvrdoće, te povećanje žilavosti s povećanjem temperature popuštanja iznad temperature A_{c1} . Iznad temperature A_{c1} svojstva čvrstoće se povećavaju i žilavost se smanjuje uslijed formiranja novog martenzita. Popuštanje iznad temperature A_{c1} (800 °C) rezultira lošijim svojstvima puzanja [4].

3.3. Mikrostruktura čelika P91

Specificirana toplinska obrada uzrokuje strukturu popuštenog martenzita s precipitacijom karbida $M_{23}C_6$ i vanadijem/niobijem obogaćenim karbonitridima tipa MX (M = V ili Nb; X = C ili N). Prisutnost ovih precipitata poboljšava granicu puzanja precipitacijskim očvrnućem. Dodatno, karbidi $M_{23}C_6$ uglavnom stabiliziraju martenzitnu strukturu [4]. Na slici 16 prikazana je karakteristična mikrostruktura čelika P91 nakon normalizacije i popuštanja.

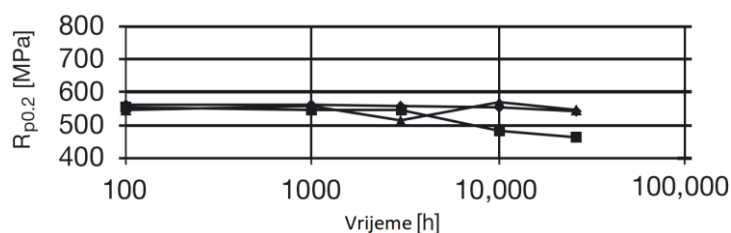
Općenito je ugljik odgovoran za martenzitnu strukturu i formiranje karbida, a visoki udio kroma doprinosi otpornosti prema oksidaciji.



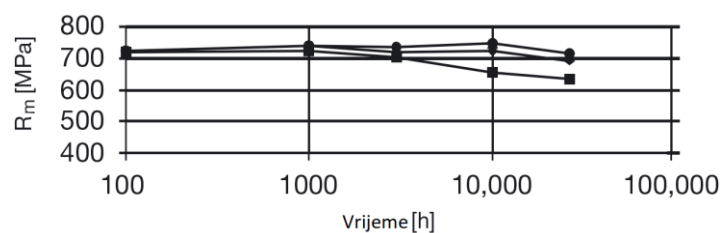
Slika 16. Karakteristična mikrostruktura čelika P91 nakon normalizacije i popuštanja [4]

3.4. Svojstva nakon dozrijevanja čelika P91

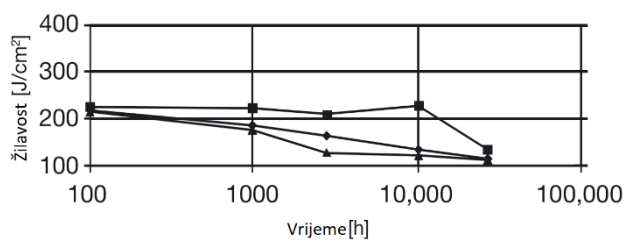
Mehanička svojstva se određuju nakon umjetnog dozrijevanja. Umjetno dozrijevanje koristi se kako bi se predvidjelo ponašanje materijala u realnim uvjetima. Primjerci su izloženi dozrijevanju na temperaturama 500 °C, 600 °C i 650 °C od 100 sati pa do otprilike 30000 sati [4]. Rezultati u kontekstu konvencionalne granice razvlačenja, vlačne čvrstoće, istezljivosti i žilavosti prikazani su na slikama 17, 18, 19 i 20.



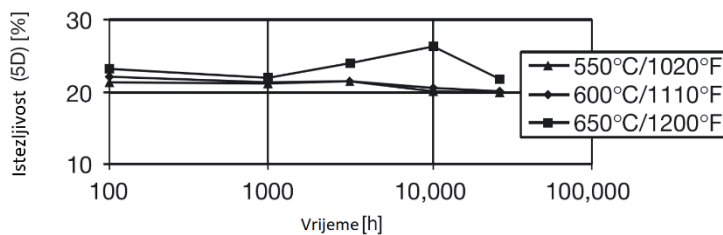
Slika 17. Konvencionalna granica razvlačenja za čelik P91 nakon dozrijevanja [4]



Slika 18. Vlačna čvrstoća čelika P91 nakon dozrijevanja [4]



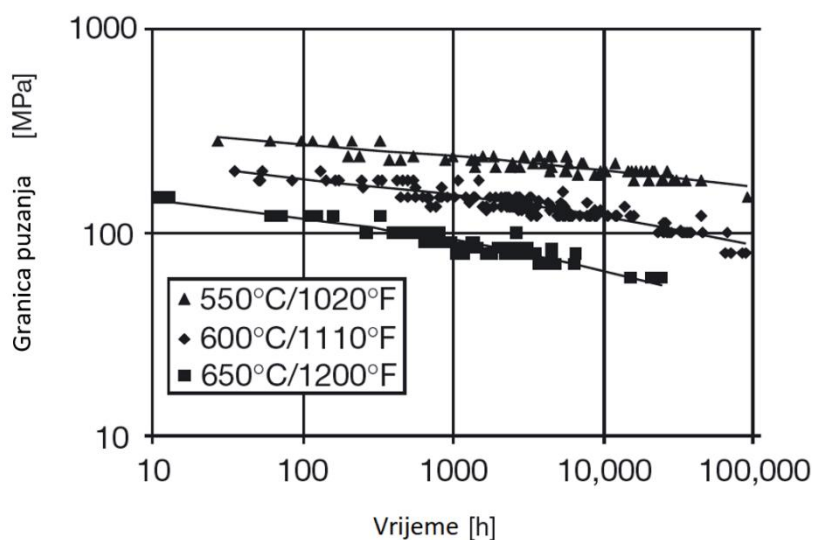
Slika 19. Žilavost čelika P91 nakon dozrijevanja [4]



Slika 20. Istezljivost čelika P91 nakon dozrijevanja [4]

3.5. Svojtvo puzanja

Budući da se čelik P91 koristi za rad pri povišenim temperaturama, potrebno je ispitati njegovo ponašanje u takvim ekstremnim uvjetima. Testovi puzanja provode se na cijevima od čelika P91 tretiranih na različitim temperaturama i naprežanjima [4]. Na slici 21 prikazana je granica puzanja čelika P91 na različitim temperaturama (550 °C, 600 °C i 650 °C).



Slika 21. Rezultati testa puzanja za čelik P91 na tri različite temperature [4]

4. ZAVARIVANJE ČELIKA P91

Prvi program kojim se provodilo istraživanje zavarljivosti modificiranih čelika P91 započet je 1978. godine od strane ORNL-a (eng. *Oak Ridge National Laboratory*), a kasnije je istraživanje nastavilo puno skupina u SAD-u, Europi i Japanu. U međuvremenu je P91 zavaren uspješno svim uobičajenim postupcima zavarivanja, kao što su TIG, REL i EPP, pokrivajući pritom širok raspon debljina stijenki. Međutim, čelik P91 je skuplji materijal koji predstavlja neke izazove prilikom proizvodnje zahtijevajući pritom odabir prikladnog dodatnog materijala s malim udjelom vodika te pažljivu toplinsku obradu prije, tijekom i nakon zavarivanja.

4.1. Odabir dodatnog materijala za zavarivanje čelika P91

Za zavarivanje čelika iz serije 91 nekoliko proizvođača dodatnog materijala započelo je s razvijanjem optimalnih žica, elektroda i praškom punjenih žica. Nisu sve tvrtke išle istim putem optimizacije, što se osobito odnosi na kemijski sastav i dobivena mehanička svojstva nakon prestanka djelovanja naprezanja. Osim zahtijevane čvrstoće na sobnoj temperaturi, metal zavara mora zadovoljiti određen zahtjev za žilavost i zahtijevanu čvrstoću na radnoj temperaturi (granicu puzanja) [4].

Od početka razvoja bilo je jasno da nije moguće postići minimalne zahtjeve, npr. granice puzanja, koristeći isti raspon sastava osnovnog materijala. Zato je bilo potrebno istražiti utjecaj pojedinog elementa i njihove interakcije, pogotovo uvažavajući žilavost, a i druga svojstva. Najviše je potrebno bilo optimizirati sadržaj dušika, nikla, mangana i niobija. Formirajući karbonitride, dušik ima važan utjecaj na granicu puzanja. Također povećava granicu tečenja i vlačnu čvrstoću, ali snižava duktilnost i žilavost. Mangan i nikal imaju manji utjecaj na svojstva čvrstoće. Međutim, utvrđeno je da sadržaj nikla i mangana u pristupu gornjim granicama specifikacija osnovnog materijala može znatno poboljšati žilavost. Ograničenja su dana utjecajem na temperaturu A_{c1} . Suma udjela nikla i mangana bi trebala biti ograničena do 1,5 %, a udio dušika oko 0,04 %. Niobij također ima negativan utjecaj na žilavost. Međutim, zbog njegovog dobrog utjecaja na granicu puzanja udio niobija može jedino biti smanjen do 0,04 %, što je donja granica navedena za osnovni materijal [4].

Nisu svi proizvođači dodatnog materijala za zavarivanje uzeli u obzir u svojim specifikacijama gore navedene odnose. U tablici 9 prikazan je tipičan sastav metala zavara nakon korištenja različitih dodatnih materijala i različitih postupaka zavarivanja.

Tablica 9. Tipične vrijednosti kemijskog udjela pojedinih elemenata u metalu zavara [4]

| Postupak | Sadržaj kemijskih elemenata, % | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | Nb | V | N |
| TIG žica | 0,10 | 0,20 | 0,50 | 9,0 | 1,0 | 0,8 | 0,05 | 0,20 | 0,04 |
| Prevučene elektrode | 0,09 | 0,20 | 0,65 | 9,0 | 1,10 | 0,8 | 0,05 | 0,20 | 0,04 |
| EPP: Žica | 0,11 | 0,30 | 0,50 | 9,0 | 1,0 | 0,8 | 0,06 | 0,20 | 0,04 |
| Metal zavara | 0,11 | 0,30 | 0,50 | 8,5 | 0,95 | 0,75 | 0,05 | 0,20 | 0,04 |

Prilikom zavarivanja čelika P91 koriste se dva osnovna tipa dodatnog materijala [7]:

- približno istog kemijskog sastava kao i osnovni materijal kako bi se dobila martenzitna struktura nakon zavarivanja,
- austenitni (AISI 300) tipovi ili Inconel metal s udjelom kroma i nikla za potreban omjer miješanja (kao rezultat spajanja s osnovnim materijalom), odabranog s ciljem da konačni depozit osigura prihvatljivu količinu austenita koji povećava žilavost i istežljivost zavara.

Primjenom austenitnog dodatnog materijala smanjuje se količina difundiranog vodika čime se smanjuje vjerojatnost pojave hladnih pukotina. Zona taljenja se ne zakaljuje i zadržava visoku žilavost. Elektrode ovog tipa upotrebljavaju se kada se ne vrši naknadna toplinska obrada. Unatoč tome, zona utjecaja topline (2 – 3 mm) se ipak zakaljuje na zraku, čemu se može doskočiti samopopuštanjem martenzitne strukture boravkom na visokoj radnoj temperaturi prilikom eksploatacije.

U slučaju korištenja dodatnog materijala istog kemijskog sastava kao i osnovni materijal zona taljenja može se naknadno podvrgnuti toplinskoj obradi. Zona taljenja ima isti koeficijent toplinske istežljivosti kao i osnovni materijal što je u nekim slučajevima povoljnije (npr. prilikom navarivanja radnih površina izloženih naglim temperaturnim promjenama) iz razloga što neće uzrokovati termička naprezanja pri zagrijavanju i hlađenju [7].

Kao što je naglašeno, izvedba zavara od čelika P91 ovisi o pravilnom kemijskom sastavu metala zavara pa je potrebno prilikom nabave pažljivo birati dodatni materijal. Također, važan je kontrolirani unos vodika u zavareni spoj kako bi se izbjegle pukotine uzrokovane vodikom pa je bitno birati dodatni materijal s niskim udjelom vodika za upotrebu s čelikom P91. Listovi s podacima za sve krom-molibdene dodatne materijale trebali bi pružiti tipičnu oznaku X-faktora (također naziva *Bruscato factor*) za proizvod [8]. Ova oznaka mjeri otpornost zavara na krhkost

popuštanja prilikom dugotrajne izloženosti zavara visokim temperaturama. Broj se izračunava iz četiri ključna elementa u čeliku koja ga onečišćuju: fosfora, antimona, kositra i arsena. Navedeni elementi migriraju granicama zrna kroz vrijeme prilikom izloženosti visokim temperaturama, uzrokujući pritom smanjenje žilavosti, a ta pojava se naziva krhkost popuštanja [9]. Formula za izračunavanje X-faktora je sljedeća [8]:

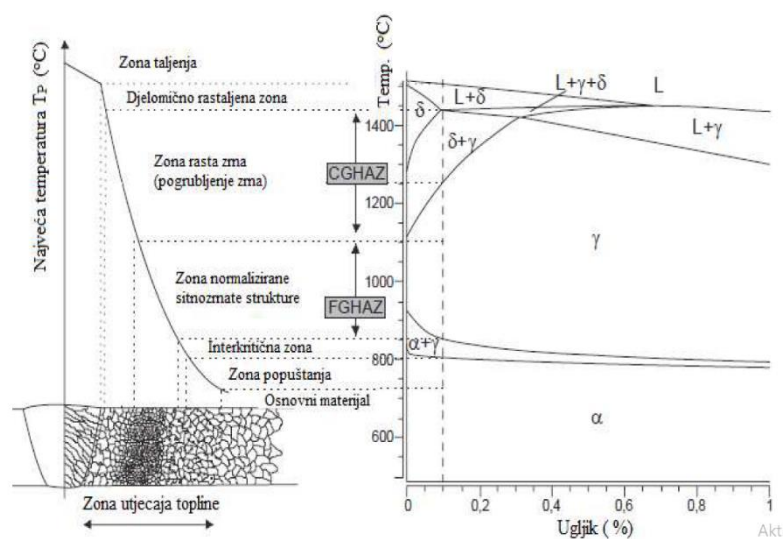
$$X = (10P + 5Sb + 4Sn + As)/100$$

Niža vrijednost X-faktora predstavlja manji udio navedenih elemenata i veću otpornost na krhkost popuštanja. Mnogi korisnici zahtijevaju npr. elektrode E8018-B2 ili E9018-B3 s X-faktorom manjim od 15 PPM (eng. *parts per million*) prilikom korištenja dodatnog materijala u posudama pod tlakom i petrokemijskoj industriji [9]. Osobito je važno znati X-faktor dodatnog materijala kada se zavaruju čelici poput čelika P91 i odabrati dodatni materijal sa X-faktorom ispod 15.

4.2. Utjecaj zavarivanja na strukturne transformacije u zoni utjecaja topline

Tijekom zavarivanja dovedena toplina se širi od zone taljenja u osnovni materijal tako da se oko zavara formira temperaturno polje. Zavareni se spoj tako može podijeliti na tri područja prema utjecaju topline: zonu taljenja (ZT), zonu utjecaja topline (ZUT) i osnovni materijal (OM). U zoni taljenja za vrijeme zavarivanja metal je rastaljen te je došlo do pojave kristalizacije i skrućivanja.

Na slici 22 prikazane su tipične promjene u strukturi kod zavarivanja visokolegiranog martenzitnog čelika P91 uz fazni dijagram.



Slika 22. Tipične promjene u strukturi kod zavarivanja čelika P91 [10]

Zona utjecaja topline predstavlja područje osnovnog materijala u kojem nije došlo do taljenja osnovnog materijala tijekom zavarivanja, ali je došlo do promjene u strukturi, a time i do promjene mehaničkih svojstava. Osnovni materijal predstavlja dio spoja u kojem se nisu dogodile niti promjene u strukturi, a time ni promjene mehaničkih svojstava. U zoni utjecaja topline dolazi do promjene usmjerenosti i veličina zrna, što najviše utječe na mehanička svojstva zavarenog spoja.

Zona taljenja može se sastojati od samo osnovnog materijala ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala. Obuhvaća dio zavarenog spoja koji je pri zavarivanju bio potpuno rastaljen (iznad likvidus linije). U kapljicama rastaljenog metala i talini zavara dolazi do sličnih pojava kao prilikom proizvodnje, odnosno taljenja metala u pećima. Javlja se međusobno djelovanje rastaljenog metala, troske i okolne atmosfere. Djelovanjem izvora topline dolazi do taljenja pojedinih elemenata kao što su C, Mn, Si, Cr, Ni, Ti i drugih elemenata. Zbog utjecaja atmosfere oko rastaljenog metala i sastava rastaljenog metala dolazi, u većoj ili manjoj mjeri, do stvaranja oksida, nitrida, karbida, karbonitrida, sulfida, eutektika, intermetalnih spojeva i drugih faza. Talina zavara može se sastojati samo od osnovnog materijala ako se ne koristi dodatni materijal, ili najčešće od mješavina dodatnog i osnovnog materijala jer prilikom zavarivanja dolazi do taljenja rubova osnovnog materijala koji se zavaruje. Daljnjim hlađenjem u zoni taljenja, ovisno o vrsti metala, može doći do strukturnih promjena, izlučivanja različitih faza i pojave grešaka (pore, pukotine). U zoni taljenja prilikom zavarivanja u više prolaza pojavit će se pojedine zone utjecaja topline oko svakog prolaza [11].

Djelomično rastaljena zona označava dvofazno područje (talina i krutina) bogato legirajućim elementima, nečistoćama i plinovima. Navedena zona nalazi se između likvidus i solidus linije te predstavlja vezu između osnovnog materijala i metala zavara. Lokalno povišen udio nečistoća kod brzog hlađenja nakon zavarivanja ne može se difuzijom izjednačiti s okolinom pa u strukturi često ostaje mreža otvrdnutih segregiranih nečistoća. Također, kod tako visokih temperatura dolazi i do taljenja ostalih nemetalnih faza (sulfidi, fosfidi i oksidi) čime dolazi do slabljenja metalnih veza u materijalu, a posljedica toga je pojava toplih pukotina [10].

Zona rasta zrna nalazi se ispod solidus linije, a značajno iznad temperature A_{c3} (1100 – 1450 °C). Svi karbidi koji predstavljaju glavnu prepreku u rastu austenitnih zrna se otapaju, a kao posljedica nastaju krupna zrna austenita. Konkretno, kod 9 – 12 % Cr čelika, pa time i kod čelika P91, ovako dobiveni austenit se pri hlađenju pretvara u martenzit. Zona rasta zrna ima najveću tvrdoću, a vrijednosti žilavosti su niske [10].

Zona normalizirane sitnozrnate strukture nalazi se oko temperature A_{c3} , neznatno iznad. Vršna temperatura nije dovoljno visoka da bi se potpuno otopili karbidi i time se ograničava rast austenitnih zrna. Stvara se sitnozrnati austenit koji se kasnije pretvara u martenzit. Ova zona ima najmanju otpornost na puzanje i smatra se najslabijom zonom zavarenog spoja koji je izložen radu na visokim temperaturama [10].

Interkritična zona (djelomična prekrystalizacija) nalazi se u području između temperatura A_{c1} i A_{c3} . Unutar ove zone dolazi do djelomične pretvorbe ferita u austenit. Novi austenit nastaje na granicama prethodnih austenitnih zrna i na granicama martenzitnih lamela. Prilikom hlađenja austenit se pretvara u nepopušteni martenzit, a ostatak mikrostrukture je popušten. Ovu zonu karakterizira mala veličina zrna pa se tako kao posljedica javljaju najniže vrijednosti tvrdoće.

Zona popuštanja nalazi se u temperaturnom području ispod A_{c1} pa je prvobitna mikrostruktura materijala izložena daljnjem popuštanjem. Iako mikrostruktura ne prolazi nikakvu faznu transformaciju, moguće je lokalno kaljenje na visokim temperaturama u odnosu na osnovni materijal. Također, postoji podobnost okrupnjivanju precipitata zbog većeg koeficijenta difuzije na ovim temperaturama.

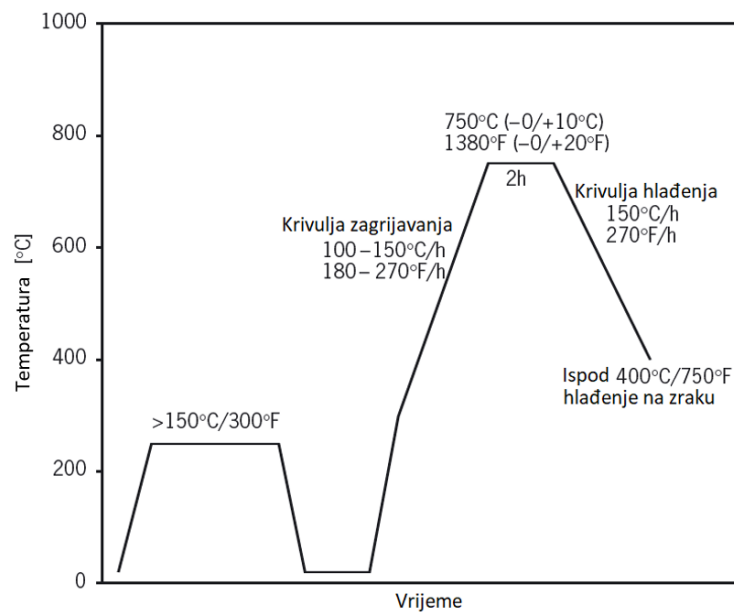
Zona nepromijenjenog osnovnog materijala odnosi se na temperature do približno 700 °C i označava zonu gdje nema vidljivih promjena u mikrostrukturi ni promjena mehaničkih svojstava materijala [10].

4.3. Toplinska obrada čelika P91

Postupci zavarivanja koji se primjenjuju za čelik P91 tipični su za martenzitne 9 – 12 % Cr čelike, što je razlog zašto je tehnologiju zavarivanja od npr. čelika X20 moguće prenijeti na čelik P91. Zapravo, zavarljivost je nešto bolja zbog nižeg udjela ugljika čime je smanjena tvrdoća te se kao posljedica smanjenja javlja osjetljivost na hladne pukotine i pukotine uzrokovane napetosnom korozijom [4].

Općenito su postupci toplinske obrade neophodni kako bi se dobio kvalitetan zavareni spoj čelika P91. Toplinskom obradom osigurava se odgovarajuća žilavost, dobra otpornost na puzanje i smanjuje se vjerojatnost pojave pukotina. Ciklus toplinske obrade sastoji se od predgrijavanja, održavanja međuprolazne temperature i naknadne toplinske obrade.

Na slici 23 prikazan je karakterističan ciklus toplinske obrade čelika P91 prije, tijekom i nakon zavarivanja.



Slika 23. Karakterističan ciklus toplinske obrade čelika P91 prije, tijekom i nakon zavarivanja [4]

4.3.1. Predgrijavanje

Postupak predgrijavanja obuhvaća zagrijavanje materijala iznad temperature okoline, na propisanu temperaturu, i odvija se prije početka zavarivanja. Predgrijavanjem se želi usporiti prebrzo odvođenje topline s materijala te samim time spriječiti neželjeno otvrdnjavanje u području zone utjecaja topline i pojavu zaostalih naprezanja koja mogu dovesti do pojave pukotina. Samim postupkom zavarivanja unosi se dodatno toplina pa se promatra rezultat unosa topline nakon predgrijavanja i zavarivanja. Postupkom predgrijavanja neposredno prije zavarivanja postiže se smanjenje brzine hlađenja zavarenog spoja i smanjenje zakaljivosti zavarenog spoja (čime se smanjuje vjerojatnost nastanka hladnih pukotina). Također, predgrijavanjem se pospješuje odstranjivanje površinske vlage u području žlijeba za zavarivanje i povisuje se temperatura materijala u temperaturno područje u kojem je dozvoljeno zavarivanje [7]. Predgrijavanje i zavarivanje odvija se na temperaturama oko 250 °C [4]. Postavka prilikom predgrijavanja cijevi od čelika P91 prikazana je na slici 24, a na slici 25 je prikazano zavarivanje cijevi od čelika P91. Predgrijavanje se odvija na cijelom radnom komadu ili lokalno na uskoj zoni oko pripremljenog žlijeba.

Općenito, predgrijavanje i održavanje međuprolazne temperature nemaju svrhu izbjeći martenzitnu strukturu nakon zavarivanja, već smanjuju nepovoljni učinak temperaturnih naprezanja prilikom stezanja. Smanjenje temperaturne razlike između zavara i osnovnog materijala te smanjenje granice razvlačenja pospješuju smanjenje zaostalih naprezanja. Prilikom povećanja temperature povisuje se istezljivost i žilavost, što je povoljna pojava.

Također, povišenje temperature predgrijavanja omogućava izlazak difuzijskog vodika iz zavara [7].



Slika 24. Postavka prilikom predgrijavanja cijevi od čelika [12]



Slika 25. Zavarivanje cijevi od čelika P91 [12]

4.3.2. Održavanje međuprolazne temperature

Parametri mogu biti neznatno promijenjeni ovisno o komponenti koja se zavaruje. Temperature prilikom zavarivanja dijelova s malim unutarnjim naprezanjima, kao što je sučeljeni spoj cijevi, mogu biti ispod 200 °C ovisno o debljini stijenke cijevi. Iznad debljine stijenke od 80 mm cijevi mogu biti hlađene do sobne temperature. Suprotno, zavarivanjem teških debelih otkivaka ili odljevaka ne smije se postići temperatura ispod 200 °C i hlađenje nakon zavarivanja ograničeno je na temperaturu od 80 °C kako bi se izbjegla pojava pukotina. Kako bi se postigla visoka žilavost u metalu zavara preporučeno je koristiti tehniku zavarivanja s višestrukim prolazima [4].

Temperatura između prolaza zapravo označava temperaturu predgrijavanja za svaki sljedeći prolaz prilikom zavarivanja. Međuprolazna temperatura utječe na mehanička svojstva zavara pa je poželjno održavati ju unutar predviđenih granica. Iz perspektive troškova i kvalitete bilo bi idealno održavati međuprolaznu temperaturu jednaku temperaturi predgrijavanja. No, to u

praksi nije ostvarivo pa se obično temperatura predgrijavanja propisuje u granicama od minimalne temperature predgrijavanja do neke prihvatljive vrijednosti [7].

Obično se za međuprolaznu temperaturu kod zavarivanja martenzitnog čelika P91 preporuča temperatura oko 300 °C (i niže vrijednosti) [13]. Stroga kontrola međuprolazne temperature omogućuje izbjegavanje toplih pukotina koje mogu povećati količine niobija i silicija u metalu zavara. Nakon zavarivanja bitno je hladiti predmet na temperaturu ispod 100 °C kako bi se omogućila potpuna transformacija u martenzit [4].

4.3.3. Naknadna toplinska obrada

Nakon zavarivanja provodi se zagrijavanje (PWHT) uobičajeno na temperaturi između 750 °C i 760 °C kako bi se postigla struktura popuštenog martenzita i reducirala zaostala naprezanja uzrokovana zavarivanjem. Martenzitna mikrostruktura je krhka pa je potrebno primijeniti odgovarajuću toplinsku obradu kako bi se postigla zahtijevana žilavost zavarenog spoja i produžio radni vijek komponente. Također, bitno je održavati temperaturu toplinske obrade ispod linije A_{c1} kako ne bi došlo do promjena koje nepovoljno utječu na otpornost materijala na puzanje. Adekvatnom naknadnom toplinskom obradom moguće je postići vrijednosti tvrdoće do 300 HB (optimalne vrijednosti 200 – 275 HB) i poštivanjem zadanih parametara smanjuje se rizik od pojave pukotina uzrokovanih napetosnom korozijom [13], [14].

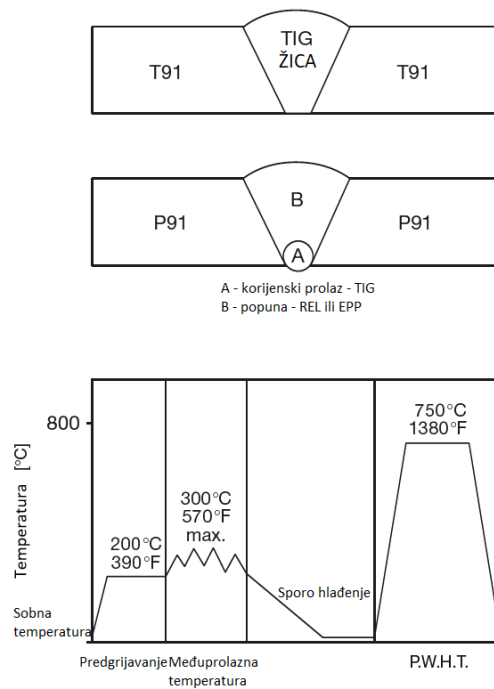
Karakteristične krivulje zagrijavanja i hlađenja prikazane su prethodno na slici 23. U slučaju skladištenja predmeta nakon zavarivanja i prije primjene PWHT maksimalno vrijeme trebalo bi biti jedan tjedan i tijekom tog vremena komponente moraju ostati suhe [4].

4.4. Postupci zavarivanja čelika P91

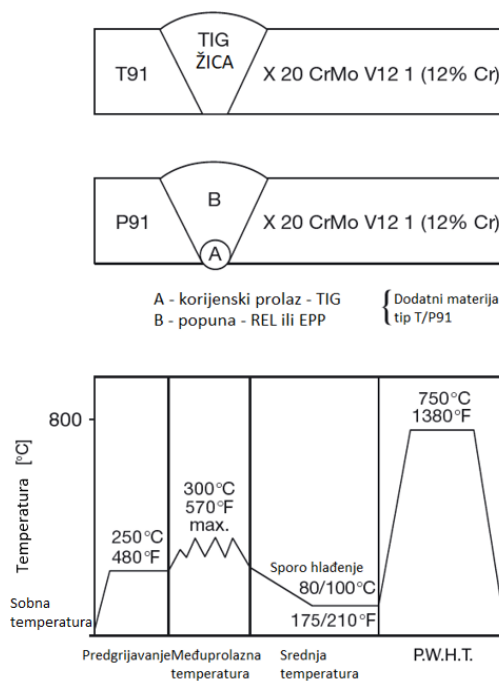
Najčešći postupci zavarivanja koji se koriste za zavarivanje čelika P91 su: REL, TIG, MIG i EPP, od čega su u nastavku detaljnije opisani postupci REL i TIG. Ručno elektrolučno zavarivanje (REL) s obloženom elektrodom najstariji je elektrolučni postupak zavarivanja i jedan je od najznačajnijih postupaka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija. Izrazitu primjenjivost pokazuje kao tehnološko rješenje prilikom izvođenja kraćih zavara, u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji, reparaturnom zavarivanju, zavarivanju u otežanim uvjetima rada, itd [15]. S druge strane, TIG postupak zavarivanja označava elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (Ar, He, smjese plinova). Predstavlja značajan postupak primjenjiv na širokom spektru materijala

(čelici, plemeniti čelici, teški i laki obojeni metali, itd.) u ručnoj, polu-automatiziranoj ili automatiziranoj primjeni [16].

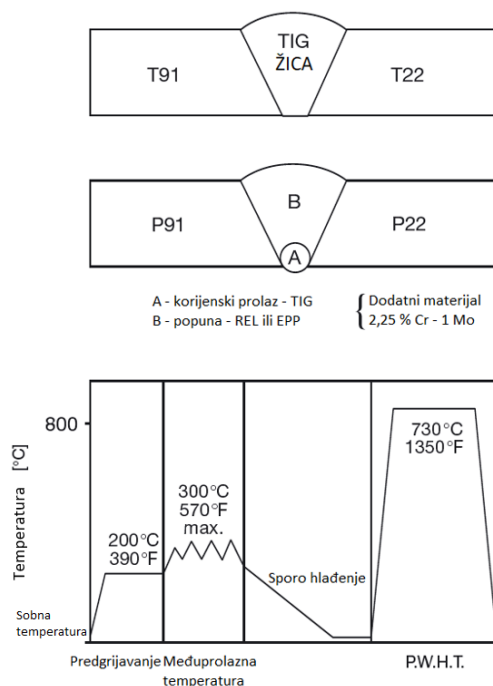
Primjeri postupaka karakterističnih za zavare od čelika P91 prikazani su na slikama 26, 27 i 28.



Slika 26. Zavarivanje čelika T/P91 sa čelikom T/P91 [4]



Slika 27. Zavarivanje čelika T/P91 s 12 % Cr materijalima [4]



Slika 28. Zavarivanje čelika T/P91 sa T/P22 [4]

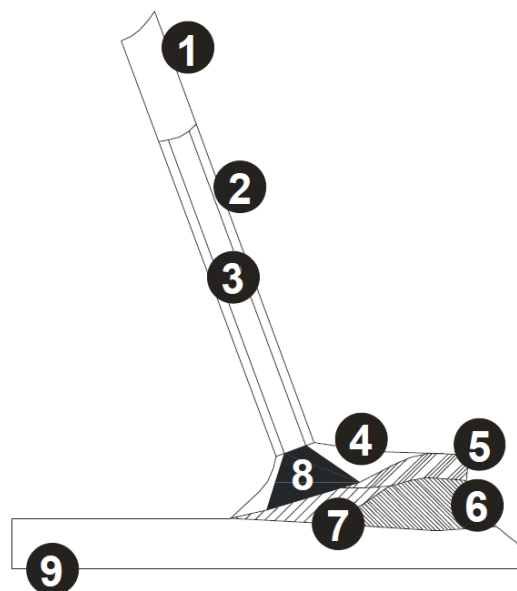
4.4.1. REL postupak zavarivanja

REL postupak zavarivanja predstavlja elektrolučni postupak kod kojeg se električni luk uspostavlja kratkim spojem između elektrode (dodatni materijal) i radnog komada. Procesom taljenja jezgre i obloge elektrode stvara se odgovarajuća količina rastaljenog materijala, troske i plinova. Toplinska energija dobivena iz električnog luka tali elektrodu i osnovni materijal. Najčešće se primjenjuju obložene elektrode, odnosno žice s metalnom jezgrom na koju je nanjena nemetalna obloga. Obloga se tali od unutarnje strane prema vanjskoj na način da se na vrhu elektrode stvara krater koji usmjerava struju plinova i kapi rastaljenog metala prema rastaljenom osnovnom materijalu. Hlađenjem se skrućuje tekući metal, a sloj troske koji ga prekriva regulira brzinu hlađenja metala zavara [15].

Prilikom korištenja istosmjernog izvora struje elektroda može biti spojena na pozitivan (+) ili negativan (-) pol. Ovisno o vrsti materijala koji se zavaruje, vrsti korištenih elektroda, zavarljivosti materijala, položaju zavarivanja, vrsti i dimenzijama konstrukcije koristit će se određena vrsta struje, odnosno vrsta izvora struje. Jakost struje ovisi o promjeru i vrsti elektrode, debljini i vrsti materijala koji se zavaruje, položaju zavarivanja, postupku zavarivanja te o vještini zavarivača. Bitnu ulogu ima zavarivač koji ručno regulira dodavanje elektrode u električni luk i bira samo struju zavarivanja na uređaju za zavarivanje. Struju zavarivanja preporučuje proizvođač elektroda, a često se i određuje iskustveno. Napon električnog luka tijekom zavarivanja ovisi o promjeru elektrode i vrsti obloge te bitno utječe na izgled i svojstva

zavarenog spoja. Nagib elektrode također utječe na oblik i kvalitetu zavara. Kvalitetan spoj se ne može ostvariti bez adekvatne tehnike zavarivača (putanja vrha elektrode i brzina vođenja elektrode). Prilikom zavarivanja sitnozrnatih i legiranih čelika preporučuje se što manje njihanje vrha elektrode, prilikom čega se zavareni spoj treba dobiti povlačenjem u tzv. vezanim slojevima. Kod REL postupka zavarivanja pogreške najčešće nastaju zbog nepravilne tehnike rada zavarivača, a površinski izgled zavarenog spoja uvelike ukazuje na kvalitetu zavara. Najčešće pogreške su: poroznost u zoni taljenja, uključci troske između slojeva, ugorine na granici taljenja osnovnog materijala, hrapava površina, pukotine, nedovoljna penetracija i naljepljivanje te deformacije [17], [18], [19].

Na slici 29 prikazan je shematski prikaz REL zavarivanja.



Slika 29. Shematski prikaz REL zavarivanja: 1 – obložena elektroda; 2 – obloga; 3 – žica; 4 – zaštitni plinovi; 5 – troska; 6 – metal zavara; 7 – rastaljeni materijal; 8 – električni luk; 9 – osnovni materijal [15]

Prednosti REL postupka zavarivanja su [20]:

- razvijen širok spektar dodatnih materijala za zavarivanje,
- manja cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na npr. MAG i EPP postupak zavarivanja,
- pogodan za manja proizvodna i reparaturna zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima zavarivanja,
- pogodan za rad na terenu, naročito tamo gdje nema električne energije (moguća primjena agregata),
- vrlo jednostavno rukovanje opremom,
- dobra mehanička svojstva zavara.

Nedostaci REL postupka zavarivanja [20]:

- mala brzina zavarivanja i niska produktivnost u odnosu na MAG i EPP,
- kvaliteta zavara značajno ovisi o vještini zavarivača,
- dugotrajno vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača,
- neizbježan je otpad elektrode (8 – 10 %),
- teže čišćenje troske nakon zavarivanja i gubitak vremena zbog čišćenja troske,
- razvijaju se štetni plinovi (potrebna dobra ventilacija prostora),
- dugotrajan rad može ostaviti štetne posljedice na zdravlje zavarivača (reuma, oštećenja dišnog sustava).

Široka je primjena REL postupka zavarivanja, no ipak zbog ekonomičnosti (mala brzina zavarivanja i orijentacijski 1,5 do 2 kg depozita na sat) primjenjuje se za izvođenje kraćih zavara kod sučeljenih zavarenih spojeva te kraćih kutnih spojeva manje debljine zavara gdje se obično ne traži pojačana penetracija u korijenu zavara. Prema svojstvima osnovnog materijala i zahtjevima zavarenog spoja biraju se prikladne elektrode, a konkretno za zavarivanje visokolegiranih čelika biraju se elektrode prema kemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima osnovnog materijala, pri čemu u konačnici metal zavara mora imati jednaka ili bolja svojstva [19], [20].

Na slici 30 prikazana je primjena REL postupka zavarivanja na cjevovodu.

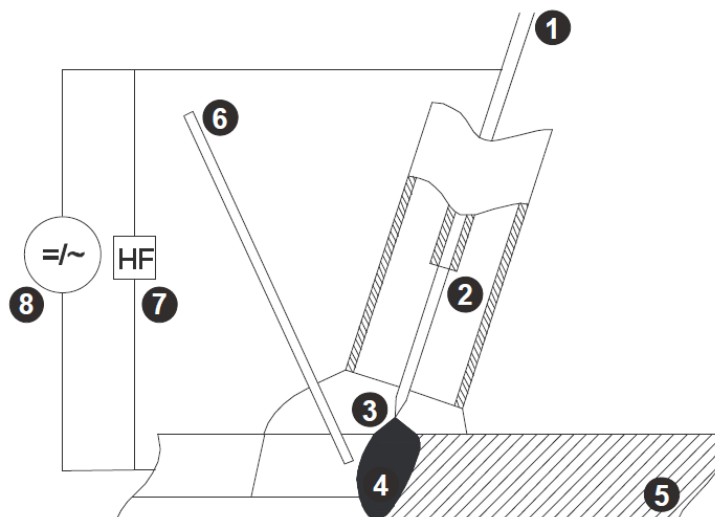


Slika 30. REL zavarivanje cjevovoda celuloznom elektrodom (silazna tehnika) [15]

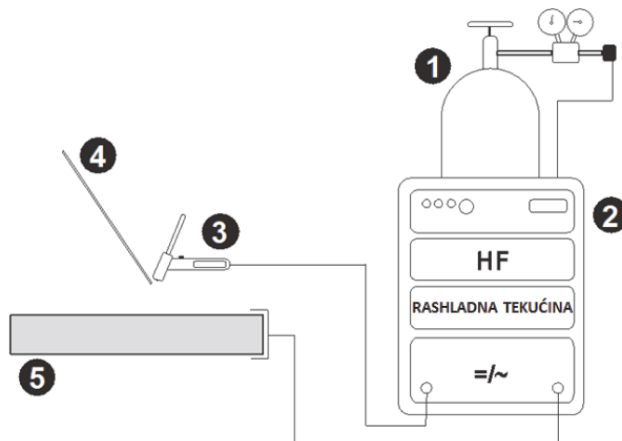
4.4.2. TIG postupak zavarivanja

Komercijalna primjena TIG postupka zavarivanja započela je 50-ih godina prošlog stoljeća. Danas ovaj postupak uz vrlo male konstrukcijske promjene zbog značajnih prednosti predstavlja široko primjenjiv elektrolučni postupak zavarivanja. Kod TIG postupka zavarivanja

električni luk se uspostavlja između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala. Zona utjecaja topline, rastaljeni osnovni materijal i volframova elektroda zaštićeni su atmosferom inertnog plina, a sam proces zavarivanja izvodi se s dodatnim materijalom ili bez njega (pretaljivanje) [16]. Na slici 31 prikazan je shematski prikaz TIG postupka zavarivanja, a na slici 32 prikazan je shematski prikaz standardne opreme za TIG zavarivanje.



Slika 31. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja: 1 – netaljiva elektroda; 2 – sapnica gorionika; 3 – električni luk; 4 – rastaljeni materijal; 5 – metal zavara; 6 – dodatni materijal; 7 – visokofrekventni generator; 8 – izvor struje [16]



Slika 32. Shematski prikaz standardne opreme za TIG zavarivanje: 1 – boca sa zaštitnim plinom; 2 – izvor struje za zavarivanje; 3 – gorionik; 4 – dodatni materijal; 5 – radni komad [16]

Netaljiva elektroda služi isključivo za uspostavu električnog luka, a njezino trošenje rezultat je termičkih opterećenja ili mehaničkih oštećenja. Također, netaljiva elektroda svojom geometrijom utječe na karakteristiku električnog luka. Električni luk se uspostavlja kontaktno (neposredno ili posredno) ili preko visokofrekventnog generatora, sklopa integriranog zajedno s upravljanjem i izvorom struje za zavarivanje. Električni luk kod ovog postupka zavarivanja sastoji se od tri područja: katodnog, anodnog i područja stupa električnog luka. Anodno

područje (područje pozitivnog pola) i katodno područje (područje negativnog pola) malih su duljina, a sastoje se od oblaka iona koji udaraju u anodu, tj. katodu, te oslobađaju određenu količinu energije (topline). Područje stupa električnog luka, tj. njegova duljina ovisi o naponu električnog luka, a najčešće odgovara promjeru netaljive elektrode. Kako električni luk označava intenzivno izbijanje u smjesi plinova i para, slijedi da je glavni nosilac ionizacije kod TIG postupka zavarivanja upravo zaštitni plin, a o njemu ovisi i uspostava i stabilnost luka. Temperature koje se razvijaju kod TIG postupka zavarivanja funkcija su osnovnih parametara zavarivanja, vrste zaštitnog plina te vrste osnovnog materijala, a u samoj osi plazme električnog luka mogu dosežati preko 20000 °C [16].

Osnovne prednosti TIG postupka zavarivanja su [16]:

- koncentriranost električnog luka, smanjeni ZUT,
- nema prskanja, nema troske,
- minimalna količina štetnih plinova,
- zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura,
- mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala,
- mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima,
- mogućnost zavarivanja pozicija malih debljina,
- pogodno za izvođenje reparaturnih radova,
- pravilno izveden zavareni spoj spada u najkvalitetnije zavarene spojeve izvedene elektrolučnim postupkom,
- odličan izgled zavarenog spoja.

Osnovni nedostaci TIG postupka zavarivanja su [16]:

- mala brzina zavarivanja,
- mali depozit dodatnog materijala,
- neekonomičnost u zavarivanju debljih pozicija (iznad 6 mm),
- zahtijeva se precizna priprema zavarenog spoja,
- viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova,
- zahtjevnost izvođenja ručnog TIG zavarivanja, dugotrajna izobrazba zavarivača,
- otežanost izvođenja zavarivanja na otvorenim prostorima,
- potreba za prisilnom ventilacijom zraka prilikom izvođenja zavarivanja u skućenim prostorima,
- pojačana svjetlost i UV zračenje.

Glavni parametri koji utječu na TIG zavarivanje su struja zavarivanja, brzina zavarivanja, vrsta i promjer netaljive elektrode te vrsta i protok zaštitnog plina. Mehanička svojstva i izgled zavara ovise o navedenim parametrima, stoga je potrebno odrediti optimalne parametre kako bi zavar bio kvalitetan. Struja zavarivanja je najvažniji parametar jer utječe na oblik metala zavara, unos topline, zonu utjecaja topline te na penetraciju i depozit. Veća struja znači i veću penetraciju. Jačinu struje potrebno je odrediti u ovisnosti o vrsti i promjeru netaljive elektrode, vrsti struje (istosmjerna, izmjenična), debljini osnovnog materijala, položaju zavarivanja i dr. Kod TIG postupka zavarivanja može se zavarivati izmjeničnom (AC) strujom i istosmjernom (DC) strujom s elektrodom na plus (+) ili minus (-) polu [16].

U tablici 10 prikazane su karakteristike TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu.

Tablica 10. Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [16]

| Vrsta struje i polaritet | DC (-) | DC (+) | AC |
|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Shematski prikaz | | | |
| Čišćenje oksida | NE | DA | DA (pola ciklusa) |
| Raspodjela topline | 1/3 na elektrodi 2/3 na materijalu | 2/3 na elektrodi 1/3 na materijalu | 1/2 na elektrodi 1/2 na materijalu |
| Penetracija | uska, duboka | plitka, široka | srednje široka srednje duboka |
| Kapacitet elektrode | odličan npr. ϕ 3,2 / 400 A | loš npr. ϕ 6,4 / 120 A | dobar npr. ϕ 3,2 / 255 A |

Brzina zavarivanja kao i kod REL postupka zavarivanja ovisi o tehnici rada, vrsti osnovnog materijala te o pripremi spoja. Brzina zavarivanja zajedno sa strujom određuje unos topline u radni komad. Promjena brzine zavarivanja ima utjecaj na oblik zavara i dubinu penetracije. Kod ručnog zavarivanja zavarivač određuje i postiže određenu brzinu zavarivanja, dok se kod mehaniziranog zavarivanja brzina postiže pomoću opreme. Uz konstantni napon i struju zavarivanja povećanje brzine zavarivanja uzrokovat će smanjenje depozita i dubinu penetracije [16].

Zaštitni plin bi trebao osigurati prikladnu atmosferu koja će se lakše ionizirati te štititi vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. U tu svrhu koriste se inertni plinovi, najčešće argon, helij te njihove mješavine. Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod TIG zavarivanja. Argon u odnosu na helij ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira kompaktnijim električnim lukom, čime se dobiva manja penetracija i protaljšivanje. Helij ima deset puta manju masu od argona pa zbog toga protoci helija moraju biti i do tri puta veći nego kod argona. Dobra strana helija je što daje širi električni luk i ima dobru toplinsku vodljivost. Toplina iz električnog luka brže se prenosi na radni komad, daje veću penetraciju i veći unos topline. Osim čistih inertnih plinova poput argona i helija, često je u primjeni i mješavina navedenih plinova u različitim omjerima, a isto tako postoji mogućnost dodavanja manjeg postotka drugih plinova u mješavine. Moguće je dodati vodik koji ima vrlo dobru toplinsku vodljivost i povećava penetraciju, a moguće su i mješavine s dodatkom dušika koje se uglavnom upotrebljavaju za zavarivanje materijala s austenitnom strukturom [16].

TIG postupak se široko primjenjuje kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja aluminijskih legura i drugih nehrđajućih materijala i legura. TIG se uglavnom uspoređuje s MIG i plazma postupkom zavarivanja. Primjenjuje se za zavarivanje limova i cijevi. TIG postupak je izvorno ručni postupak, no koristi se i kao automatski i robotizirani postupak zavarivanja prilikom čega se zahtijeva kompleksnija i skuplja oprema [16].

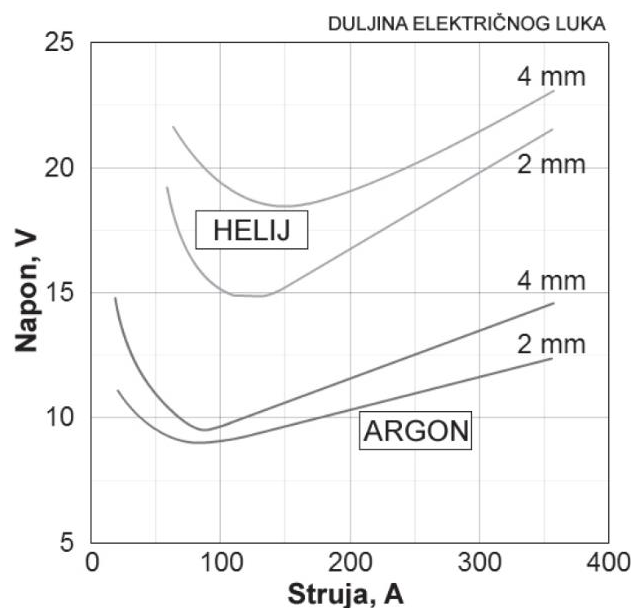
4.4.2.1. Zaštitni plinovi kod TIG postupka zavarivanja

Kako bi se zaštitilo područje zavarivanja od atmosferskih plinova i održavao konstantan električni luk koriste se zaštitni plinovi, koji ujedno svojim svojstvima utječu i na mehanička svojstva zavarenog spoja. Zaštitni plin se odabire ovisno o željenoj kvaliteti zavarenog spoja, vrsti elektrode, debljini osnovnog materijala, položaju zavarivanja, kvaliteti pripreme, željenom izgledu zavara, profilu penetracije i cijeni zaštitnog plina. Konkretno prilikom primjene TIG postupka zavarivanja koriste se najčešće plemeniti plinovi kao što su helij i argon. Dominantniji u primjeni je argon [16].

I helij i argon su inertni plinovi pa daju zaštitnu atmosferu u kojoj ne dolazi do kemijskih reakcija između zaštitnog plina i osnovnog materijala. Zaštitni plin također direktno utječe na stabilnost i kvalitetu električnog luka, geometrijske karakteristike zavarenog spoja, estetski izgled zavarenog spoja i na količinu para koje se oslobađaju tijekom procesa zavarivanja. Promatra se nadalje utjecaj argona i helija na zavareni spoj naglašavajući pritom prednosti i nedostatke svakog zaštitnog plina. Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod TIG zavarivanja, no to nije jedina njegova prednost. Nizak ionizacijski potencijal (energija potrebna

za uzimanje jednog elektrona atoma plina kako bi se pretvorio u ion) od 15,7 eV olakšava uspostavu i stabilnost električnog luka. Također, argon je 1,4 puta teži od zraka pa izlaskom iz sapnice potiskuje zrak i dobro štiti rastaljeni metal, a ista karakteristika doprinosi i potrebi za manjim protokom prilikom zavarivanja. Argon u odnosu na helij ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira kompaktnijim električnim lukom čime se dobiva manja penetracija i protaljivanje. Minimalna potrebna čistoća argona iznosi 99,95 %, iznimno 99,997 % [16].

Nasuprot argonu, helij je plin s višim ionizacijskim potencijalom (24,5 eV) što otežava uspostavu električnog luka. Male je mase (10 puta manje nego argon) zbog čega protoci helija moraju biti i do tri puta veći u odnosu na argon. Velika prednost helija kao zaštitnog plina je vrlo dobra toplinska vodljivost i to što daje širi električni luk. Toplina iz električnog luka brže se prenosi na radni komad, daje veću penetraciju i unos topline (napon električnog luka sa zaštitnim plinom helijem je značajno veći nego kod argona pri istim strujama). Ova karakteristika posebno dolazi do izražaja prilikom zavarivanja materijala velike toplinske vodljivosti (npr. bakra) i zavarivanju pozicija većih debljina [16]. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja prikazana je slikom 33.



Slika 33. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja [16]

Iz slike je također vidljivo povećanje napona električnog luka pri nižim strujama (kod helija je to između 50 i 100 A), što je nepovoljno kod zavarivanja tanjih materijala koji se upravo i zavaruju u navedenom rasponu struja. Minimalna potrebna čistoća helija kao zaštitnog plina iznosi 99,99 %.

Često se umjesto čistih inertnih plinova argona i helija koriste njihove mješavine u različitim omjerima. Mješavina argona i helija kombinacija je povoljnih svojstava argona odnosno helija, a primjeri karakteristika zavarivanja spomenutim plinovima prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Usporedba karakteristika zavarivanja prilikom primjene različitih zaštitnih plinova i mješavina [16]

| Karakteristika | Ar | Mješavina Ar / He | He |
|--------------------|----------------|---------------------------|------------------------|
| Brzina zavarivanja | smanjena | veća nego kod 100 % Ar | veća |
| Penetracija | smanjena | veća nego kod 100 % Ar | povećana |
| Čišćenje oksida | dobro | sličnije kao kod 100 % Ar | loše |
| Uspostava luka | laka | bolja nego kod 100 % He | otežana |
| Stabilnost luka | dobra | bolja nego kod 100 % He | niža kod manjih struja |
| Oblik luka | uži, fokusiran | uži nego kod 100 % He | širi |
| Napon luka | manji | srednja | veći |
| Protok | manji | veći nego kod 100 % Ar | povećan |
| Cijena | niža | veća nego kod 100 % Ar | veća nego kod 100 % Ar |

Osim navedenih kombinacija plinova i mješavina, postoji mogućnost dodavanja manjeg postotka drugih plinova u mješavine pa tako, npr. vodik koji ima vrlo dobru toplinsku vodljivost povećava penetraciju, dok se mješavine s dodatkom dušika upotrebljavaju uglavnom kod zavarivanja materijala s austenitnom strukturom. Također, važno je spomenuti da se TIG zavarivanje često upotrebljava kod zahtjevnijih zavarenih spojeva gdje je česta i nužna zaštita korijenskog dijela zavarenog spoja. Cilj je „odstraniti“ zrak s korijenske strane spoja i upuhati zaštitni plin te ga održavati pod niskim pritiskom. Zaštita je moguća i kod sučeljenih i kod cijevnih spojeva uz pomoć jednostavnih naprava, a često se upotrebljava i kod polu-automatiziranih sustava [16].

Konkretno prilikom TIG zavarivanja čelika P91 često se koriste plinske mješavine, kao što je npr. mješavina argona i helija u omjeru 50:50, a za zaštitu korijena najčešće se koristi 100 % Ar. Također, 100 % Ar se koristi prilikom zavarivanja prolaza. Plinska mješavina Ar + N₂ također nalazi primjenu prilikom TIG zavarivanja čelika P91.

5. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu u svrhu analize zavarljivosti Cr-Mo čelika P91. Protaljivanje automatiziranim TIG postupkom provedeno je na 8 uzoraka od čelika P91 kombinirajući pritom određene parametre koji su zadani planom pokusa u tablici 12.

Tablica 12. Plan pokusa

| Uzorak | 100 % Ar | 85 % Ar / 15 % He | Predgrijavanje (250 °C) | Bez predgrijavanja | $I_1 = 150 \text{ A}$ | $I_2 = 200 \text{ A}$ |
|--------|----------|----------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | X | | | X | X | |
| 2 | X | | | X | | X |
| 3 | X | | X | | X | |
| 4 | X | | X | | | X |
| 5 | | X | X | | X | |
| 6 | | X | X | | | X |
| 7 | | X | | X | X | |
| 8 | | X | | X | | X |

Postupak protaljivanja provodio se netaljivom volframovom elektrodom bez dodavanja dodatnog materijala. U tablici 12 vidljivi su zaštitni plinovi koji su korišteni prilikom protaljivanja uzoraka – 100 % argon i mješavina 85 % Ar / 15 % He. Određeni uzorci su predgrijavani na temperaturu 250 °C, a ostali su podvrgnuti protaljivanju bez prethodnog predgrijavanja. Također, parametar koji je reguliran ovisno o uzorku je iznos jakosti struje (150 A i 200 A).

Nakon protaljivanja uzoraka od čelika P91 provedena su ispitivanja kojima su utvrđena svojstva dobivenih uzoraka. Provedena je vizualna kontrola uzoraka nakon čega su izrađeni makroizbrusci i provedena daljnja ispitivanja – ispitivanje mikrostrukture i mjerenje tvrdoće.

Svrha eksperimentalnog dijela rada bila je pokazati kako pojedini parametar utječe na uzorke od čelika P91 i pomoću toga zaključiti koji su optimalni parametri prilikom korištenja čelika P91. Time bi se potencijalno izbjegli neki od postupaka (npr. predgrijavanje) i smanjili troškovi zavarivanja čelika P91. Potrebno je odrediti zadovoljavaju li iznosi tvrdoće u pojedinim zonama makroizbrusaka normom zahtijevanim iznosima i može li se izbjeći naknadna toplinska obrada kako bi se time smanjili troškovi.

5.1. Oprema za zavarivanje

Protaljivanje uzoraka od čelika P91 izvedeno je automatiziranim TIG postupkom. Korišteni izvor struje za protaljivanje TIG postupkom je uređaj MagicWave 230i EF proizvođača Fronius, prikazan na slici 34.



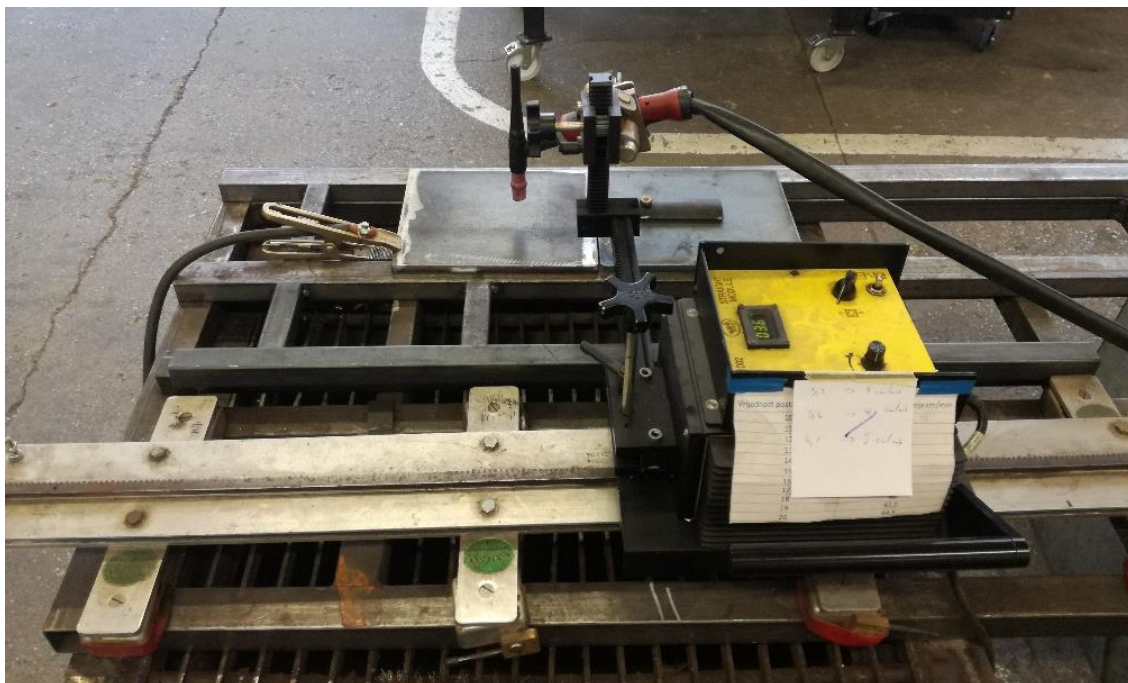
Slika 34. Uređaj za zavarivanje Fronius MagicWave 230i EF [21]

Navedeni izvor struje potpuno je digitalno upravljivi izvor za TIG postupak i njime je moguće zavarivanje istosmjernom ili izmjeničnom strujom. Također, moguće je navedeni uređaj koristiti prilikom zavarivanja na terenu zbog lake prenosivosti uređaja. MagicWave 230i izuzetno je pristupačan uređaj kojim je lako upravljati i kojeg je moguće povezati s drugim uređajima putem Bluetootha, bežičnog LAN-a i NFC-a. Povezuje se s kacigom za zavarivanje, daljinskim upravljačima, mobilnim uređajima, itd. Tehničke karakteristike korištenog izvora struje prikazane su u tablici 13.

Tablica 13. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje MagicWave 230i [21]

| Izvor struje | | MagicWave 230i |
|--|-------|-----------------------|
| Mrežni napon, V | | 230 (50 Hz) |
| Područje napona zavarivanja, V | | 10,1 – 19,2 |
| Napon otvorenog kruga, V | | 100 |
| Intermitencija, A | 100 % | 165 |
| | 60 % | 195 |
| | 35 % | 230 |
| Masa, kg | | 17 |
| Dimenzije ($D \times \check{S}$), mm | | 558 × 210 |
| Stupanj zaštite | | IP23 |

Kako bi se osigurali jednaki uvjeti prilikom protaljivanja, radi potrebe za preciznošću i visokom kvalitetom koje je teško postići ručnim TIG postupkom, protaljivanje je provedeno pomoću automatiziranog TIG postupka. Tako je eliminiran utjecaj zavarivača prilikom protaljivanja. Za automatizaciju postupka korišten je sustav za automatsko upravljanje „Bugo Systems“ koji je prikazan na slici 35. Na prikazani uređaj pričvršćen je pištolj za zavarivanje koji se prilikom pokretanja sustava za automatsko upravljanje giba paralelno uz radni komad, a prethodno je pozicioniran u odnosu na uzorak. Udaljenost vrha netaljive volframove elektrode od radnog komada održavana je konstantnom (8mm), kao i brzina protaljivanja (8 cm/min) prilikom protaljivanja svakog uzorka. Udaljenost i brzina protaljivanja namješteni su na uređaju za automatsko upravljanje.



Slika 35. Sustav za automatsko upravljanje „Bugo Systems“ s postavljenim pištoljem za zavarivanje u odnosu na radni komad

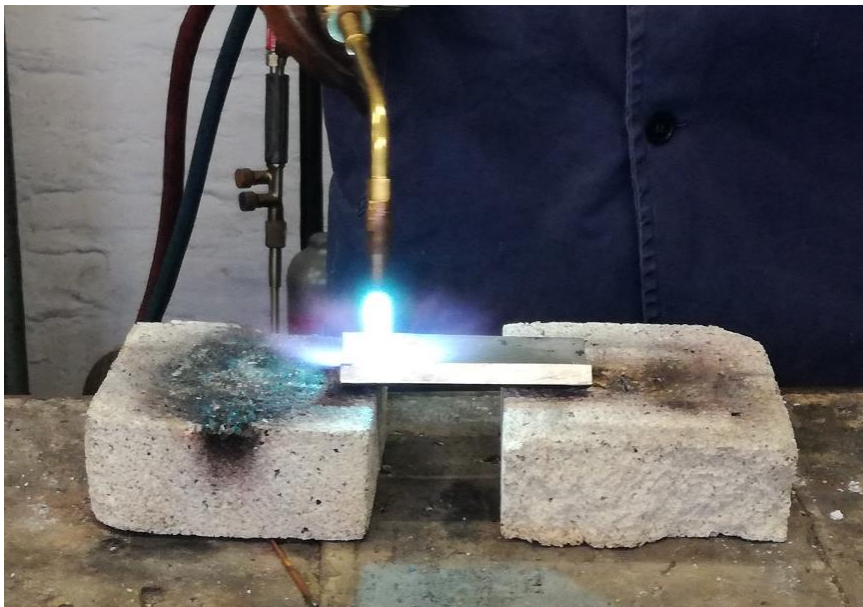
Tijekom provođenja eksperimenta korištena je torirana elektroda promjera 3,2 mm koja ima maksimalno strujno opterećenje 380 A. Općenito se torirane elektrode mogu opteretiti većim jakostima struje zavarivanja, imaju nižu granicu minimalnog opterećenja i trajnije su. Potrebno je pravilno opteretiti volframovu elektrodu optimalnim jakostima električne struje zavarivanja kako bi se pritom produžio vijek trajanja elektrode i smanjilo onečišćenje zavarenog spoja volframom [22].

Neke uzorke bilo je potrebno prethodno predgrijati na temperaturu 250 °C, a prilikom mjerenja temperature predgrijavanja korišten je infracrveni termometar Fluke 568. Na slici 36 prikazan je uređaj za mjerenje temperature.



Slika 36. Infracrveni termometar Fluke 568 [23]

Na slici 37 prikazan je postupak predgrijavanja uzorka.



Slika 37. Postupak predgrijavanja uzorka

Na slici 38 prikazano je očitavanje na termometru Fluke 568 neposredno prije protaljivanja.

Vidljivo je da je postignuta temperatura predgrijavanja 250 °C.



Slika 38. Izmjerena temperatura na termometru Fluke 568 neposredno prije protaljivanja

5.2. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten u eksperimentu je visokolegirani martenzitni čelik P91 za rad pri visokim temperaturama. Uzorci su izrađeni od cijevi dimenzija $\phi 60,3 \times 8,7$ mm. Općenito, kako je detaljnije opisano u teorijskom dijelu rada, čelik P91 je visokolegirani martenzitni čelik koji ima oznaku po europskoj normi (EN 10216-2) X10CrMoVNb9-1. Koristi se prilikom izrade i reparature termoenergetskih postrojenja. U tablici 14 prikazan je kemijski sastav čelika P91 (osnovnog materijala), a u tablici 15 njegova mehanička svojstva.

Tablica 14. Kemijski sastav osnovnog materijala [4]

| Oznaka čelika | Sadržaj kemijskih elemenata, % | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|
| | C | Mn | Si | Cr | Ni | Mo | V | Nb | N | Al |
| P91 | 0,08 – 0,12 | 0,30 – 0,60 | 0,20 – 0,50 | 8,00 – 9,50 | 0,40 | 0,85 – 1,05 | 0,18 – 0,25 | 0,06 – 0,10 | 0,03 – 0,07 | 0,04 |

Tablica 15. Mehanička svojstva osnovnog materijala [6]

| Oznaka čelika | R_m , N/mm ² | $R_{p0,2}$, N/mm ² min. | A_5 , % min. | KV , J min. |
|---------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------|---------------|
| P91 | 620 | 450 | 19 | 190 |

Na slici 39 prikazan je uzorak 1 izrađen od čelika P91 prije protaljivanja. Svi uzorci izrađeni su od istog materijala, od iste cijevi i izrezani na istu mjeru.



Slika 39. Uzorak 1 pozicioniran u odnosu na pištolj za zavarivanje prije početka protaljivanja

Tijekom provođenja eksperimentalnog dijela rada nije korišten dodatni materijal.

Uzorci izrađeni od čelika P91 prije protaljivanja su očišćeni 96 %-tnim etanolom, kako je prikazano na slici 40.



Slika 40. Pripremljeni očišćeni uzorci prije protaljivanja

5.3. Zaštitni plin

U eksperimentu su korištena dva zaštitna plina čija je svrha zaštititi talinu protaljenog dijela materijala od vanjskih utjecaja. Zaštitnim plinovima utječe se na stabilnost električnog luka, geometriju i izgled spoja te na količinu para koje se oslobađaju tijekom protaljivanja. Dobavljač plinova korištenih u eksperimentalnom dijelu rada je tvrtka Messer. Protok plina tijekom provođenja eksperimenta bio je 9 l/min prilikom korištenja oba zaštitna plina. Boce s plinovima su preko manometra i gumenog crijeva povezane s pištoljem za zavarivanje.

Prilikom protaljivanja prva četiri uzorka (uzorci 1, 2, 3 i 4) korišten je zaštitni plin trgovačkog naziva Argon 4.8, I1 (prema normi HRN EN ISO 14175:2008 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke). Navedeni zaštitni plin sadrži 100 % argona i općenito se koristi za zavarivanje visokolegiranih čelika, aluminija i njegovih legura, drugih obojenih metala, austenitnih CrNi čelika, duplex čelika, materijala osjetljivih na plinove (titan, cirkonij, molibden), itd. [24] Na slici 41 prikazana je boca zaštitnog plina 100 % Ar koja je korištena u eksperimentu.



Slika 41. Boca zaštitnog plina Argon 4.8

Prilikom protaljivanja sljedeća četiri uzorka (uzorci 5, 6, 7 i 8) korištena je plinska mješavina argona i helija u omjeru 85:15. Trgovački naziv ove mješavine plina je Aluline He15, I3 (prema normi HRN EN ISO 14175:2008 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke). Na slici 42 prikazana je boca plinske mješavine argona i helija koja je korištena tijekom provođenja eksperimenta.



Slika 42. Boca zaštitnog plina Aluline He15

5.4. Postupak protaljivanja uzoraka od čelika P91

Eksperimentalni dio provodio se TIG postupkom protaljivanja na uzorcima od čelika P91 uz pomoć navedenog izvora struje i sustava za automatsko upravljanje radi održavanja stabilnosti procesa. Prilikom protaljivanja korištena je istosmjerna struja s elektrodom na negativnom (-) polu. Nije korišten dodatni materijal i proces protaljivanja proveden je u jednom prolazu. Protaljivalo se neutralnom tehnikom rada, u zaštitnim atmosferama 100 % Ar i plinske mješavine 85 % Ar / 15 % He. Protok plina tijekom protaljivanja svakog od uzoraka bio je 9 l/min. Nadalje, udaljenost vrha volframove elektrode od radnog komada održavana je konstantnom 8 mm, a brzina protaljivanja je prilikom protaljivanja svakog uzorka iznosila 8 cm/min.

Na slici 43 prikazan je postupak protaljivanja uzorka od čelika P91 pod zaštitom 100 % Ar, a na slici 44 prikazan je postupak protaljivanja uzorka od čelika P91 pod zaštitom 85 % Ar / 15 % He. Postupci protaljivanja provedeni su u Laboratoriju za zavarivanje.



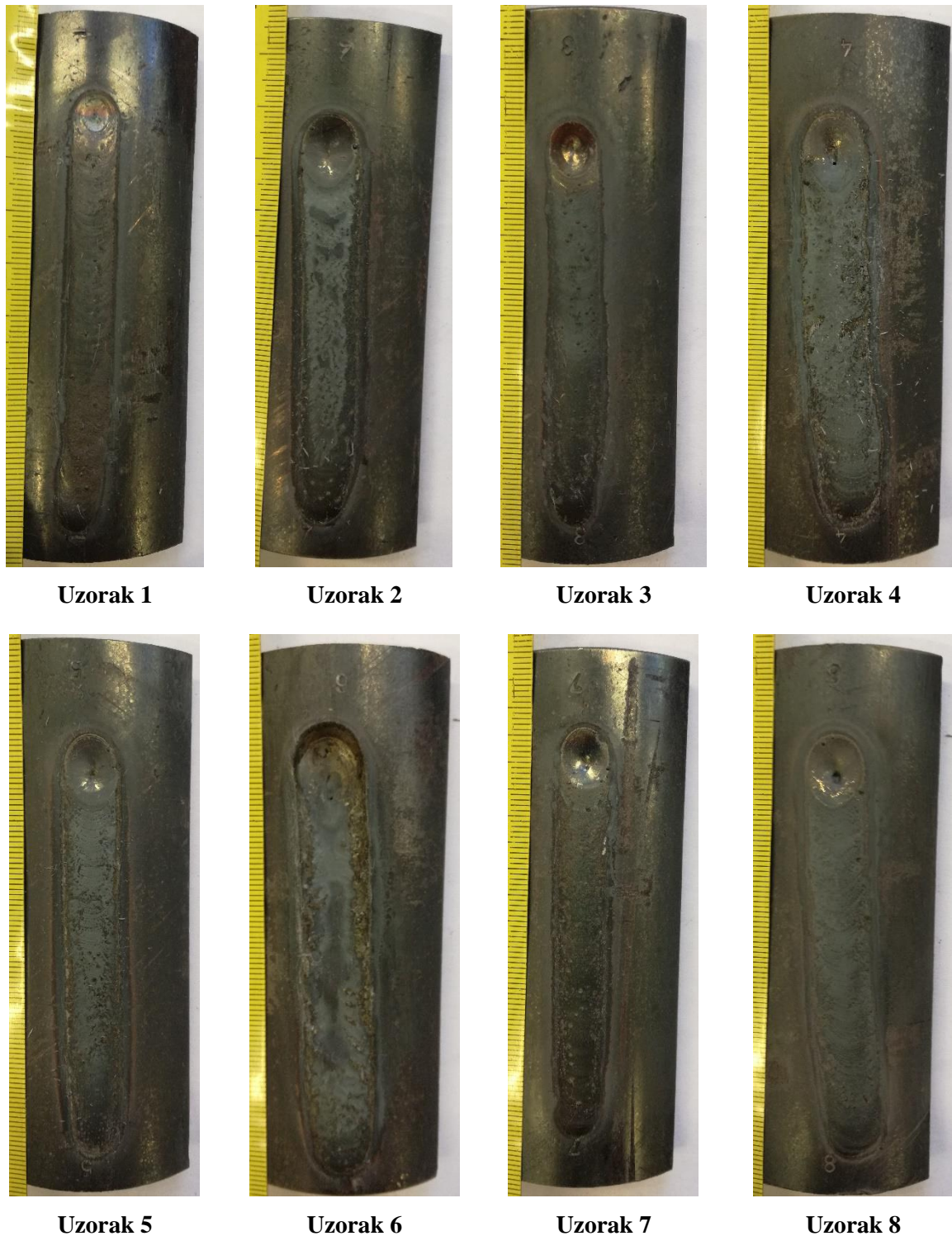
Slika 43. Postupak protaljivanja uzorka od čelika P91 pod zaštitom 100 % Ar



Slika 44. Postupak protaljivanja uzorka od čelika P91 pod zaštitom 85 % Ar / 15 % He

Električni luk prilikom protaljivanja svakog od uzoraka bio je stabilan, što je postignuto pravilnim izborom parametara protaljivanja koji pritom određuju i kvalitetu protaljenog dijela uzorka. Zaštitni plinovi utječu na uspostavu električnog luka i na profil protaljenog dijela. Posljedice niske energije ionizacije argona su lakša uspostava električnog luka i specifičan uski profil protaljenog dijela, dok helij zbog visoke toplinske vodljivosti ima širi profil protaljenog dijela uz manju penetraciju.

Planom pokusa (tablica 12) prikazano je koji su parametri regulirani prilikom protaljivanja određenog uzorka. Na upravljačkom sučelju izvora struje namješteni su osnovni parametri koji su za vrijeme protaljivanja minimalno odstupali od namještenih vrijednosti. Rezultat protaljivanja uzorka prema Planu pokusa (tablica 12) i održavanja konstantnih zadanih parametara protaljivanja prikazan je na slikama 45. Navedene slike prikazuju uzorke nakon provedenog postupka protaljivanja. Vizualnom metodom potrebno je procijeniti kakav utjecaj pojedini parametar ima na estetski izgled uzorka nakon provedenog postupka protaljivanja.



Slika 45. Uzorci nakon postupka protaljivanja

Estetski izgled protaljenih dijelova uzoraka pokazuje razliku reguliranih parametara koji su kombinirani za svaki uzorak prilikom protaljivanja. Vidljivo je da se s povećanjem jakosti struje povećava širina protaljenog dijela i da prolazi izvedeni s plinskom mješavinom 85 % Ar / 15 % He imaju veću širinu pri istoj jakosti struje u odnosu na one izvedene pod zaštitom 100 % Ar. Također, moguće je primijetiti razliku u izgledu protaljenih dijelova uzoraka koji su prethodno

bili zagrijavani na temperaturu predgrijavanja. Temperatura predgrijavanja zajedno s dodatnim unosom topline (postignut, između ostalog, povećanjem jakosti struje) uzrokuje izraženije protaljivanje uzoraka.

U tablici 16 prikazani su postavljeni parametri protaljivanja i očitani parametri tijekom protaljivanja (napon). Očitani napon je srednja vrijednost napona zabilježena tijekom protaljivanja uzorka. Parametri koji su konstantni i zajednički za sve uzorke nisu navedeni u tablici 16.

Tablica 16. Postavljeni i očitani parametri protaljivanja uzoraka

| Uzorak | Zaštitni plin | Predgrijavanje | Postavljena jakost struje, A | Očitana srednja vrijednost napona, V |
|--------|-------------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 100 % Ar | Bez predgrijavanja | 150 | 14,2 |
| 2 | 100 % Ar | Bez predgrijavanja | 200 | 14,9 |
| 3 | 100 % Ar | $T_0 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ | 150 | 14,3 |
| 4 | 100 % Ar | $T_0 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ | 200 | 15,8 |
| 5 | 85 % Ar / 15 % He | $T_0 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ | 150 | 15,5 |
| 6 | 85 % Ar / 15 % He | $T_0 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ | 200 | 16,3 |
| 7 | 85 % Ar / 15 % He | Bez predgrijavanja | 150 | 15,6 |
| 8 | 85 % Ar / 15 % He | Bez predgrijavanja | 200 | 15,9 |

Vidljivo je da su vrijednosti napona veće pri korištenju mješavine argona i helija u odnosu na zaštitu pod čistim argonom pri istoj vrijednosti struje. Mješavina 85 % Ar / 15 % He utječe na povećanje energije električnog luka, čime je omogućena veća brzina protaljivanja i bolja penetracija. Nedostatak korištenja navedene mješavine plina je visoka cijena i teže uspostavljanje električnog luka.

Moguće je na temelju dobivenih vrijednosti izračunati unos topline prema izrazu (1) [25]:

$$Q = \frac{U \times I}{v_z} \times k \quad (1)$$

gdje je:

U – napon protaljivanja, V

I – jakost struje protaljivanja, A

v_z – brzina protaljivanja, mm/s

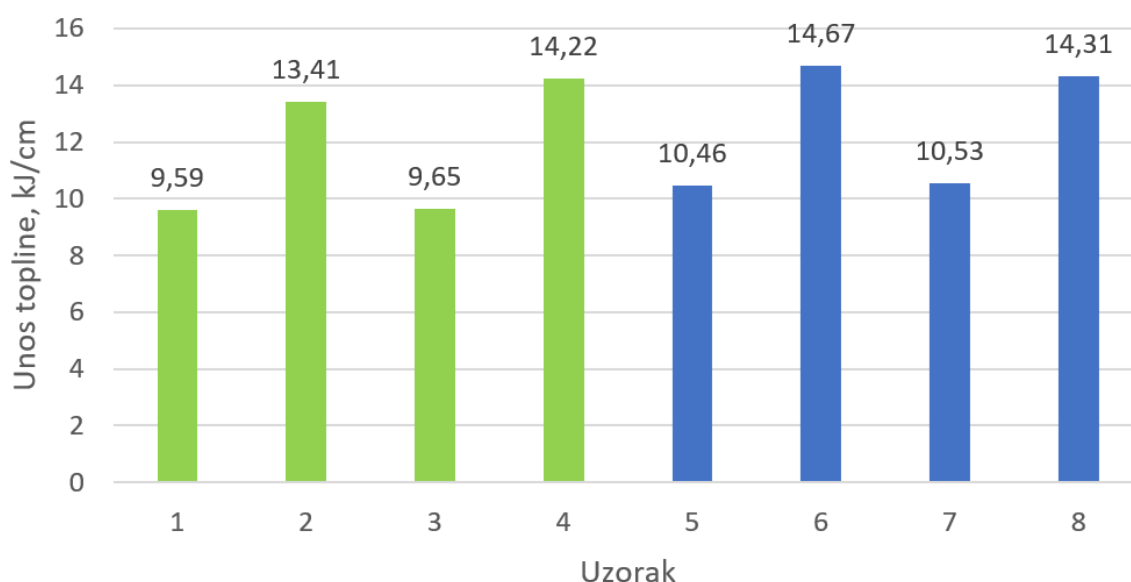
k – stupanj iskorištenja postupka protaljivanja (prema HRN EN 1011-1 za TIG postupak: $k = 0,6$).

Izračunate vrijednosti unosa topline za svaki uzorak prikazane su u tablici 17.

Tablica 17. Vrijednosti unosa topline svakog uzorka

| Uzorak | Unos topline, kJ/cm |
|--------|---------------------|
| 1 | 9,59 |
| 2 | 13,41 |
| 3 | 9,65 |
| 4 | 14,22 |
| 5 | 10,46 |
| 6 | 14,67 |
| 7 | 10,53 |
| 8 | 14,31 |

Grafički je prikazan unos topline za svaki uzorak na slici 46.



Slika 46. Usporedba toplina unesenih prilikom protaljivanja za svaki uzorak pojedinačno (zelenom bojom označeni su uzorci protaljivani pod zaštitom 100 % Ar, a plavom bojom uzorci protaljivani pod zaštitom 85 % Ar / 15 % He)

Na slici 46 moguće je uočiti razliku iznosa unesenih toplina za svaki uzorak. Posebno je naglašen utjecaj pojedinog zaštitnog plina na iznose unosa topline te je vidljivo da su iznosi manji za uzorke protaljivane pod zaštitom 100 % Ar.

5.5. Priprema i izrada ispitnih uzoraka

Nakon provedenog protaljivanja uzoraka bilo je potrebno pristupiti izradi makroizbrusaka za sva stanja pokusa. Uzorci su u Laboratoriju za zavarivanje rezani na tračnoj pili na točnu mjeru (slika 47) i nakon toga podvrgnuti brušenju. Iz svakog uzorka izrezan je po jedan makroizbrusak pomoću kojega se može djelomično utvrditi uspješnost provođenja protaljivanja.



Slika 47. Izrezivanje makroizbrusaka pomoću tračne pile

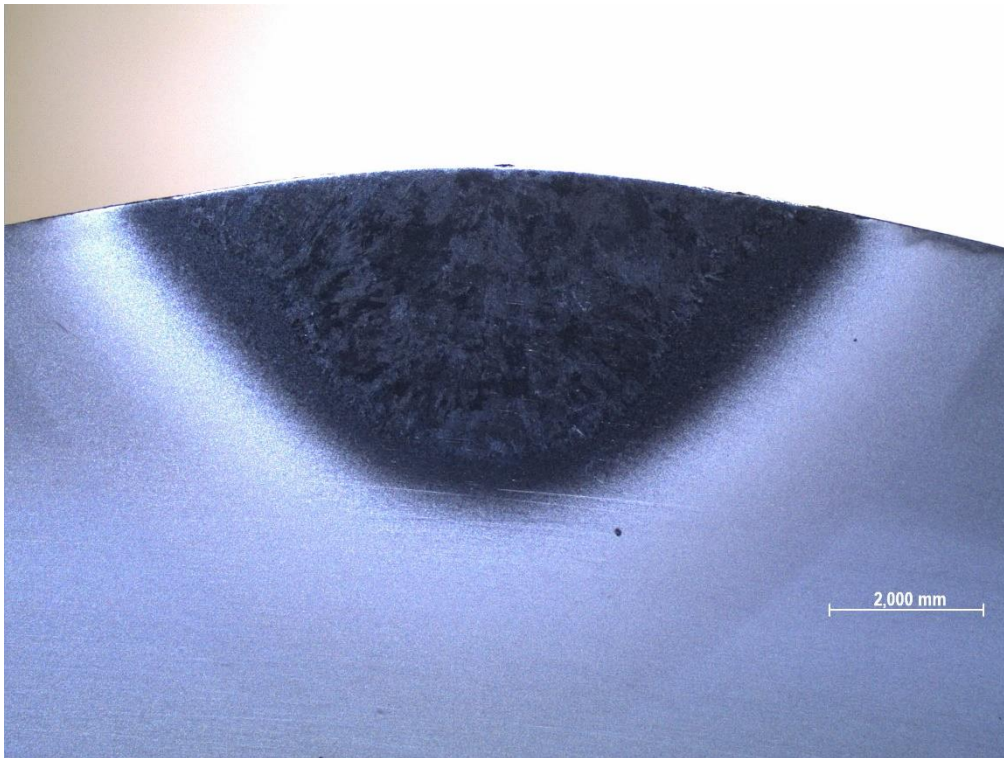
Grubo brušenje izvedeno je ručno brusnim papirima sljedećih granulacija: P80, P100 i P200. Zatim je makroizbruske bilo potrebno dodatno brusiti, a postupak strojnog brušenja proveden je u Laboratoriju za metalografiju pomoću uređaja Phoenix Alpha Grinder Polisher. Brzina vrtnje iznosila je 300 o/min, a korišteni brusni papiri su sljedećih granulacija: P320, P500, P1000, P2400 i P4000. Kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje prilikom brušenja korištena je voda. Nakon brušenja uzorci su isprani vodom radi uklanjanja nečistoća i prebačeni u uređaj DAP-V kako bi se polirali. Brzina vrtnje prilikom poliranja iznosila je 150 o/min, a kao sredstvo za podmazivanje i hlađenje korišten je lubrikant.

Nakon poliranja, uzorci su podvrgnuti postupku nagrivanja. Elektrokemijsko nagrivanje provedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala u 10 %-tnoj oksalnoj kiselini u vremenskom periodu od 3 minute, pri naponu od 5 V i struji od 2 A.

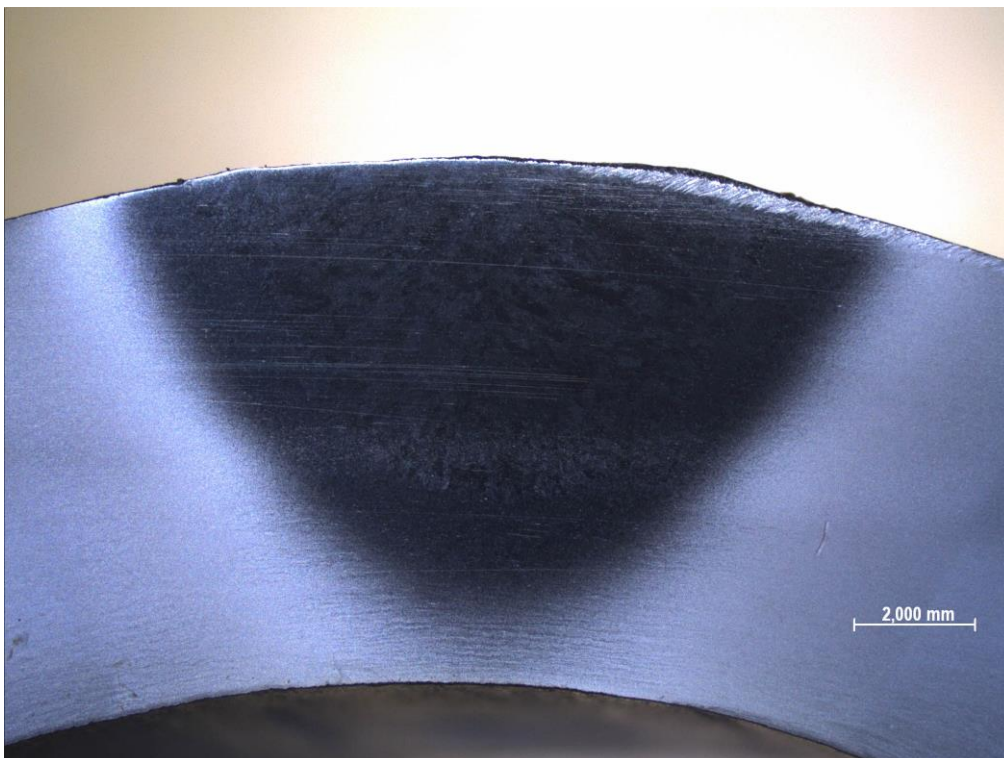
5.6. Analiza makrostrukture

Nakon provedenih obrada vidljiva je geometrija protaljenog dijela uzorka, zona i intenzitet taljenja osnovnog materijala. Na slikama 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54 i 55 prikazane su površine makroizbrusaka nakon provedenih navedenih obrada. Navedene slike snimljene su

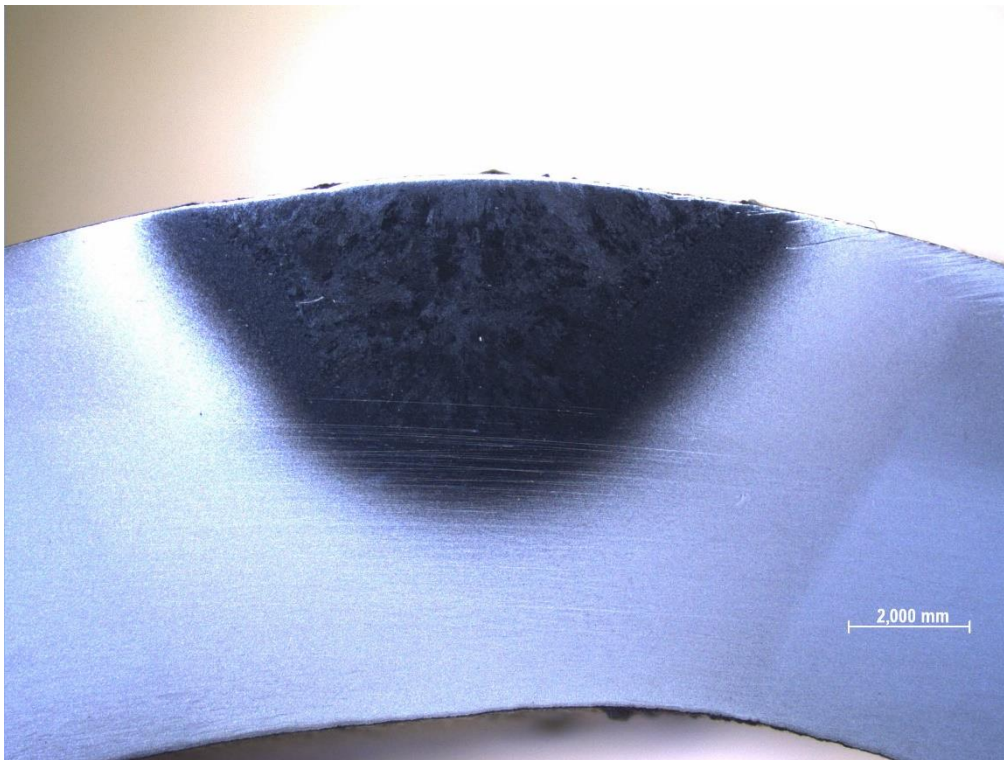
stereoskopskim mikroskopom Leica MZ6 u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



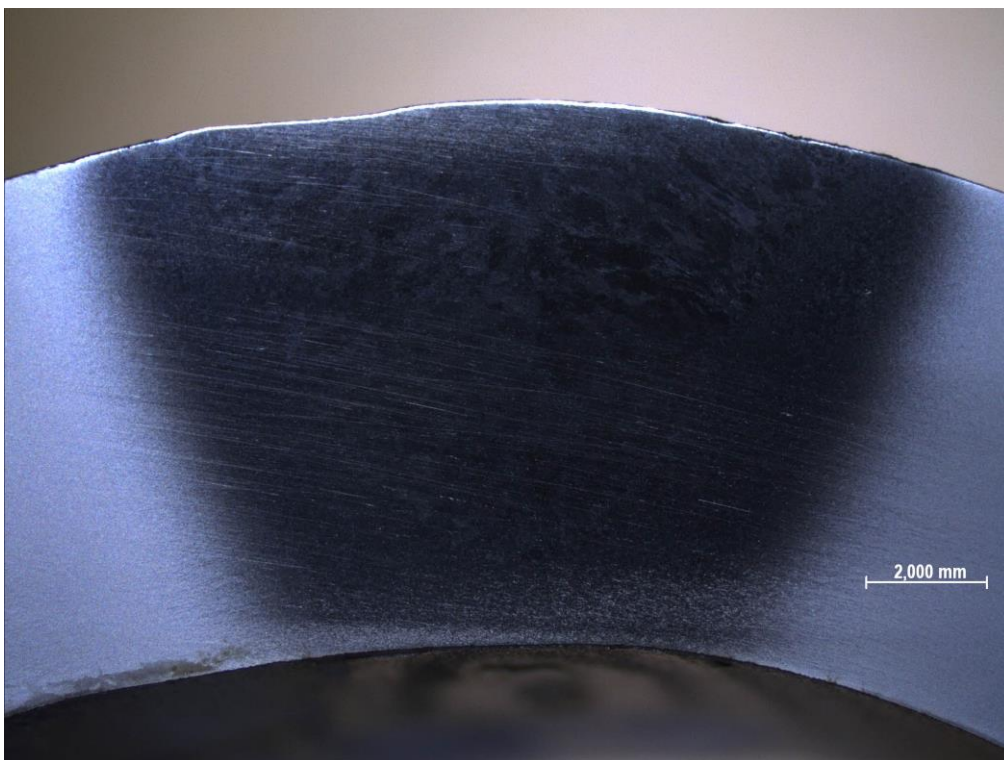
Slika 48. Makroizbrusak uzorka 1



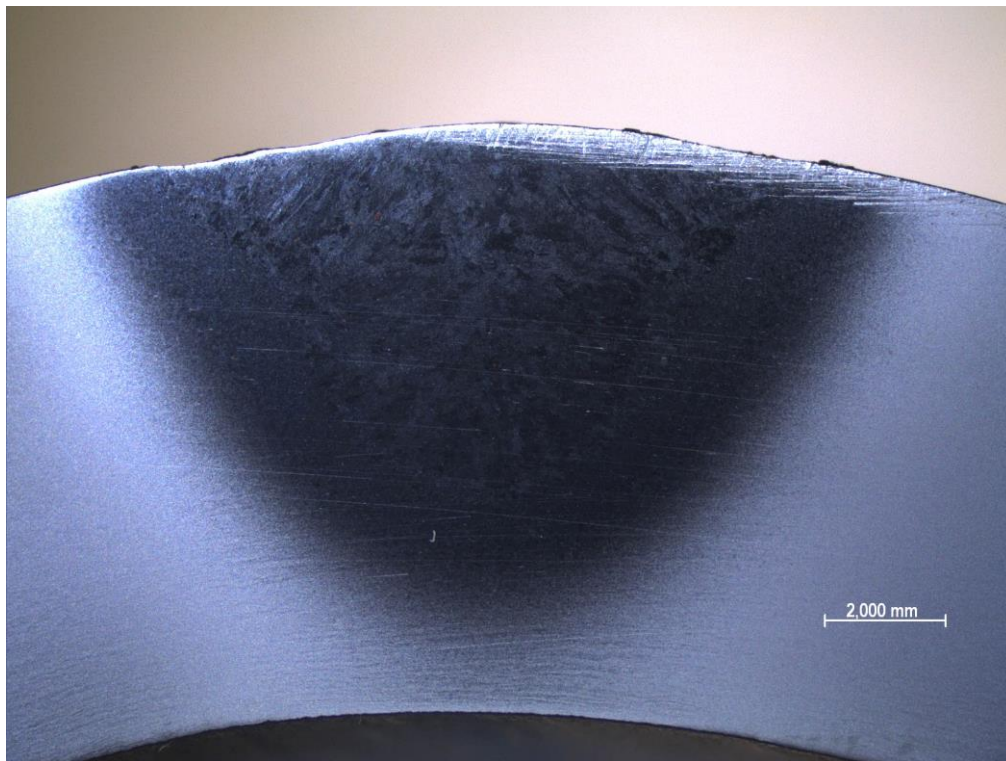
Slika 49. Makroizbrusak uzorka 2



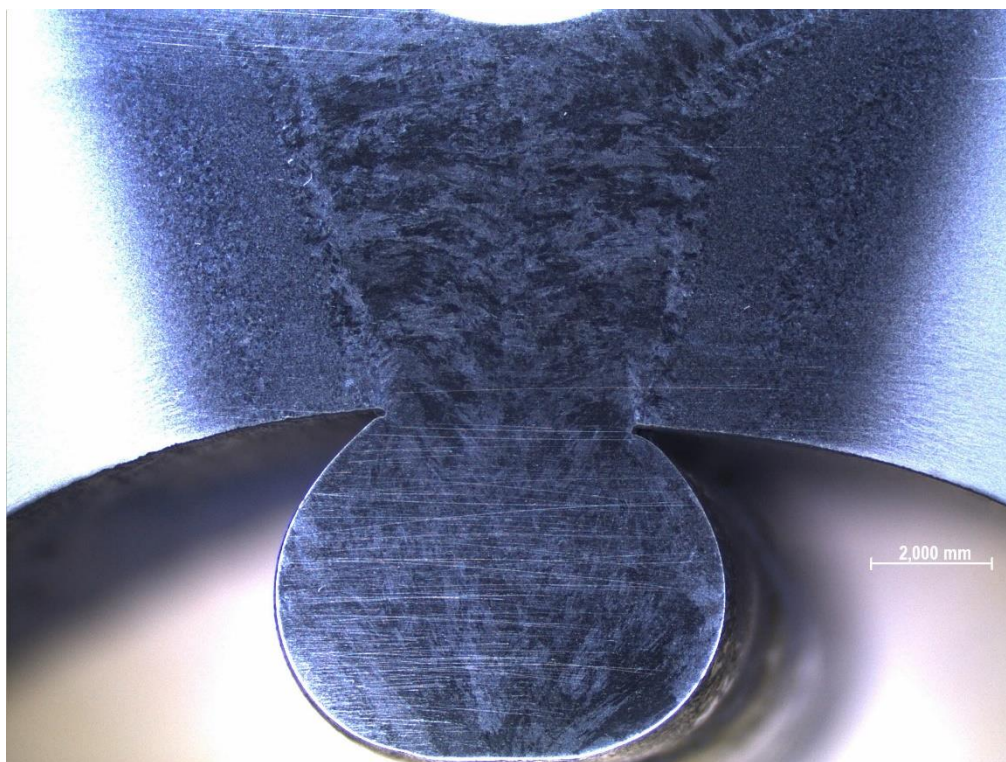
Slika 50. Makroizbrusak uzorka 3



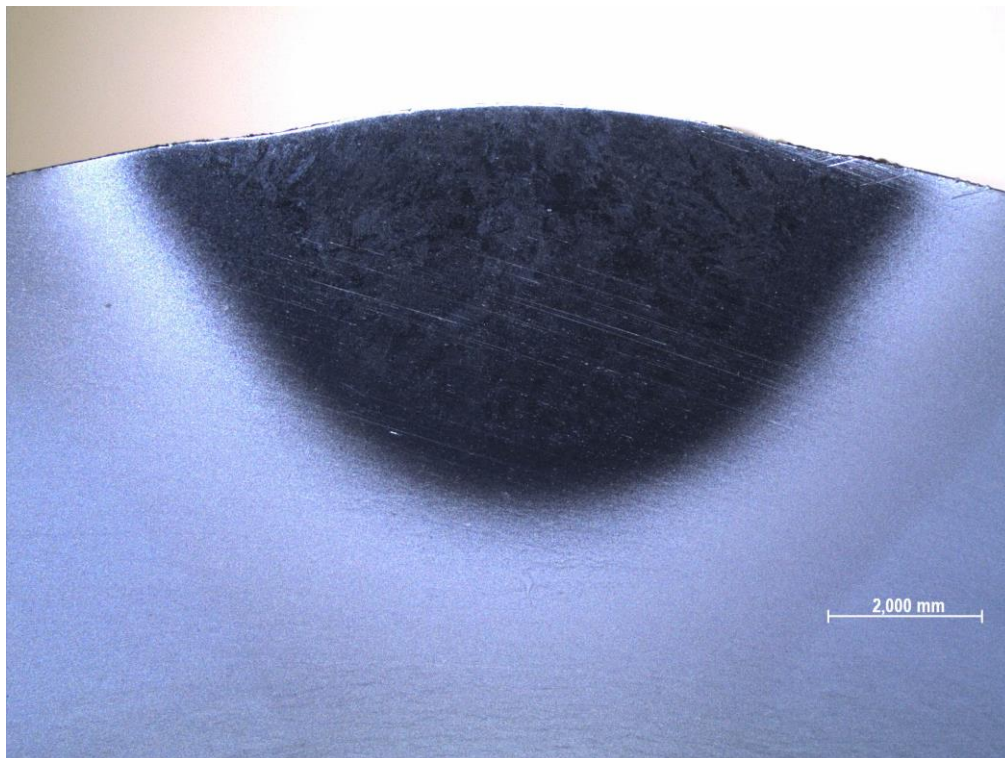
Slika 51. Makroizbrusak uzorka 4



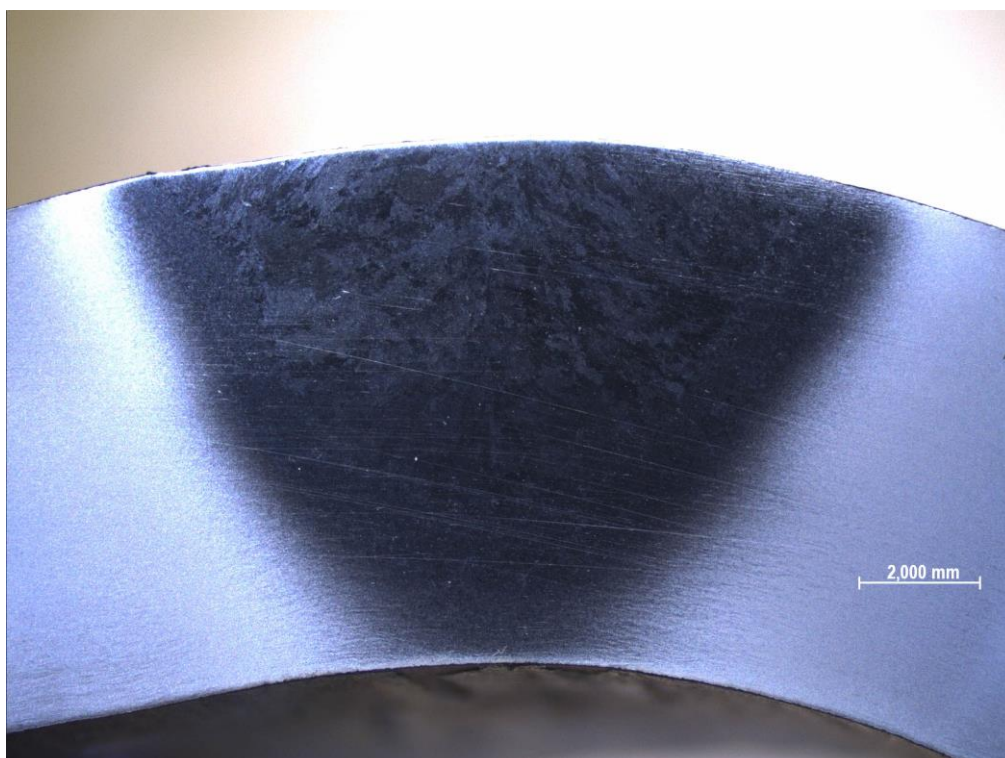
Slika 52. Makroizbrusak uzorka 5



Slika 53. Makroizbrusak uzorka 6



Slika 54. Makroizbrusak uzorka 7



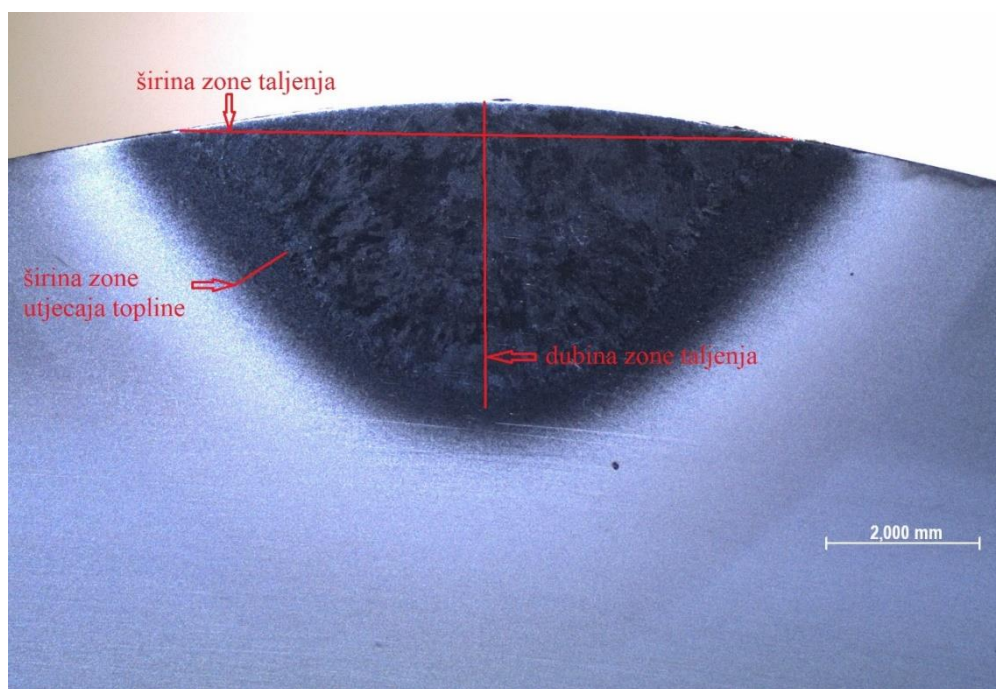
Slika 55. Makroizbrusak uzorka 8

Na svim makroizbruscima vidljiva je razlika u poprečnom presjeku koja je uzrokovana promijenjenim parametrima protaljivanja kod svakog uzorka. Prethodnim predgrijavanjem i većim unosom topline postiže se veće protaljivanje uzoraka. Također, vidljivo je da su uzorci

koji su protaljivani pod zaštitom plinske mješavine 85 % Ar / 15 % He više protaljeni u odnosu na uzorke protaljivane pod zaštitom 100 % Ar. Na svakom uzorku vidljiva je geometrija protaljenog dijela uzorka, zona taljenja osnovnog materijala i moguće je vidjeti intenzitet taljenja. Prilikom analize makrostrukture nisu uočene nepravilnosti i greške unutar profila protaljenog dijela.

Kako bi se dobile digitalne slike svakog makroizbruska korišten je stereoskopski mikroskop Leica MZ6 i pripadajući softver Leica Application suite v3.2.0. Makroizbrusci su podvrgnuti analizi geometrije protaljenog dijela uzorka. Tijekom geometrijske analize protaljenog dijela korišten je program ImageJ kojim je izmjerena širina zone taljenja, dubina zone taljenja i širina zone utjecaja topline. Pomoću računalnog programa ImageJ izmjereni pikseli se pretvaraju u odabrane mjerne jedinice tako da se prije samog mjerenja karakterističnih značajki protaljenog dijela uzorka definira odnos milimetra i piksela naredbom *Set Scale*. Naredba *Set Scale* koristi mjerno sredstvo koje se nalazi na slici zajedno s ispitnim uzorkom kako bi se definirao omjer između piksela i označene veličine na slici.

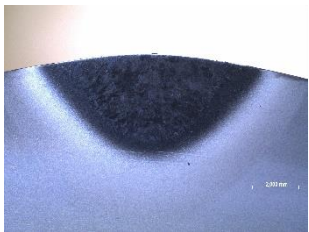
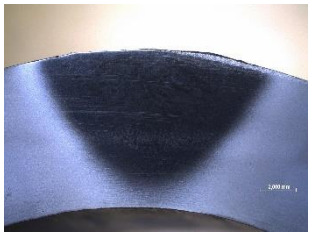


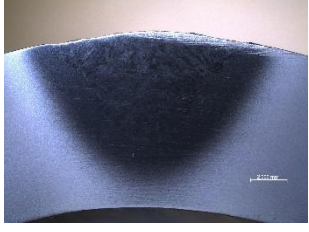
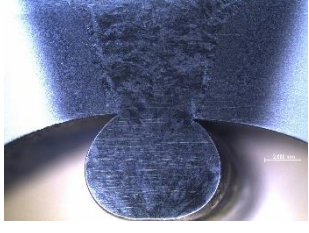
Na slici 56 prikazan je makroizbrusak 1 na kojem su označene mjerene veličine (širina zone taljenja, dubina zone taljenja i širina zone utjecaja topline).

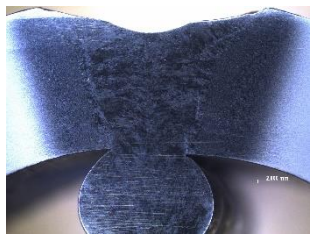
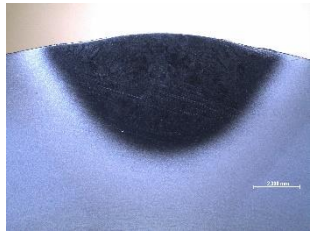



Slika 56. Makroizbrusak 1 s označenim mjeranim veličinama (širina zone taljenja, dubina zone taljenja i širina zone utjecaja topline)

Izgledi makroizbrusaka kao i izmjerene vrijednosti širine zone taljenja, dubine zone taljenja i širine zone utjecaja topline prikazane su u tablici 18.

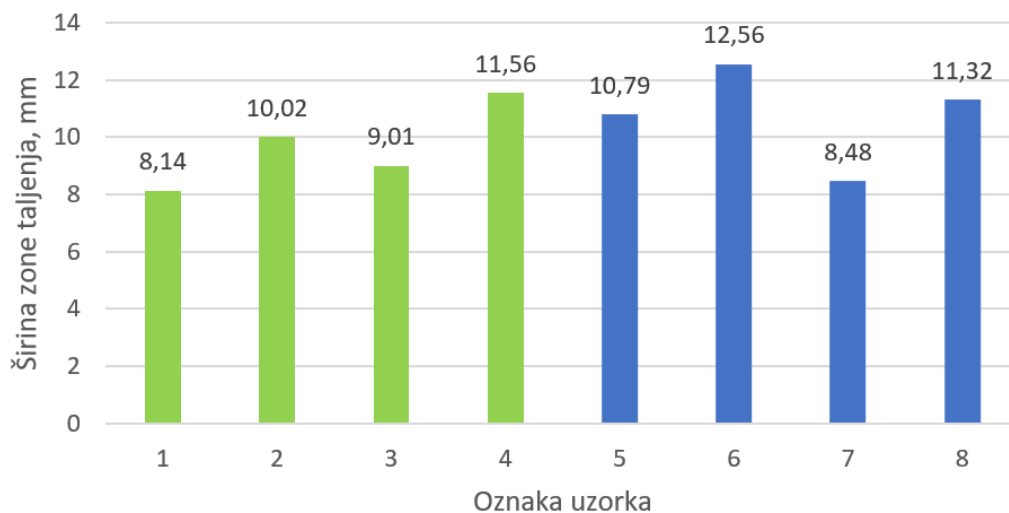
Tablica 18. Geometrijska analiza makroizbrusaka

| Oznaka uzorka | Uzorak | Širina zone taljenja, mm | Dubina zone taljenja, mm | Širina zone utjecaja topline, mm |
|---------------|---|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 1 |  | 8,14 | 3,97 | 0,76 |
| 2 |  | 10,02 | 5,81 | 1,37 |
| 3 |  | 9,01 | 4,52 | 1,11 |
| 4 |  | 11,56 | 7,67 | 1,92 |
| 5 |  | 10,79 | 6,31 | 1,70 |
| 6 |  | 12,56 | 12,15 | 2,70 |

| | | | | |
|---|---|-------|------|------|
| |  | | | |
| 7 |  | 8,48 | 4,48 | 1,05 |
| 8 |  | 11,32 | 7,35 | 1,26 |

Potrebno je naglasiti da određene vrijednosti u tablici 18 mogu odstupati zbog mjeriteljeve neobjektivnosti i nemogućnosti preciznog mjerenja. No, odstupanja su u ovom slučaju zanemariva.

Na slici 57 grafički su prikazani iznosi širina zone taljenja za svaki uzorak.

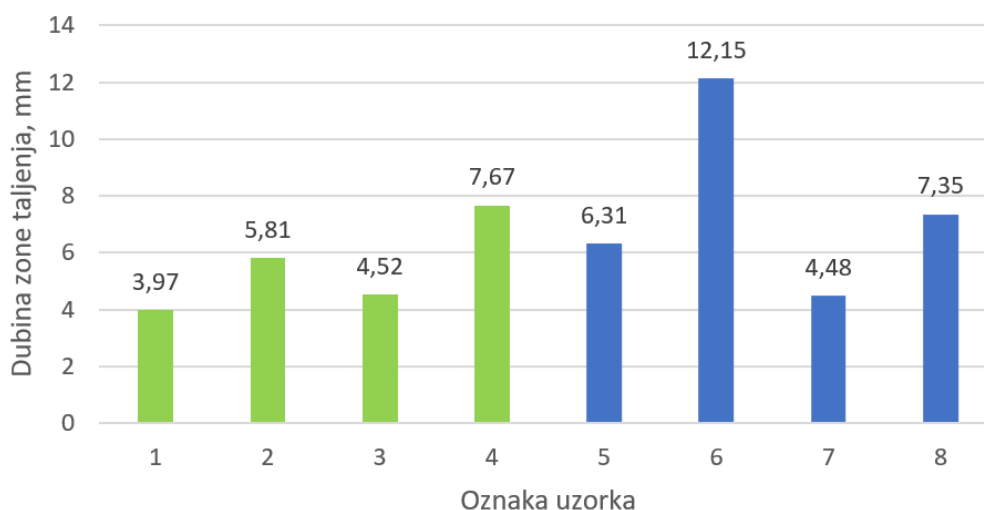


Slika 57. Usporedba širina zone taljenja za svaki uzorak pojedinačno (zelenom bojom označeni su uzorci protaljivani pod zaštitom 100 % Ar, a plavom bojom uzorci protaljivani pod zaštitom 85 % Ar / 15 % He)

Širina zone taljenja je, za istu vrijednost jakosti struje, veća kod uzoraka protaljivanih pod zaštitom plinske mješavine 85 % Ar / 15 % He u odnosu na uzorke protaljivane pod zaštitom 100 % Ar. Uspoređivani su uzorci istog iznosa jakosti struje i uzorci koji nisu predgrijavani ili

su predgrijavani na temperaturu od 250 °C. Uzorak 1 i uzorak 7 nisu predgrijavani i protaljavani su pri iznosu jakosti struje od 150 A. Jedina razlika prilikom protaljivanja uzoraka 1 i 7 bila je promjena zaštitnog plina (100 % Ar i plinska mješavina 85 % Ar / 15 % He). Postotno povećanje vrijednosti širine zone taljenja kod uzoraka 1 i 7 iznosi 4,18 %. Nadalje, uzorci 2 i 8 nisu predgrijavani i protaljavani su pri iznosu jakosti struje od 200 A. Razlika prilikom protaljivanja uzoraka 2 i 8 bila je jedino promjena zaštitnog plina. Postotno povećanje vrijednosti širine zone taljenja kod uzoraka 2 i 8 iznosi 12,97 %. Uzorci 3 i 5 predgrijavani su i protaljavani pri iznosu jakosti struje od 150 A. Također, protaljivanje uzoraka 3 i 5 odvijano je pod zaštitom različitih plinova. Postotno povećanje vrijednosti širine zone taljenja kod uzoraka 3 i 5 iznosi 19,76 %. Naposljetku, uzorci 4 i 6 predgrijavani su i protaljavani pri iznosu jakosti struje od 200 A. Pritom je protaljivanje odvijano pod zaštitom različitih plinova. Postotno povećanje vrijednosti širine zone taljenja kod uzoraka 4 i 6 iznosi 8,65 %.

Na slici 58 grafički su prikazani iznosi dubina zone taljenja za svaki uzorak.

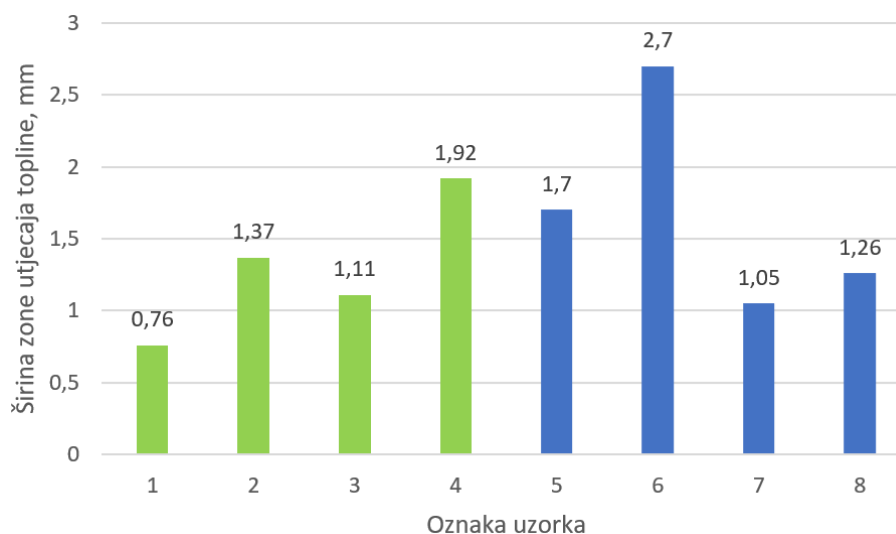


Slika 58. Usporedba dubina zone taljenja za svaki uzorak pojedinačno (zelenom bojom označeni su uzorci protaljavani pod zaštitom 100 % Ar, a plavom bojom uzorci protaljavani pod zaštitom 85 % Ar / 15 % He)

Dubina zone taljenja veća je, za istu vrijednost jakosti struje, kod uzoraka protaljivanih pod zaštitom plinske mješavine u odnosu na čisti argon. Uspoređivani su uzorci istog iznosa jakosti struje i uzorci koji nisu predgrijavani ili su predgrijavani na temperaturu od 250 °C. Uzorak 1 i uzorak 7 nisu predgrijavani i protaljavani su pri iznosu jakosti struje od 150 A. Jedina razlika prilikom protaljivanja uzoraka 1 i 7 bila je promjena zaštitnog plina (100 % Ar i plinska mješavina 85 % Ar / 15 % He). Postotno povećanje vrijednosti dubine zone taljenja kod uzoraka 1 i 7 iznosi 12,85 %. Nadalje, uzorci 2 i 8 nisu predgrijavani i protaljavani su pri iznosu jakosti struje od 200 A. Razlika prilikom protaljivanja uzoraka 2 i 8 bila je jedino promjena zaštitnog

plina. Postotno povećanje vrijednosti dubine zone taljenja kod uzoraka 2 i 8 iznosi 26,51 %. Uzorci 3 i 5 predgrijavani su i protaljivani pri iznosu jakosti struje od 150 A. Također, protaljivanje uzoraka 3 i 5 odvijano je pod zaštitom različitih plinova. Postotno povećanje vrijednosti dubine zone taljenja kod uzoraka 3 i 5 iznosi 39,60 %. Naposljetku, uzorci 4 i 6 predgrijavani su i protaljivani pri iznosu jakosti struje od 200 A. Pritom je protaljivanje odvijano pod zaštitom različitih plinova. Postotno povećanje vrijednosti dubine zone taljenja kod uzoraka 4 i 6 iznosi 58,41 %.

Na slici 59 grafički su prikazani iznosi širina zone utjecaja topline za svaki uzorak.



Slika 59. Usporedba širina zone utjecaja topline za svaki uzorak pojedinačno (zelenom bojom označeni su uzorci protaljivani pod zaštitom 100 % Ar, a plavom bojom uzorci protaljivani pod zaštitom 85 % Ar / 15 % He)

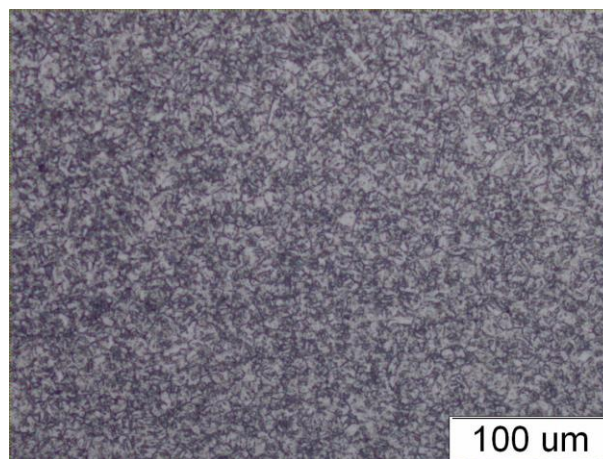
Širina zone utjecaja topline je, za istu vrijednost jakosti struje, veća kod uzoraka protaljivanih pod zaštitom plinske mješavine 85 % Ar / 15 % He u odnosu na uzorke protaljivane pod zaštitom 100 % Ar. Uspoređivani su uzorci istog iznosa jakosti struje i uzorci koji nisu predgrijavani ili su predgrijavani na temperaturu od 250 °C. Uzorci 1 i 7 nisu predgrijavani i protaljivani su pri iznosu jakosti struje od 150 A. Jedina razlika prilikom protaljivanja uzoraka 1 i 7 bila je promjena zaštitnog plina (100 % Ar i plinska mješavina 85 % Ar / 15 % He). Postotno povećanje vrijednosti širine zone utjecaja topline kod uzoraka 1 i 7 iznosi 38,16 %. Nadalje, uzorci 2 i 8 nisu predgrijavani i protaljivani su pri iznosu jakosti struje od 200 A. Razlika prilikom protaljivanja uzoraka 2 i 8 bila je jedino promjena zaštitnog plina. Iznimno analizom rezultata izračunato je postotno smanjenje vrijednosti širine zone utjecaja topline kod uzoraka 2 i 8 koje iznosi 23,36 %. Uzorci 3 i 5 predgrijavani su i protaljivani pri iznosu jakosti struje od 150 A. Također, protaljivanje uzoraka 3 i 5 odvijano je pod zaštitom različitih plinova. Postotno povećanje vrijednosti širine zone utjecaja topline kod uzoraka 3 i 5 iznosi 53,15 %.

Naposljetku, uzorci 4 i 6 predgrijavani su i protaljivani pri iznosu jakosti struje od 200 A. Pritom je protaljivanje odvijano pod zaštitom različitih plinova. Postotno povećanje vrijednosti širine zone utjecaja topline kod uzoraka 4 i 6 iznosi 40,63 %.

5.7. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture makroizbrusaka provedena je svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51 u Laboratoriju za metalografiju. Uvećanje mikroskopa je u rasponu od 50 do 1000 puta i navedeni mikroskop ima sposobnost razlučivanja mikrostrukturnih dijelova do 0,2 μm . Na makroizbruscima promatrana je mikrostruktura u tri područja. Analizirana je mikrostruktura osnovnog materijala (čelika P91), zone utjecaja topline i zone taljenja.

Na slici 60 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala (čelika P91).

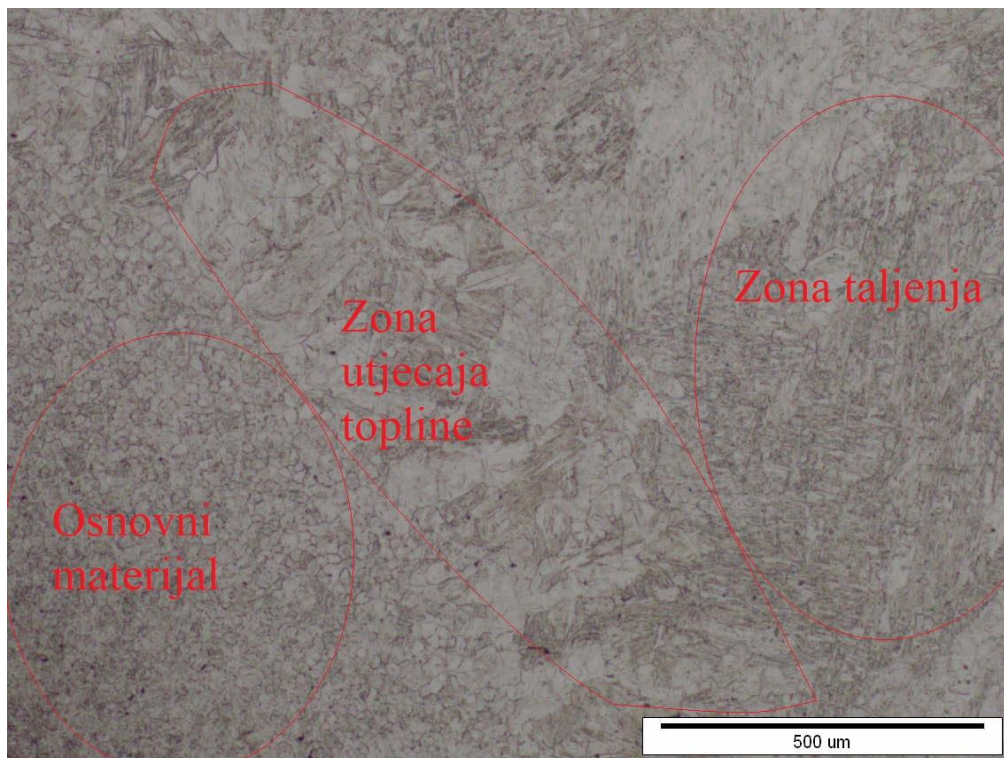


Slika 60. Mikrostruktura osnovnog materijala (čelik P91), povećanje 100x

Promatrajući mikrostrukturu osnovnog materijala vidljiva je struktura popuštenog martenzita. U teorijskom dijelu ovoga rada navedeno je da mikrostrukturu čelika P91 čini struktura popuštenog martenzita s precipitacijom karbida M_{23}C_6 i vanadijem/niobijem obogaćenim karbonitridima. Prisutnost ovih precipitata poboljšava granicu puzanja precipitacijskim očvrnućem te karbidi M_{23}C_6 uglavnom stabiliziraju martenzitnu strukturu.

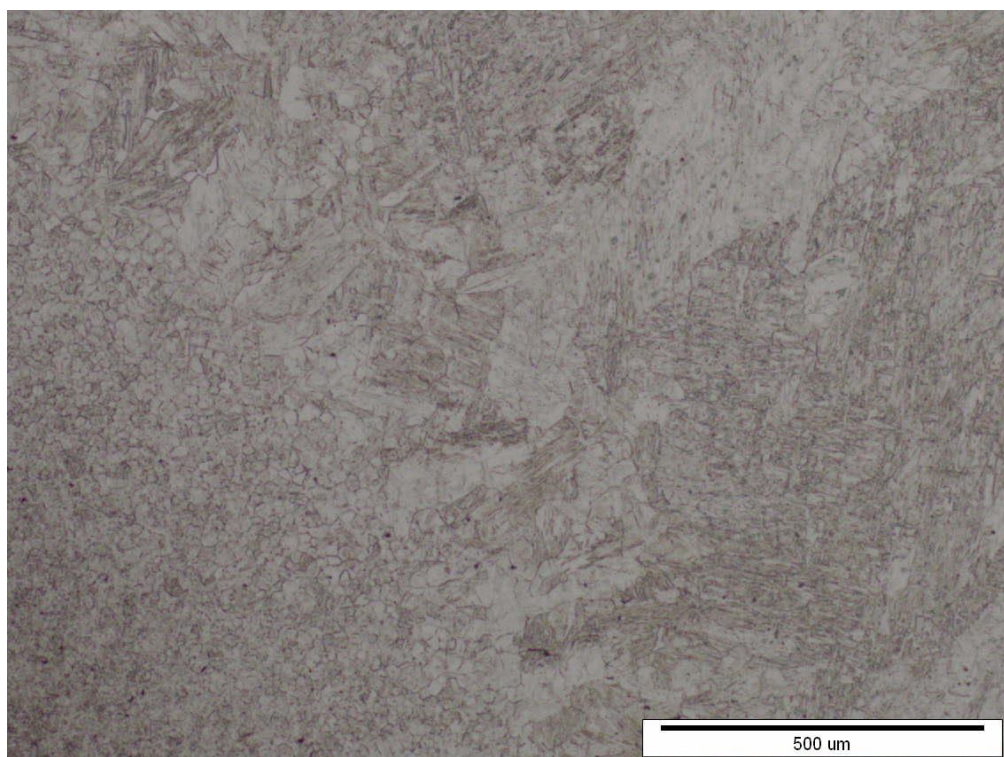
Tijekom protaljivanja dovedena toplina se širi od zone taljenja u osnovni materijal tako da se oko protaljenog dijela formira temperaturno polje. Tako postoji podjela na tri područja prema utjecaju topline: zonu taljenja (ZT), zonu utjecaja topline (ZUT) i osnovni materijal (OM). U zoni taljenja za vrijeme protaljivanja metal je rastaljen te je u zoni taljenja došlo do pojave kristalizacije i skrućivanja.

Na slici 61 označena su navedena područja (zona taljenja, zona utjecaja topline i osnovni materijal) na uzorku 1.

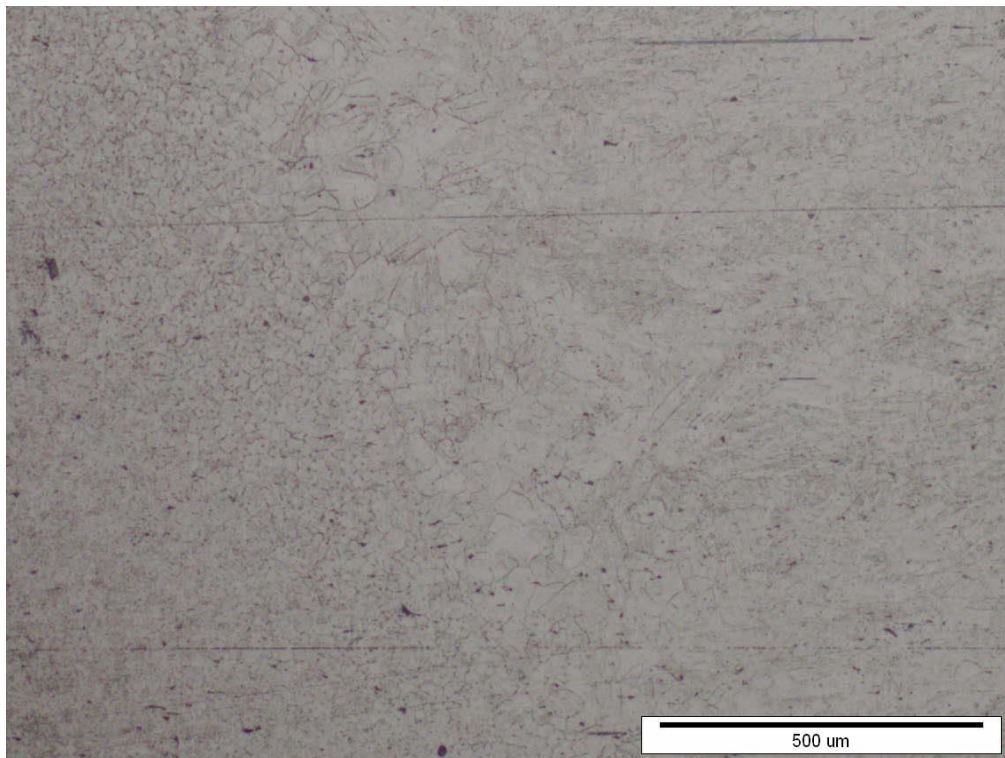


Slika 61. Označena područja promjene mikrostrukture (zona taljenja, zona utjecaja topline i osnovni materijal) na uzorku 1

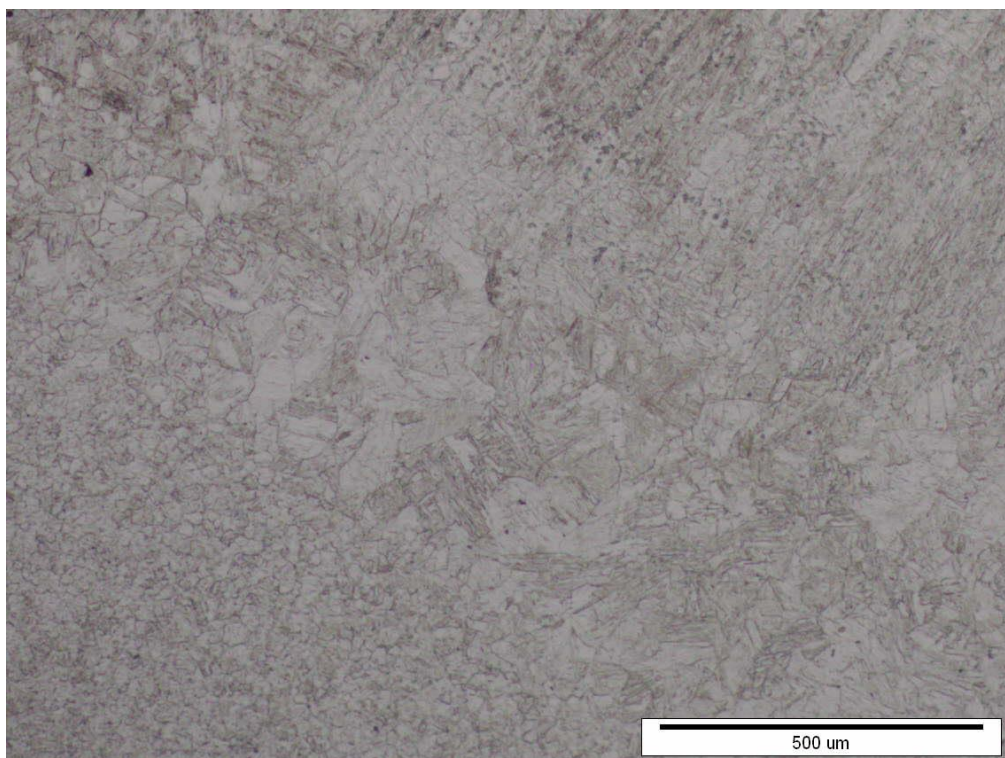
Na slikama 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68 i 69 prikazane su mikrostrukture svakog uzorka u tri navedena područja.



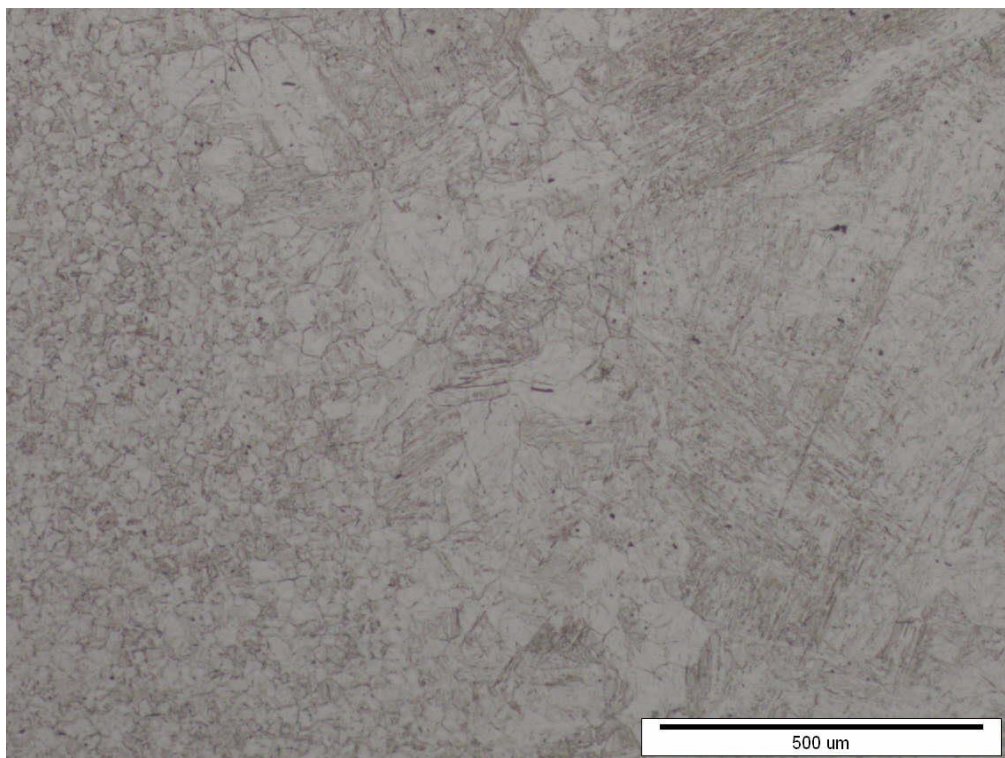
Slika 62. Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 1, povećanje 500x



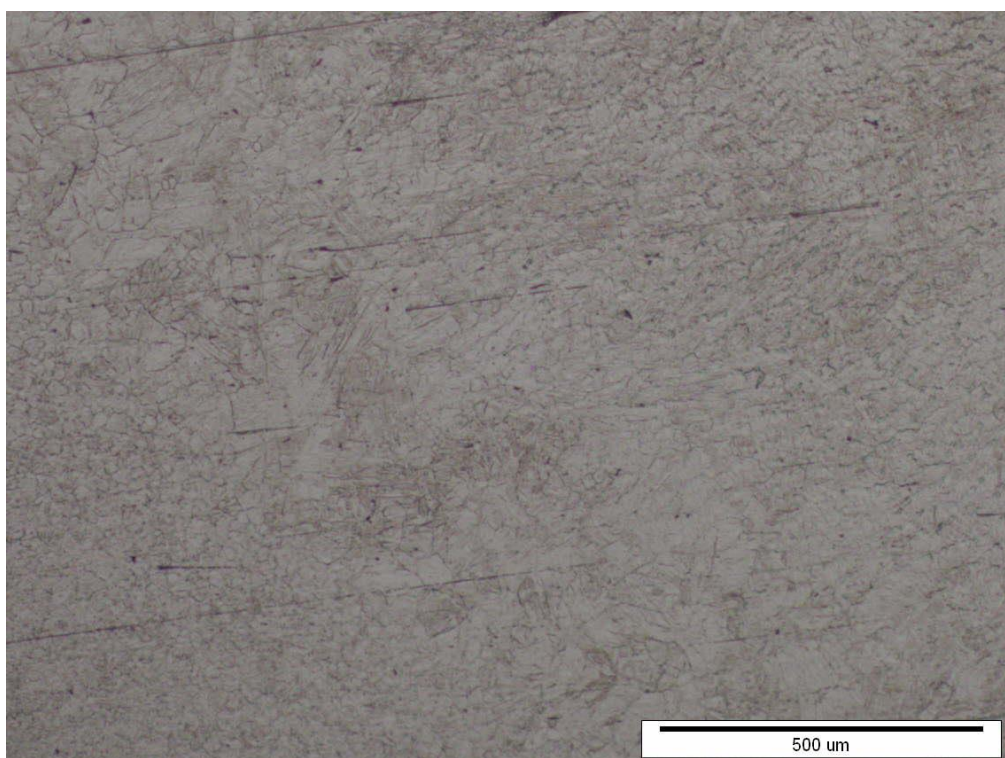
Slika 63. Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 2, povećanje 500x



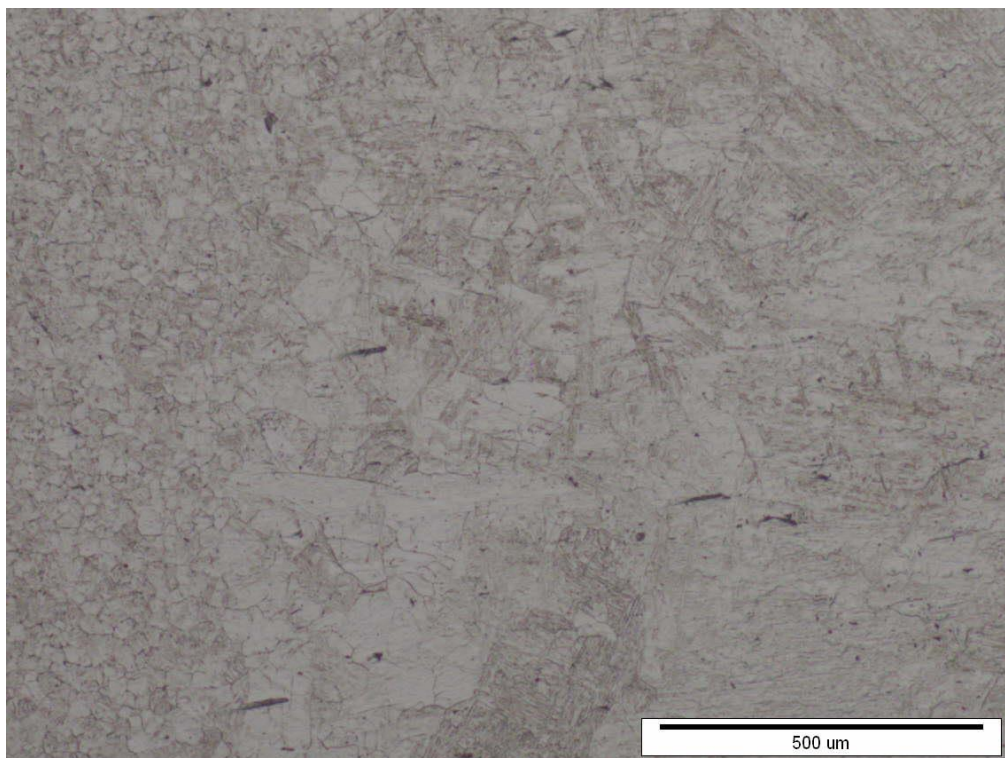
Slika 64. Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 3, povećanje 500x



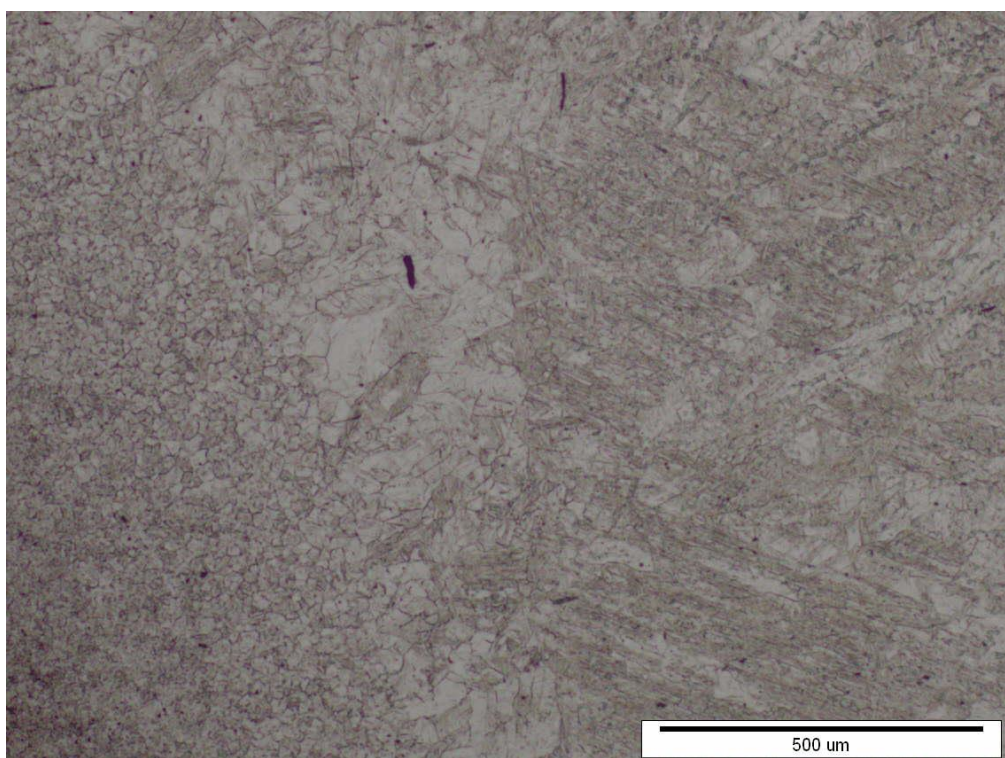
Slika 65. Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 4, povećanje 500x



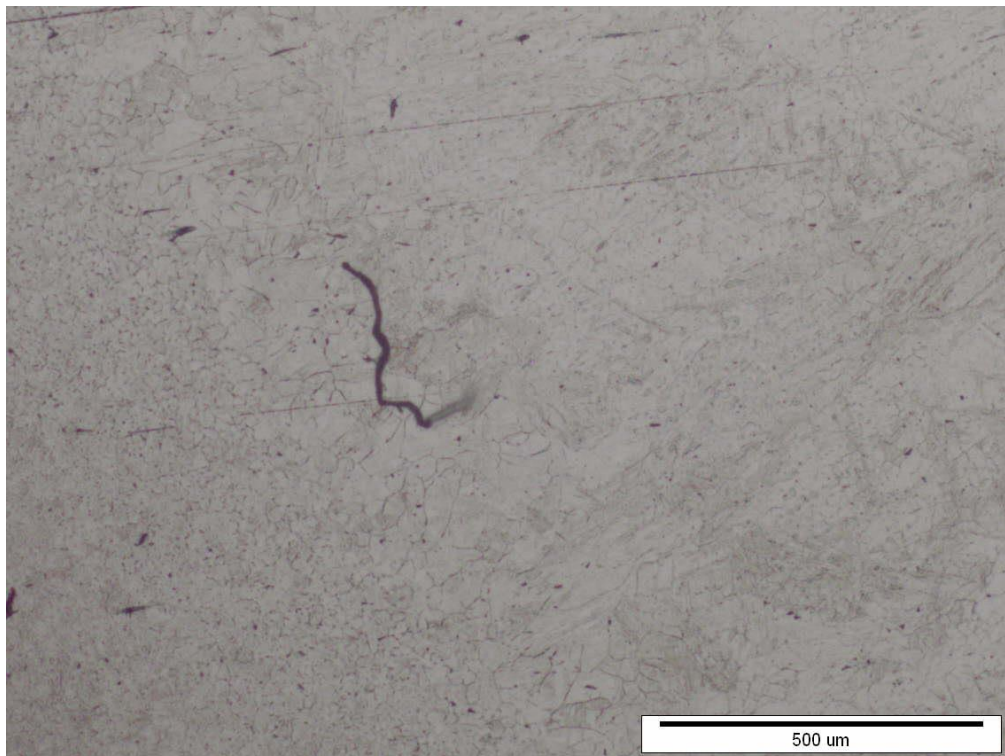
Slika 66. Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 5, povećanje 500x



Slika 67. Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 6, povećanje 500x



Slika 68. Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 7, povećanje 500x



Slika 69. Mikrostruktura karakterističnih dijelova uzorka 8, povećanje 500x

Na svim slikama na kojima je prikazana mikrostruktura vidljiva je mikrostruktura 3 područja (zone taljenja, zone utjecaja topline i osnovnog materijala). Osnovni materijal predstavlja dio spoja u kojem se nisu dogodile niti promjene u strukturi, a time ni promjene mehaničkih svojstava. U osnovnom materijalu moguće je na svim uzorcima primijetiti tipičnu martenzitnu strukturu. Također, na granicama zrna pojavljuju se i karbidi. Radi određivanja točne vrste karbida potrebno je naknadno provesti detaljniju metodu karakterizacije materijala (npr. EDS analizu), koja nije provedena u sklopu eksperimentalnog dijela ovoga rada.

U zoni utjecaja topline došlo je do promjene u strukturi, a vjerojatno i do promjene kemijskog sastava. Vidljive su granice zrna i može se primijetiti da je došlo do pogrubljenja austenitnih zrna u području utjecaja topline na svim uzorcima. Zona utjecaja topline predstavlja područje osnovnog materijala u kojem nije došlo do taljenja osnovnog materijala tijekom protaljivanja, ali je došlo do promjene u strukturi, a time i do promjene mehaničkih svojstava. U zoni utjecaja topline dolazi do promjene usmjerenosti i veličine zrna, što najviše utječe na mehanička svojstva uzorka.

Zona taljenja sastoji se samo od osnovnog materijala i obuhvaća protaljeni dio (dio koji je pri protaljivanju bio potpuno rastaljen). Talina protaljenog dijela se sastoji samo od osnovnog materijala. Daljnjim hlađenjem u zoni taljenja došlo je do strukturnih promjena i izlučivanja faza koje nisu definirane točno daljnjom analizom.

Analizom mikrostrukture svih uzoraka nisu uočene promjene zbog utjecaja različitog unosa topline. Svi uzorci u navedenim zonama pokazuju iste mikrostrukturne promjene.

5.8. Mjerenje tvrdoće

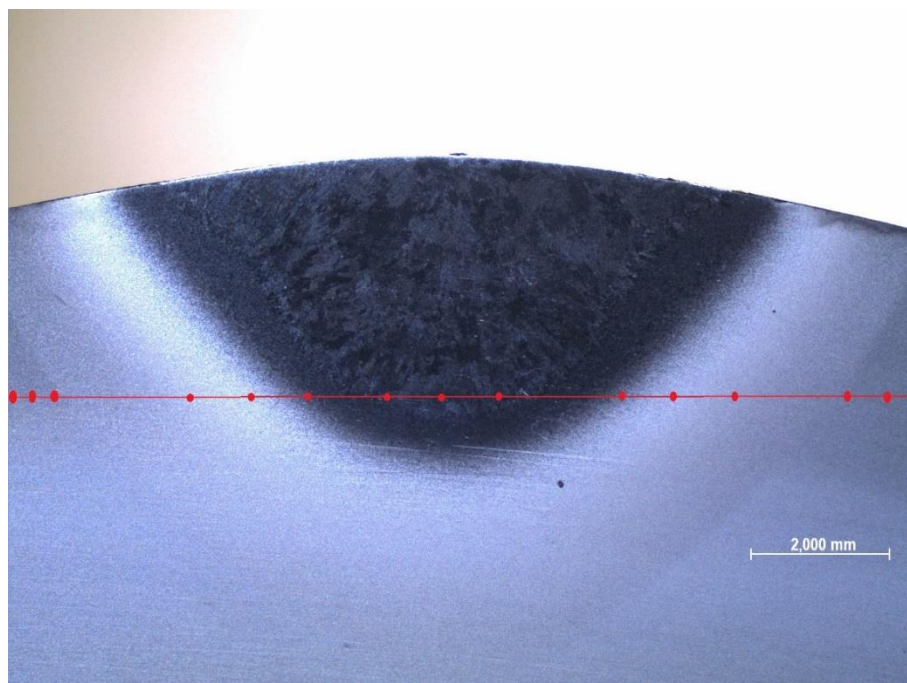
Mjerenje tvrdoće potrebno je izvršiti kako bi se dokazalo jesu li teorijske pretpostavke o iznosima tvrdoća u pojedinim područjima uzoraka točne. Općenito je tvrdoća definirana kao otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog tijela znatno veće tvrdoće. Najčešće je to drugo tijelo dijamant ili neki drugi tvrdi materijal (kaljeni čelik, tvrdi metal). Postoji više metoda mjerenja tvrdoće, a u strojarstvu su tri najčešće (nazvane prema njihovim autorima): Vickers, Brinell i Rockwell.

Na makroizbruscima je mjerena tvrdoća u pojedinim područjima i pri tome je korištena Vickersova metoda (HV10). Prilikom mjerenja tvrdoće ovom metodom koristi se indentor četverostrana dijamantna piramida s vršnim kutem 136° , a opterećenje traje oko 10 sekundi. Rezultat je otisak na makroizbrusku kojeg je potrebno analizirati pomoću mikroskopa tako što se očitava duljina dijagonale otiska. Tvrdoća po Vickersu određuje se pomoću određene duljine dijagonale i očitavanjem iz priložene tablice. Na slici 70 prikazan je uređaj na kojem je provedeno mjerenje tvrdoće.



Slika 70. Uređaj za mjerenje tvrdoće Reichert

Makroizbrusci moraju prije mjerenja tvrdoće biti adekvatno pripremljeni – fino brušeni i polirani. Tako je osigurana refleksija svjetlosti potrebna za mjerenje otiska pomoću mjernog mikroskopa. Na slici 71 prikazan je uzorak 1 na kojem su označena mjerna mjesta na kojima je mjerena tvrdoća svakog uzorka.



Slika 71. Makroizbrusak uzorka 1 s označenim točkama mjerenja tvrdoće

Mjerenja su provedena na svih osam uzoraka tako što je na svakom uzorku napravljeno 15 mjerenja, kako je prikazano na slici 71. U tablici 19 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće na svim uzorcima u pojedinim područjima (osnovnom materijalu (OM), zoni utjecaja topline (ZUT) i zoni taljenja (ZT)). Mjerenje se odvijalo s lijeva na desno gledajući svaki makroizbrusak.

Tablica 19. Rezultati mjerenja tvrdoće

| Uzorak | OM | ZUT | ZT | ZUT | OM |
|--------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | Izmjerena tvrdoća (HV10) | | | | |
| 1 | 243 | 455 | 442 | 417 | 230 |
| | 254 | 437 | 433 | 433 | 219 |
| | 251 | 459 | 450 | 437 | 227 |
| 2 | 274 | 421 | 503 | 473 | 216 |
| | 285 | 519 | 579 | 478 | 221 |
| | 283 | 554 | 542 | 519 | 218 |

| | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| 3 | 224 | 433 | 433 | 425 | 222 |
| | 232 | 425 | 455 | 433 | 224 |
| | 230 | 421 | 442 | 429 | 221 |
| 4 | 287 | 421 | 464 | 478 | 262 |
| | 254 | 437 | 488 | 421 | 258 |
| | 238 | 425 | 493 | 530 | 274 |
| 5 | 281 | 599 | 530 | 519 | 219 |
| | 270 | 464 | 536 | 446 | 227 |
| | 262 | 459 | 530 | 498 | 221 |
| 6 | 459 | 397 | 464 | 548 | 498 |
| | 455 | 508 | 572 | 606 | 503 |
| | 464 | 536 | 579 | 536 | 493 |
| 7 | 285 | 413 | 579 | 425 | 283 |
| | 283 | 525 | 642 | 548 | 281 |
| | 287 | 530 | 649 | 536 | 266 |
| 8 | 218 | 519 | 554 | 488 | 285 |
| | 304 | 508 | 606 | 508 | 299 |
| | 314 | 503 | 657 | 498 | 304 |

Područje osnovnog materijala za svaki uzorak označava zonu koja nije bila pod toplinskim utjecajem tijekom protaljivanja. No, uzorak 6 pokazuje iznimku što je potvrđeno iznosima tvrdoće u osnovnom materijalu. Naime, promatrajući makroizbrusak 6 vidljivo je da je zbog predgrijavanja i većeg iznosa jakosti struje protaljivanja uzorak u većoj mjeri protaljen u odnosu na ostale uzorke. Na uzorku nije bilo moguće pronaći dio koji bi označavao područje osnovnog materijala, odnosno područje koje nije bilo pod toplinskim utjecajem tijekom protaljivanja.

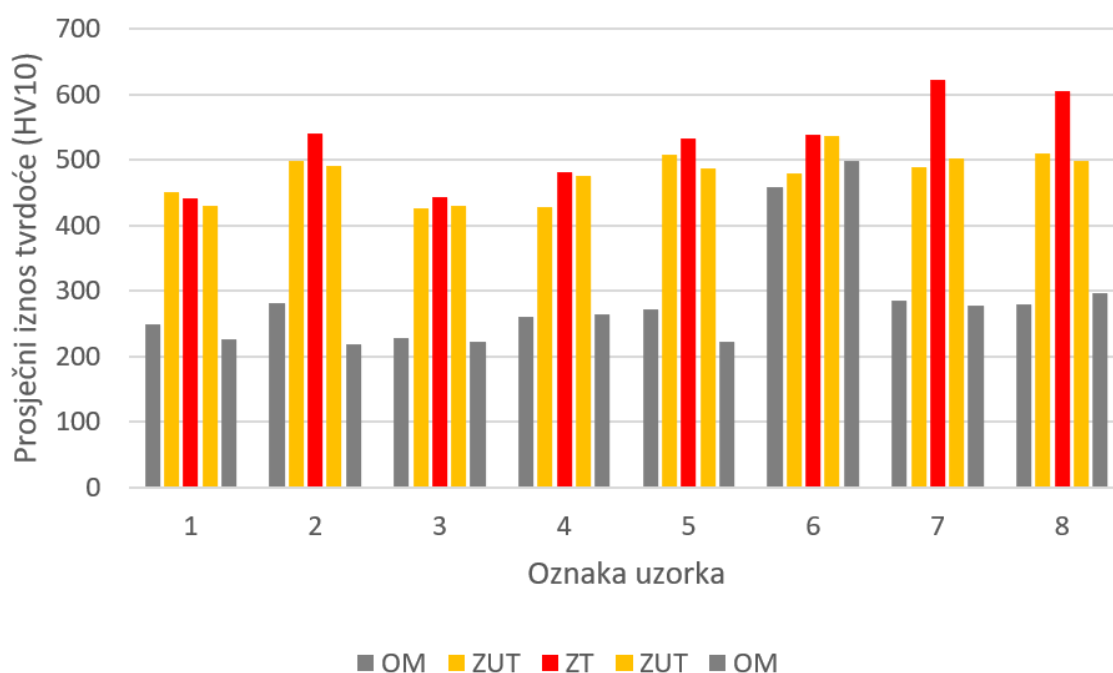
Općenito je vidljivo povećanje tvrdoće metala s približavanjem središnjem dijelu uzorka. Uzorci protaljivani pod zaštitom plinske mješavine 85 % Ar / 15 % He imaju veću tvrdoću u zoni taljenja i u zoni utjecaja topline.

U tablici 20 prikazane su prosječne vrijednosti tvrdoće za svako područje svakog uzorka.

Tablica 20. Prosječne vrijednosti tvrdoće za svako područje svakog uzorka

| Uzorak | OM | ZUT | ZT | ZUT | OM |
|--------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Prosječni iznos tvrdoće (HV10) | | | | |
| 1 | 249,3 | 450,3 | 441,7 | 429 | 225,3 |
| 2 | 280,7 | 498 | 541,3 | 490 | 218,3 |
| 3 | 228,7 | 426,3 | 443,3 | 429 | 222,3 |
| 4 | 259,7 | 427,7 | 481,7 | 476,3 | 264,7 |
| 5 | 271 | 507,3 | 532 | 487,7 | 222,3 |
| 6 | 459,3 | 480,3 | 538,3 | 536,3 | 498 |
| 7 | 285 | 489,3 | 623,3 | 503 | 276,7 |
| 8 | 278,7 | 510 | 605,7 | 498 | 296 |

Na slici 72 grafički su prikazani prosječni iznosi tvrdoća za svako područje svakog uzorka.

**Slika 72. Usporedba prosječnih iznosa tvrdoće za svako područje svakog uzorka**

Rezultati mjerenja poklapaju se s teorijskim pretpostavkama tako što dijelovi uzorka pokazuju veću tvrdoću na dijelovima koji su bili izloženiji utjecaju topline. Dakle, protaljivanjem čelika P91 utječe se na njegova svojstva, što se između ostaloga očituje kroz povećanje tvrdoće. Analizom prosječnih iznosa tvrdoće za svako područje svakog uzorka moguće je zaključiti da je tvrdoća veća kod uzorka protaljivanih s većim unosom topline i kod uzorka protaljivanih pod zaštitom plinske mješavine 85 % Ar / 15 % He.

Prema normi HRN EN ISO 15614-1:2017 vrijednosti tvrdoća u zoni taljenja nakon provedene adekvatne naknadne toplinske obrade trebaju biti manje od 350 HV10 [26]. Normom nije određena granična vrijednost tvrdoće koju uzorak ne smije prijeći kad uzorak nije podvrgnut naknadnoj toplinskoj obradi, što govori da je naknadna toplinska obrada obavezna na uzorcima od čelika P91. Kada bi se uzorci testirani ovim eksperimentalnim radom podvrgnuli naknadnoj toplinskoj obradi, došlo bi do smanjenja iznosa tvrdoće u zoni taljenja i zoni utjecaja topline. Naknadna toplinska obrada se općenito nastoji izbjeći kako bi se smanjili troškovi obrade.

6. ZAKLJUČAK

Suvremeni materijali za izradu dijelova u kotlogradnji pružaju više mogućnosti zadovoljenja zahtijevanih radnih parametara i efikasnije pretvaranje energije. Među tim materijalima ubraja se i martenzitni čelik P91. Brojne su prednosti ovog materijala, a neka svojstva analizirana su eksperimentalnim dijelom ovog rada.

Eksperimentalnim radom željelo se provjeriti kakav učinak na čelik P91 ima primjena pojedinih zaštitnih plinova (100 % Ar i plinske mješavine 85 % Ar / 15 % He) te kako temperatura predgrijavanja i različit unos topline utječu na strukturu čelika P91. Rezultat prethodnog predgrijavanja uzoraka i većeg unosa topline je veće protaljivanje uzoraka. Vidljivo je da su uzorci koji su protaljivani pod zaštitom plinske mješavine 85 % Ar / 15 % He više protaljeni u odnosu na uzorke protaljivane pod zaštitom 100 % Ar. Na svakom uzorku vidljiva je geometrija protaljenog dijela uzorka, zona taljenja osnovnog materijala i moguće je vidjeti intenzitet taljenja. Širina i dubina zone taljenja veće su kod uzoraka protaljivanih pod zaštitom plinske mješavine 85 % Ar / 15 % He za istu vrijednost jakosti struje u odnosu na 100 % Ar. Također, širina zone utjecaja topline veća je kod uzoraka protaljivanih pod zaštitom plinske mješavine za istu vrijednost jakosti struje u odnosu na čisti argon. Na analiziranim uzorcima nije došlo do nastanka greški prilikom protaljivanja i na većini uzoraka postignut je adekvatan estetski izgled (izuzev uzorka 6 koji je bio podvrgnut temperaturi predgrijavanja i visokom unosu topline pa je tako promatran kao granični slučaj).

Analizirajući mikrostrukturu uzoraka moguće je uočiti 3 područja (zonu taljenja, zonu utjecaja topline i osnovni materijal) koja imaju različitu mikrostrukturu te kod svih uzoraka nisu uočene promjene zbog utjecaja različitog unosa topline. Svi uzorci u navedenim zonama pokazuju iste mikrostrukturne promjene.

Mjerenjem tvrdoće dobiveni su rezultati koji se poklapaju s teorijskim pretpostavkama tako što dijelovi uzoraka pokazuju veću tvrdoću na dijelovima koji su bili izloženi utjecaju topline (u zoni taljenja i zoni utjecaja topline). Čelik P91 prilikom protaljivanja mijenja svojstva, što se između ostalog očituje kroz povećanje tvrdoće. Također, uzorci protaljivani pod zaštitom plinske mješavine pokazuju veće iznose tvrdoća u zoni taljenja i zoni utjecaja topline. Predgrijavanje, velik unos topline i korištenje plinske mješavine 85 % Ar / 15 % He utječu na povećanje iznosa tvrdoće. Bitno je primijetiti da se nakon postupka protaljivanja nije provodila naknadna toplinska obrada koja je zahtijevana normom. Naknadnom toplinskom obradom iznosi tvrdoće uzoraka manje bi varirali, odnosno iznosi bi bili manji po zonama uzorka. Iako

se zbog uštede želi izbjeći naknadna toplinska obrada, potrebno ju je provesti kako bi se smanjila tvrdoća.

Zaključno, prilikom zavarivanja čelika P91 potrebno je obratiti pažnju na utjecaj temperature predgrijavanja, unosa topline i utjecaj zaštitnog plina. Veći unos topline postiže se predgrijavanjem, povišenjem iznosa struje za 50 A i korištenjem zaštitnog plina 85 % Ar / 15 % He.

Kako bi se smanjio unos topline postignut prilikom zavarivanja čelika P91 TIG postupkom, a pritom potencijalno izbjegla naknadna toplinska obrada, moguće je u budućnosti primijeniti neku drugu inačicu TIG postupka, kao što su visokofrekventni impulsni TIG postupak, TIP TIG zavarivanje, A-TIG postupak... Nekom od navedenih varijanti TIG zavarivanja moguće je postići poželjni manji unos topline uz zadržavanje produktivnosti, visoku kvalitetu zavara, dobar estetski izgled i geometriju zavara.

LITERATURA

- [1] Ćorić, D.: Posebni metalni materijali, III dio, Nastavna literatura Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [2] Filetin, T., Kovačićek, F., Indol, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [3] Novosel, M., Krumes, D.: Posebni čelici, Sveučilište J. J. Strossmayer u Osijeku, 1998.
- [4] Haarmann, K., Vaillant, J. C., Vandenberghe, B.: The T91/P91 Book, Vallourec & Mannesmann tubes, 2008.
- [5] Kožuh, S.: Specijalni čelici, skripta, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [6] Despotović, B., Marsenić, T., Bajić, D., Vuherer, T., Samardžić, I.: Zavarljivost suvremenih 9 – 12 Cr martenzitnih čelika za komponente u kotlogradnji, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 2013., str. 5-14
- [7] Zavarivanje i navarivanje visokolegiranih feritnih (F), martenzitnih (M) i austenitnih (A) čelika. Strojarški fakultet Slavonski Brod. URL: <http://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/visoko.pdf>; dostupno: 10.9.2020.
- [8] Meet the Demanding Requirements of Welding P91 Pipe With Advanced Wire Processes. Miller Electric. URL: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/meet-the-requirements-of-welding-p91-pipe-with-wire-processes>; dostupno: 10.9.2020.
- [9] Low X-Factor. Lincoln Electric. URL: <https://www.lincolnelectric.com/en-gb/support/process-and-theory/Pages/low-x-factor-detail.aspx>; dostupno: 10.9.2020.
- [10] Mayr, P.: Evolution of microstructure and mechanical properties of the heat affected zone in B-containing 9 % chromium steels, doktorski rad, Fakultet strojarstva, Graz, 2007.
- [11] Zone zavarenog spoja (Z): zona taljenja (ZT), zona utjecaja topline (ZUT). Strojarški fakultet Slavonski Brod. URL: http://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/zt_zu.html; dostupno: 21.10.2020.
- [12] Silva, F. J. G., Pinho, A. P., Pereira, A. B., Paiva, O. C.: Evaluation of Welded Joints in P91 Steel under Different Heat-Treatment Conditions, Metals, MDPI, 2020.
- [13] Vuherer, T., Gliha, V., Milović, Lj., Dunđer, M., Samardžić, I.: Upute za zavarivanje i pregled čelika za opremu energetskih postrojenja te mogućnosti korištenja simulacija u ZUT-u za unaprjeđenje kvalitete zavara, 6. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje, SBZ 2011, Slavonski Brod, 2011.

- [14] Milović, Lj.: Significance of cracks in the heat-affected zone of steels for elevated temperature application, *Structural integrity and life*, 2008., str. 55-64
- [15] Horvat, M., Bilić, M., Kondić, V.: Primjena REL zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, *Technical journal* 7, 2013., str. 132-137
- [16] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D.: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, *Technical journal* 8, 2014., str. 426-432
- [17] Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [18] Kralj, S.: Skripta za učenje iz kolegija Zavarivanje 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [19] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: Zavarivački i srodni postupci – priručnik, Zagreb, 2015.
- [20] Ručno elektrolučno zavarivanje (REL). Strojarski fakultet Slavonski Brod. URL: <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/postupci1.pdf>; dostupno: 13.9.2020.
- [21] MagicWave 230i. Fronius. URL: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/tig/magicwave/magicwave-230i>; dostupno: 3.11.2020.
- [22] Živčić, M.: Zavarivanje 1/2/3 85g., časopis, TIG zavarivanje, Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, FSB, Zagreb, 1985.
- [23] 568 Contact & Infrared Temp Gun. Fluke. URL: <https://www.fluke.com/en-us/product/temperature-measurement/ir-thermometers/fluke-568>; dostupno: 3.11.2020.
- [24] Plinovi za zavarivanje. Messer. URL: <https://www.messer.hr/plinovi-rezanje-zavarivanje>; dostupno: 3.11.2020.
- [25] HRN EN ISO 1011-1:1999/A2:2007 Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće upute za električno zavarivanje
- [26] HRN EN ISO 15614-1:2017/A1:2019 Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla

PRILOZI

I. CD-R disc