Primjena mješavine Ar-He pri zavarivanju čelika P91

Jurgec, Kristijan

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:357912

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Kristijan Jurgec

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Kristijan Jurgec

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Ivici Garašiću na pruženom povjerenju, stručnim savjetima i pomoći u izradi ovog rada.

Također se zahvaljujem dr. sc. Maji Jurici na konstantnoj pomoći i korisnim savjetima pri realizaciji ovog rada bez čije pomoći bi njegova izrada bila znatno teža.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na ukazanom povjerenju, podršci i strpljenju tijekom studiranja.

Kristijan Jurgec

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **KRISTIJAN JURGEC** Mat. br.: 0035193774

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena mješavine Ar-He pri zavarivanju čelika P91**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of Ar-He shielding gas mixture for welding of P91 steel**

Opis zadatka:

Na temelju literature detaljno obrazložiti problematiku zavarivanja 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 parametre zavarivanja za odgovarajuću geometriju spoja komponenti od čelika P91. Za odabrani dodatni materijal i mješavinu argona i helija definirati prikladne parametre zavarivanja. Na zavarenom uzorku je potrebno provesti razorna i/ili nerazorna ispitivanja te u konačnici ocijeniti kvalitetu i svojstva dobivenog zavarenog spoja primjenom odabrane tehnologije.

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

Zadatak zadan:
02. svibnja 2019.

Rok predaje rada:
04. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane:
10. srpnja 2019.
11. srpnja 2019.
12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS KRATICA VI
POPIS OZNAKA VII
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
2. IZBOR MATERIJALA 2
2.1. Zahtjevi na materijale i kriteriji izbora materijala 2
2.2. Zavarljivost materijala 3
3. METALNI MATERIJALI ZA RAD NA POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA 6
3.1. Promjene svojstava materijala pri povišenim temperaturama 8
3.1.1. Puzanje materijala 8
3.1.2. Druge pojave vezane uz mehanička svojstva pri povišenim i visokim temperaturama 10
3.1.3. Izbor materijala za rad na povišenim temperaturama 12
4. ČELICI ZA RAD PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA 14
4.1. Ugljični čelici 14
4.2. Niskolegirani čelici 14
4.3. Visokolegirani martenzitni čelici 15
4.4. Visokolegirani austenitni čelici 16
5. VISOKOLEGIRANI MARTENZITNI ČELICI P91 ZA RAD NA VISOKIM TEMPERATURAMA 17
5.1. Svojstva čelika P91 17
5.1.1. Puzanje čelika P91 19
5.1.2. Mikrostruktura čelika P91 20
6. ZAVARIVANJE ČELIKA P91 22
6.1. Utjecaj zavarivanja na strukturne transformacije u zoni utjecaja topline 22
6.2. Pukotine kod zavarivanja čelika P91 24
6.3. Toplinska obrada čelika P91 26
6.3.1. Predgrijavanje 26
6.3.2. Održavanje međuprolazne temperature 27
6.3.3. Naknadna toplinska obrada 27
6.4. Dodatni materijali za zavarivanje čelika P91 29
7. POSTUPCI ZAVARIVANJA 30
7.1. REL postupak zavarivanja 30
7.2. Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška 32
7.3. MIG/MAG postupak zavarivanja 34

7.4. TIG postupak zavarivanja 36
7.4.1. Princip i oprema kod TIG postupka zavarivanja 37
7.4.2. Zaštitni plinovi kod TIG postupka zavarivanja 39
7.4.3. Modificirane verzije TIG zavarivanja 41
7.4.4. Utjecaj vrste struje i polariteta elektrode na TIG zavarivanje 43
7.4.5. Primjena TIG postupka zavarivanja 44
8. EKSPERIMENTALNI RAD 45
8.1. Oprema za zavarivanje 45
8.2. Osnovni i dodatni materijal 47
8.3. Postupak zavarivanja cijevi čelika P91 49
8.4. Toplinska obrada uzorka 54
8.5. Radiografska kontrola zavarenih spojeva 56
8.6. Analiza makrostrukture 59
8.7. Mjerenje tvrdoće 61
8.8. Statičko vlačno ispitivanje 64
9. ZAKLJUČAK 68
LITERATURA 70
PRILOZI 72

POPIS SLIKA

Slika 1. Utjecajni čimbenici na zavarljivost [2] 5
Slika 2. Parni kotao [4] 6
Slika 3. Dijagrami σ-ε i "zakrenuti" dijagrami puzanja za dvije povišene temperature ispitivanja za isti kotlovski čelik [5] 8
Slika 4. Dijagram puzanja [5] 9
Slika 5. Promjene mehaničkih svojstava u ovisnosti o temperaturi [1] 11
Slika 6. Promjena savojne dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika X10NiCrWTi36-15 s povišenjem temperature [1] 11
Slika 7. Ovisnost karakteristika mehaničke otpornosti o temperaturi za dvije vrste čelika [1] 12
Slika 8. Smanjenje debljine stijenke cijevi parovoda primjenom novih materijala 18
Slika 9. Puzanje čelika P91 [10] 19
Slika 10. Mikrostruktura čelika P91 [10] 20
Slika 11. CCT dijagram za čelik P91 [8] 20
Slika 12. Mikrostruktura čelika P91 [10] 21
Slika 13. Osnovna područja zavarenog spoja [13] 22
Slika 14. Promjene u strukturi kod zavarivanja čelika P91 [14] 23
Slika 15. Shematski prikaz mogućih orijentacija i lokacija pukotina kod zavarenih spojeva čelika P91 [16] 25
Slika 16. Pukotine na cijevima pregrijača izrađenim od čelika P91 [16] 25
Slika 17. Shematski prikaz toplinske obrade čelika P91 prije, za vrijeme i nakon zavarivanja [8] 28
Slika 18. Shematski prikaz REL postupka zavarivanja [19] 30
Slika 19. Shema elektrolučnog zavarivanja pod zaštitom praška (EPP) [19] 33
Slika 20. Shematski prikaz procesa i uređaja MIG/MAG zavarivanja [19] 34
Slika 21. Shematski prikaz uređaja za TIG zavarivanje [19] 37
Slika 22. Shematski prikaz zavarivanja TIG postupkom 38
Slika 23. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja 40
Slika 24. Koncept i tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja [27] 42
Slika 25. Uređaj za zavarivanje Fronius MagicWawe 2200 Job G/F 45
Slika 26. Infracrveni termometar Fluke 568 [29] 46
Slika 27. Izgled cijevi prije zavarivanja 47
Slika 28. Čelične boce s korištenim zaštitnim plinovima 48
Slika 29. priprema spoja [31] 49
Slika 30. Izgled spoja s prolazima 49
Slika 31. Zaštita korijena zavara kod spoja cijevi [32] 50
Slika 32. Izvedba zaštite korijena 50
Slika 33. Zavarivanje cijevi od čelika P91 51
Slika 34. Položaj pištolja i žice kod ručnog TIG postupka [19] 51
Slika 35. Mjerenje međuprolazne temperature 53
Slika 36. Uzorci nakon zavarivanja 53
Slika 37. Oprema za provođenje toplinske obrade 54
Slika 38. Dijagram promjene temperature u materijalu uzorka i ambijentne temperature 55
Slika 39. Rengen uređaj BALTEAU GM 300D 57
Slika 40. Upravljačko sučelje uređaja BALTEAU GM 300D 57
Slika 41. Radiogram uzorka 1 58

Slika 42. Radiogram uzorka 2 58
Slika 43. Izrezivanje makroizbrusaka 59
Slika 44. Makroizbrusak uzorka 1 60
Slika 45. Makroizbrusak uzorka 2 60
Slika 46. Uređaj za mjerenje tvrdoće 61
Slika 47. Makroizbrusak uzorka 1 s označenim točkama mjerenja tvrdoće 62
Slika 48. Makroizbrusak uzorka 2 s označenim točkama mjerenja tvrdoće 62
Slika 49. Oprema korištena za provođenje statičkog vlačnog ispitivanje 64
Slika 50. Dimenzije ispitnih epruveta 65
Slika 51. Uzorak 1 nakon statičkog vlačnog ispitivanja 65
Slika 52. Uzorak 2 nakon statičkog vlačnog ispitivanja 66
Slika 53. Dijagram sila-produljenje uzorka 1 66
Slika 54. Dijagram sila-produljenje uzorka 2 67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature nekih metala [3] 7
Tablica 2. Mehanička svojstva čelika za kotlovske limove (izvod iz DIN-a 17175)..... 14
Tablica 3. Mehanička svojstva najčešće korištenih niskolegiranih čelika za rad pri povišenim temperaturama [3] 15
Tablica 4. Mehanička svojstva nekih visokolegiranih austenitnih čelika [6] 16
Tablica 5. Mehanička svojstva nekih visokolegiranih austenitnih čelika [1] 16
Tablica 6. Kemijski sastav čelika P91 [8] 18
Tablica 7. Mehanička svojstva čelika P91 [9]..... 19
Tablica 8. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [23]41
Tablica 9. Karakteristike TIG zavarivanja ovisno o polaritetu i vrsti struje [23] 43
Tablica 10. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje [28]..... 46
Tablica 11. Kemijski sastav osnovnog materijala [8] 47
Tablica 12. Mehanička svojstva osnovnog materijala [8]..... 47
Tablica 13. Mehanička svojstva dodatnog materijala [30] 48
Tablica 14. Kemijski sastav dodatnog materijala [30]..... 48
Tablica 15. Parametri zavarivanja uzorka 1 52
Tablica 16. Parametri zavarivanja uzorka 2 52
Tablica 17. Parametri toplinske obrade..... 55
Tablica 18. Podaci o opremi, parametri snimanja i skeniranja 56
Tablica 19. Rezultati mjerenja tvrdoće 62
Tablica 20. Prosječne vrijednosti tvrdože u uzorcima 63
Tablica 21. Specifikacije kidalice 65
Tablica 22. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja..... 66

POPIS KRATICA

Kratica	Opis
A	Austenit
AC	Izmjenična struja (eng. Alternating Current)
Ar	Argon
ASTM	Američko društvo za ispitivanja i materijale (eng. American Society for Testing and Materials)
BCC	Prostorno centrirana kubična rešetka (eng. Body Centered Cubic)
C	Ugljik
CO_2	Ugljikov dioksid
Cr	Krom
Cu	Bakar
DC	Istosmjerna struja (eng. Direct Current)
DM	Dodatni materijal
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
FCC	Plošno centrirana kubična rešetka
HV	Tvrdoća po Vickersu
M	Martenzit
MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti aktivnog plina (eng. Metal Active Gas)
MIG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog plina (eng. Metal Inert Gas)
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Dušik
Nb	Niobij
Ni	Nikl
P	Fosfor
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
S	Sumpor
Si	Silicij
Ti	Titan
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (eng. Tungsten Inert Gas
V	Vanadij
ZT	Zona taljenja
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	Istezanje
A_{c3}	°C	Temperatura austenitizacije
E	MPa	Modul elastičnosti
I	A	Jakost struje zavarivanja
k	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja
M_f	°C	Temperatura završetka martenzitne pretvorbe
Q	kJ/cm	Unos topline
R_e	N/mm^2	Granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
$R_{m/t}$	N/mm_2	Trajna čvrstoća (statička izdržljivost)
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
T_r	°C	Radna temperatura
T_t	°C	Temperatura tališta
U	V	Napon zavarivanja
v	cm/min	Brzina zavarivanja

SAŽETAK

U teoretskom dijelu rada opisani su čelici koji su za vrijeme rada izloženi visokim temperaturama te je napravljen pregled promjena koje se događaju kod ovih čelika zbog njihovih specifičnih uvjeta rada. Detaljnije su opisane karakteristike martenzitnog čelika P91 koji se koristi u izgradnji i reparaturi termoenergetskih postrojenja. Istaknuta je problematika zavarljivosti i promjena mikrostrukture u području zavarenog spoja. Prikazane su tehnologije koje se koriste za zavarivanje čelika P91, a detaljnije je analiziran TIG postupak zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu izrađeni su ispitni uzorci za određivanje svojstava zavarenog spoja. Određeni su parametri procesa i provedeno je zavarivanje cijevi od čelika P91 upotrebom TIG postupka zavarivanja. Na temelju rezultata ispitivanja doneseni su zaključci o prikladnosti korištenja odabranih parametara zavarivanja i primjeni korištene zaštitne plinske mješavine kod zavarivanja čelika P91.

Ključne riječi: čelik P91, puzanje materijala, TIG zavarivanje

SUMMARY

The theoretical part of the thesis describes steels that are exposed to high temperatures during operation and overview of the changes that occur in these steels due to their specific operating conditions is made. The characteristics of martensitic steel P91 that is used in the construction and repair of thermal power plants are described in more detail. The problem of weldability and changes in the microstructure in the weld joint area is highlighted. The technologies used for welding P91 steel are shown and the TIG welding process is analyzed in more detail.

In the experimental part, samples were tested for determining the properties of the welded joint. Process parameters were defined and pipes made of P91 steel were welded using TIG welding procedure. Based on the test results, conclusions on the suitability of using the selected welding parameters and the application of the used protective gas mixture for welding P91 steel were made.

Key words: P91 steel, creep of material, TIG welding

1. UVOD

Za izradu dijelova visokoenergetskih postrojenja kao što su: termoelektrane, kotlovnice i dijelovi drugih energetskih postrojenja, koriste se čelici jer su u većini slučajeva najjeftinije rješenje. U ovim postrojenjima parametri rada su zahtjevni, a za odabir čelika neki od najvažnijih parametri su: radna temperatura, tlak radnog fluida, predviđeni radni vijek elementa, kemijski i mehanički utjecaji radne okoline.

Gospodarski i ekonomski rast te rast svjetske populacije nameće različite prepreke i probleme koje stručnjaci trebaju riješiti. Povećanje proizvodnje i razvoj novih tehnologija uzrokuje sve veće zahtjeve za energijom i zahtijeva se sve veća iskoristivost termoenergetskih postrojenja. Zbog povišene radne temperature, materijali elemenata energetskih postrojenja moraju biti otporni na puzanje. Postoji širok spektar materijala koji zadovoljava navedene uvjete ali im je cijena previsoka ili su nedostupni u količinama koje zahtijeva današnja energetska industrija. Pravilnim odabirom materijala bitno se utječe na tehničke, ali i druge karakteristike proizvoda. Visokolegirani martenzitni čelici P91 su zbog svojih svojstava i pristupačne cijene sve više zastupljeni u izgradnji i reparaturi termoenergetskih postrojenja. Uz dobra svojstva ovog materijala, njegovim korištenjem javljaju se specifični problemi.

Kako bi se osigurala zadovoljavajuća svojstva zavarenog spoja čelika P91, potrebno je osigurati određene uvjete kod njegovog zavarivanja. Ovaj materijal zahtijeva predgrijavanje, održavanje propisane međuprolazne temperature, a nakon zavarivanja potrebno je provesti odgovarajuću toplinsku obradu. Nepoštovanje ovih uvjeta može dovesti do narušavanja svojstava zavarenog spoja, a samim time i dijelova u čijoj proizvodnji su korišteni zavareni spojevi čelika P91.

2. IZBOR MATERIJALA

Odabirom materijala bitno se utječe na tehničke karakteristike konstrukcije kao i na njezine troškove izrade i održavanja, odnosno na ukupnu konkurentnost proizvoda.

Izbor materijala je usko povezan s projektiranjem i konstruiranjem dijelova te izborom i razradom postupka proizvodnje i montaže [1].

Konstruktori donose odluke o materijalu iako se problem ponovnog izbora, tj. zamjene materijala može pojaviti i kada je proizvod već u upotrebi. U početnoj fazi konstruiranja potrebno je uskladiti konstrukcijsko-tehnološke zahtjeve i zahtjeve svojstava materijala.

Proces konstruiranja nastaje iz vizualnog koncepta cijelog proizvoda, ali je potrebno u obzir uzeti sljedeća svojstva proizvoda [1]:

1) Tehnička: funkcijska, proizvodna, eksploatacijska svojstva,
2) Ekonomska: troškovi i prodajna svojstva,
3) Društvena – humana: ergonomska, ekološka, kulturna, estetska,
4) Pravna svojstva.

Vrijeme od razvoja novog materijala do njegove primjene je sve kraće. Zahtjevi na kvalitetu, pouzdanost i trajnost dijelova, sklopova i postrojenja postaju sve raznovrsniji i složeniji. Zbog toga inženjerima moraju biti dostupne kvalitetne informacije o novim materijalima kako bi mogli ostati konkurentni.

2.1. Zahtjevi na materijale i kriteriji izbora materijala

Prilikom odabira materijala je potrebno obratiti pozornost na funkcioniranje dijela, sklopa ili konstrukcije u cijelom životnom vijeku. Način na koji se odabire pogodan materijal ponajprije ovisi o broju i važnosti zahtjeva i kriterija koji su postavljeni. Uz funkcionalnost i eksploatabilnost, neki od kriterija za odabir materijala su: raspoloživost, nabavljivost i cijena materijala, standardnost-normiranost, recikličnost i uništivost (ekologičnost), estetičnost te tehnologičnost [1].

Tehnologičnost materijala ukazuje na prikladnost materijala za obradu ili oblikovanje nekim tehnološkim postupkom. U širem smislu tehnologičnost je određena materijalom, tehnološkim postupkom (vrstom opreme, parametrima procesa i ljudskim faktorom).

Opća prikladnost za obradu ili oplemenjivanje materijala obično se kvantificira preko sljedećih tehnoloških svojstava [1]:

-livljivost

-obradljivost odvajanjem čestica – rezljivost,

-oblikovanje deformiranjem – na toplo ili na hladno,

-spojivost: zavarljivost, lemljivost, prikladnost za lijepljenje,

-toplinska obradivost,

-prikladnost za prevlačenje i zaštitu površine,

-troškovi izrade vezani uz materijale i drugo.

Postupcima zavarivanja ostvaruje se velik broj spojeva i zavarljivost materijala ima velik značaj među tehnološkim svojstvima.

2.2. Zavarljivost materijala

Komponenta (ili dio) načinjen od metalnih materijala se smatra zavarljivim određenim postupkom kada se uz primjenu pogodne procedure zavarivanjem može postići kontinuitet metalnog materijala [2].

Potrebno je napomenuti da ne postoji jedinstvena metoda koja potpuno definira pojam zavarljivosti. Kako bi se ocijenila i ispitala zavarljivost pojedinog materijala koriste se različite metode od kojih svaka služi za određivanje samo nekih svojstava iz navedene definicije.

Problemu zavarljivosti čelika pristupa se s:

1) metalurškog,

2) konstrukcijskog,

3) izvedbenog stajališta.

1) Metalurška zavarljivost definirana je svojstvima materijala. Čimbenici koji utječu na metaluršku zavarljivost čelika su [2]:

- sklonost krhkom lomu,

- sklonost materijala starenju,

- sklonost otvrdnjavanju,

- sklonost toplim pukotinama,

- sklonost hladnim pukotinama,

- temperatura isparavanja,
- temperatura taljenja,
- mehanička čvrstoća i žilavost.

2) Konstrukcijska zavarljivost definirana je oblikovanjem konstrukcije i načinom opterećivanja. Čimbenici koji utječu na konstrukcijsku zavarljivost uključuju [2]:

- raspored sila u konstrukciji,
- izvedbu zavara,
- debljinu materijala,
- utjecaj zareznog djelovanja,
- razlike u krutosti.

Pri oblikovanju konstrukcije potrebno je uzeti u obzir i uvjete opterećenja kojima će konstrukcija biti izložena. Neki od uvjeta su [2]:

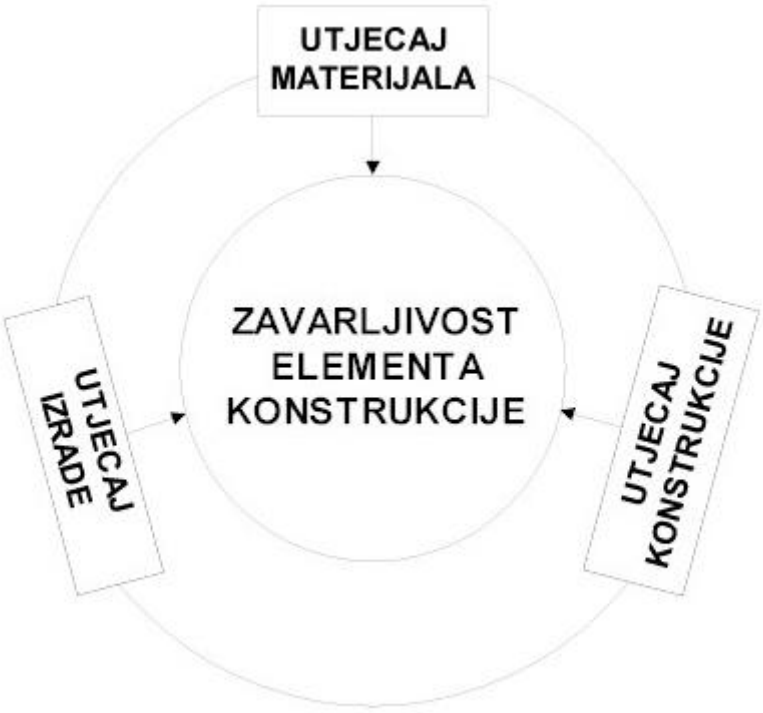
- vrsta i intenzitet naprezanja,
- dimenzijski raspon naprezanja,
- brzina opterećenja,
- radne temperature,
- korozija (svojstva medija kojem je konstrukcija izložena).

3) Kada se zavarljivost promatra s izvedbenog stajališta, riječ je o cjelovitoj proceduri zavarivanja koja uključuje [2]:

- priprema spoja (vrsta spoja, oblik spoja),
- procedura zavarivanja - postupak zavarivanja, vrsta i oblik dodatnih materijala, parametri zavarivanja, redoslijed zavarivanja, predgrijavanja, položaj zavarivanja, aktivnosti za smanjenje utjecaja negativnih vremenskih prilika,
- obrada nakon zavarivanja (toplinska obrada, mehanička, kemijska obrada)

Međusobna interakcija svih faktora je potrebna kako bi se ostvarila zadovoljavajuća svojstva konstrukcije.

Slika 1 prikazuje utjecajne čimbenike na zavarljivost.



Slika 1. Utjecajni čimbenici na zavarljivost [2]

Zbog povećanih zahtjeva za kvalitetu, pouzdanost i trajnost dijelova sklopova ili postrojenja izbor materijala postaje složeniji i odgovorniji zadatak. Predviđeni materijali se u velikom broju slučaja ispituju na ispitnim uzorcima i modelima.

3. METALNI MATERIJALI ZA RAD NA POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

Dijelovi strojeva mogu tijekom uporabe biti izloženi povišenim i visokim radnim temperaturama pa konstrukcijski materijali moraju zadržati mehaničku otpornost pri tim temperaturama.

Kod nekih materijala promjene ponašanja su izraženije nego kod drugih tako da se svakoj skupini može pridružiti karakteristično područje temperatura kod kojih nastupaju izraženije promjene svojstava. Visina granične temperature iznad koje dolazi do bitnije promjene svojstava ovisi o talištu materijala (T_t). Radne temperature (T_r) se uobičajeno dijele na [3]:

- niske temperature: $T_r < 0,25 \cdot T_t$,
- povišene temperature: $T_r = (0,25\text{-}0,4) \cdot T_t$,
- visoke temperature: $T_r > 0,4 \cdot T_t$, (T po Kelvinovoj skali).

Povišene i visoke radne temperature javljaju se u kemijskoj i procesnoj industriji, pri radu turbostrojeva, kod toplinskih strojeva i uređaja. Na slici 2 prikazan je primjer uređaja kod kojeg se javljaju visoke temperature.



Slika 2. Parni kotao [4]

U termoenergetskim postrojenjima (parni kotlovi), plinskim i parnim turbinama vladaju povišene ili visoke temperature. Većina ovih uređaja ima zahtjev za kontinuiranim radom i od nekoliko godina, a ukupan radni vijek za materijale koji grade dijelove može iznositi i preko 20 godina [1]. Kod čelika i željeznih materijala do 180 °C nema bitnijih promjena mehaničkih svojstava, pa se te temperature smatraju niskim. Za čelike se povišenim temperaturama smatraju radne temperature od 180 °C 450 °C. Temperature iznad 450 °C se smatraju visokim jer pri njima počinje puzanje čelika. Kod metalnih materijala se zadovoljavajuća mehanička svojstva postižu do temperatura od 2/3 T_t. Maksimalna radna temperatura je u praksi puno niža. Za druge važnije metale niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature nekih metala [3]

Vrsta metala	**Talište (T)**, °C	**Niske temp.**, °C	**Povišene temp.**, °C	**Visoke temp.**, °C	**Potencijalna radna temp. (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

Osim o temperaturi, primjenjivost pojedinih legirnih elemenata ovisi o visini i vremenskom trajanju opterećenja.

3.1. Promjene svojstava materijala pri povišenim temperaturama

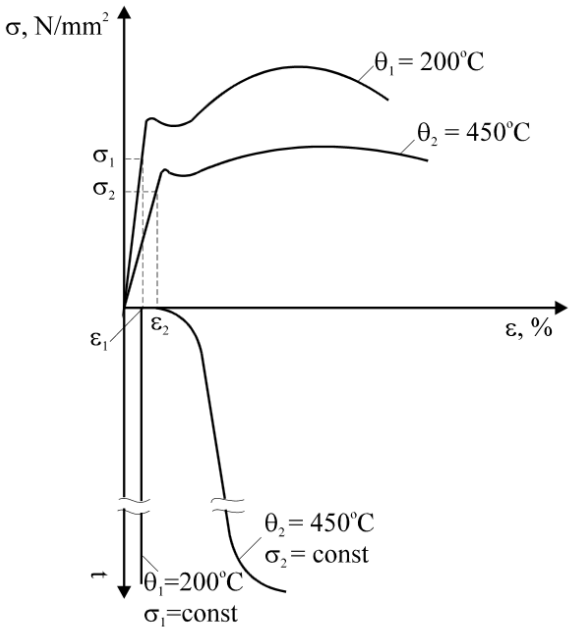
Tipične pojave vezane uz mehanička svojstva koje se javljaju na povišenim i visokim temperaturama su sniženje granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i modula elastičnosti uz istovremeno povećanje istezljivosti, suženja poprečnog presjeka i žilavosti. Dolazi i do pojave puzanja te smanjenja dinamičke izdržljivosti.

3.1.1. Puzanje materijala

Puzanje materijala je toplinski aktiviran, ireverzibilan proces deformacije materijala koji nastaje u uvjetima dugotrajnog djelovanja konstantnog opterećenja na povišenoj temperaturi. Budući da je puzanje materijala toplinski aktiviran proces u kojem nastupa difuzija, taj proces značajnije nastupa u temperaturnom području:

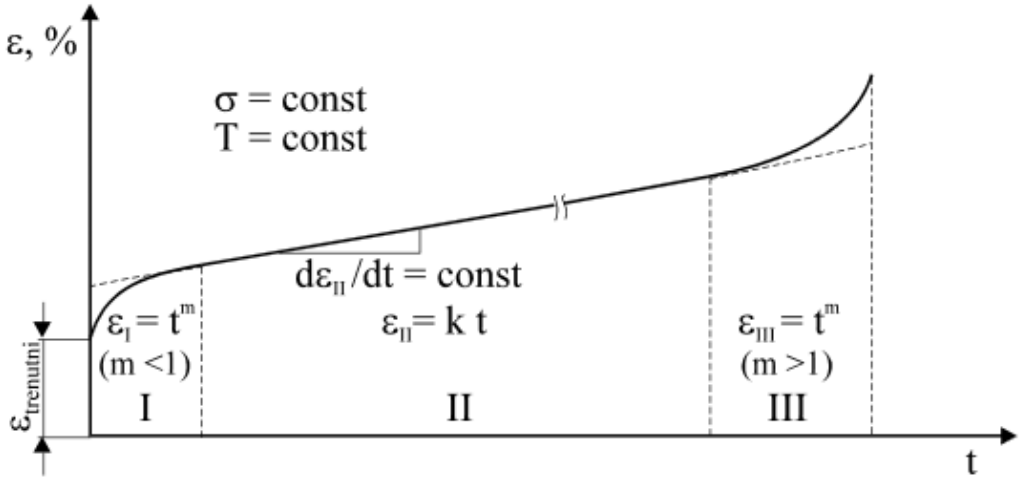
$$T > 0{,}3 \times T_{\text{tališta}} \qquad (1)$$

Za čelike iznosi oko 400 °C, dok olovo i polimerni materijali pužu već na sobnoj temperaturi. U tom pogledu najpogodniji materijali su keramika i teško taljivi prelazni metali zbog visoke temperature tališta. Slika 3 prikazuje kvalitativni dijagrami σ-ε i „zakrenuti“ dijagrami puzanja za čelik na povišenim temperaturama.



Slika 3. Dijagrami σ-ε i "zakrenuti" dijagrami puzanja za dvije povišene temperature ispitivanja za isti kotlovski čelik [5]

Pretpostavlja se da su dijagrami dobiveni ispitivanjem dvije epruvete od kotlovskog čelika na povišenim temperaturama ϑ_1 i ϑ_2 te da je temperatura ϑ_2 viša od temperature ϑ_1 . Također, pretpostavljeno je da je epruveta od istog čelika napregnuta dulje vrijeme na temperaturi ϑ_1=200 °C nekim konstantnim naprezanjem σ_1 koje je manje od granice razvlačenja R_e za tu temperaturu. Onog trenutka kad je epruveta napregnuta naprezanjem σ_1 ona se istegnula za iznos ε_1. Daljnjim praćenjem istezanja tijekom vremena vidljivo je da se istezanje više nije povećavalo, odnosno da nije došlo do pojave puzanja čelika, što je vidljivo u „zakrenutom“ dijagramu. Druga epruveta napravljena od jednakog čelika napregnuta je naprezanjem σ_2 koje je također niže od R_e na temperaturi ϑ_2=450 °C, isto tako dugo vremena. Praćenjem produljenja u „zakrenutom“ dijagramu vidljivo je da ono tijekom vremena raste te da na kraju dolazi do loma epruvete [5]. Slika 4 prikazuje dijagram puzanja u kojem os apscisa sadrži vrijeme izraženo u satima, dok ordinata sadrži istezanje izraženo u postocima.



Slika 4. Dijagram puzanja [5]

Dijagram ne počinje u ishodištu koordinatnog sustava zato što u trenutku opterećivanja epruvete dolazi do trenutnog istezanja. Dijagram, odnosno sam proces puzanja, je podijeljen u tri stadija. U prvom stadiju koji se naziva i početni stadij puzanja istezanje se ostvaruje prema izrazu:

$$\varepsilon_I = t^m \tag{2}$$

Vrijednost eksponenta m je manja od 1, pa se nakon naglog prirasta istezanja u jedinici vremena na početku opterećivanja prirast postupno smanjuje do prijelaza u sljedeći stadij.

U ovom stadiju je deformacija velika zbog sređivanja nepravilnosti kristalne rešetke. U drugom stadiju puzanja koji se naziva stadijem konstantne brzine (gradijenta) puzanja kao što i ime govori prirast istezanja u jedinici vremena je približno konstantan te je dijagram približno pravac za koji vrijedi:

$$\varepsilon_{II} = k \bullet t \tag{3}$$

Nakon drugog stadija puzanja nastupa treći, završni stadij puzanja kada opet dolazi do sve većeg prirasta istezanja u jedinici vremena (porast brzine puzanja) te vrijedi:

$$\varepsilon_{III} = t^m \tag{4}$$

Eksponent m je veći od 1. U tom trećem stadiju puzanja dolazi konačno i do loma epruvete [5].

Na pojavu puzanja materijala utječu sljedeći parametri [5]:

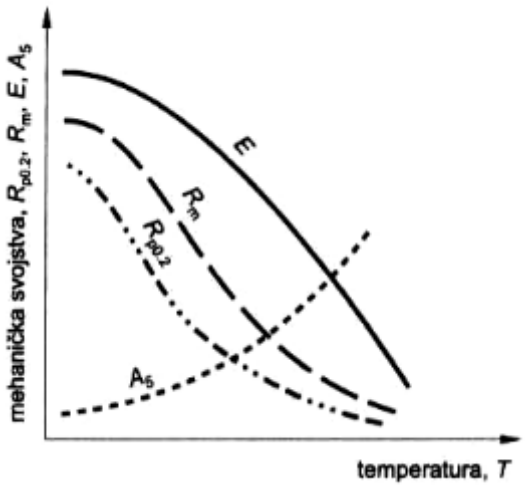
- temperatura tališta materijala,
- tip atomske veze i kristalne rešetke materijala,
- mikrostrukturno stanje materijala.

Brzinu puzanja moguće je smanjiti na nekoliko načina: [5]:

- korištenjem materijala s kovalentnom vezom i visokom temperaturom tališta,
- kristalnom strukturom materijala s malim koeficijentom samodifuzije (npr. γ-Fe umjesto α -Fe),
- legiranjem materijala onim legirnim elementima čiji atomi prvenstveno segregiraju na mjestima penjanja dislokacija,
- upotrebom materijala s velikim zrnima ili čak monokristalnog materijala,
- korištenjem materijala koji sadrže čestice jednoliko raspoređene u kristalima,
- korištenjem materijala s česticama precipitiranim po granicama zrna.

3.1.2. Druge pojave vezane uz mehanička svojstva pri povišenim i visokim temperaturama

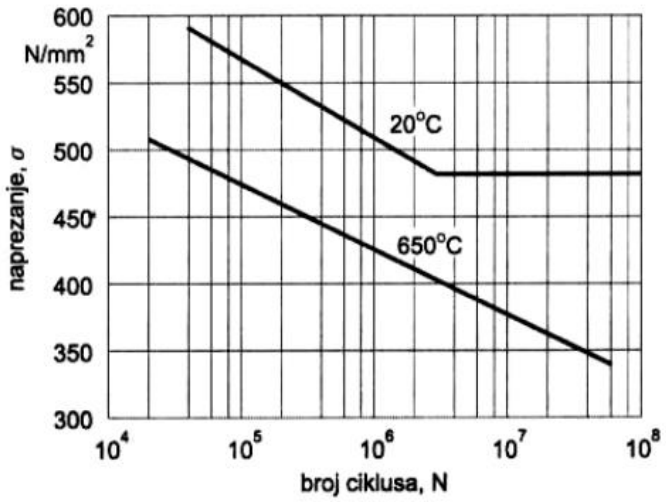
Osim puzanja, na povišenim i visokim temperaturama dolazi do sniženje granice razvlačenja (R_e, $R_{p0,2}$), vlačne čvrstoće (R_m) i modula elastičnosti (E) uz istovremeno povećanje istezljivosti, suženja poprečnog presjeka (A) i žilavosti. Promjene navedenih svojstava prikazane su na slici 5.



Slika 5. Promjene mehaničkih svojstava u ovisnosti o temperaturi [1]

Povišenjem temperature dinamička izdržljivost se smanjuje ili uopće ne postoji, tj. dolazi do loma kod određenog broja promjena opterećenja.

Na slici 6 prikazana je promjena savojne dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika X10NiCrWTi36-15 s povišenjem temperature.



Slika 6. Promjena savojne dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika X10NiCrWTi36-15 s povišenjem temperature [1]

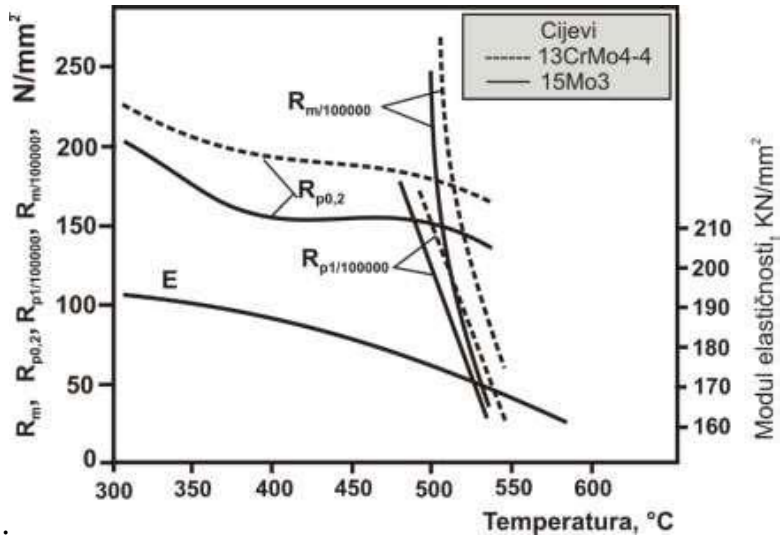
Vidljiva je znatna promjena svojstava materijala s povišenjem temperature. Potrebno je odabrati materijal odgovarajućih svojstava kako ne bi došlo do narušavanja integriteta konstrukcije.

3.1.3. Izbor materijala za rad na povišenim temperaturama

Za izbor materijala i proračun mehanički opterećenih dijelova konstrukcija izvrgnutih povišenim i visokim temperaturama, bitna su sljedeća mehanička svojstva [1]:

- $R_{p0,2/\vartheta}$ – vrijednost konvencionalne granice razvlačenja pri radnoj temperaturi,
- $R_{m/\vartheta}$ – vrijednost vlačne čvrstoće pri radnoj temperaturi,
- E_{ϑ} – vrijednost modula elastičnosti pri radnoj temperaturi,
- A_{ϑ} – vrijednost istezljivosti pri radnoj temperaturi,
- $R_{p1/t/\vartheta}$ – vrijednost granice puzanja pri nekoj temperaturi za definirano vrijeme ispitivanja, koje može iznositi 1000, 10000 ili 100000 sati. To je ono naprezanje koje nakon djelovanja u određenom trajanju pri određenoj temperaturi izaziva trajnu deformaciju od 1 %,
- $R_{DVM/\vartheta}$ – granica puzanja pod DVM pri definiranoj temperaturi, DVM – granica puzanja je naprezanje, koje izaziva brzinu puzanja $10 \cdot 10^{-4}$ %/h unutar 25. i 35. sata pokusa, a da nakon 45 h ne nastupi trajna deformacija veća od 0,2 %,
- $R_{m/t/\vartheta}$ – vrijednost statičke izdržljivosti pri definiranoj temperaturi za određeno vrijeme djelovanja opterećenja – 10000, 100000 ili 200000 sati. To je ono naprezanje koje nakon određenog vremena djelovanja na nekoj temperaturi izaziva lom.

Kod dimenzioniranja dijelova koji rade pri povišenim temperaturama konstruktori koriste dijagrame zavisnosti mehaničkih svojstava o radnoj temperaturi. Na slici 7 prikazana je ovisnost karakteristika mehaničke otpornosti o temperaturi za dvije vrste čelika.



Slika 7. Ovisnost karakteristika mehaničke otpornosti o temperaturi za dvije vrste čelika [1]

Do radnih temperatura iznad kojih počinje puzanje dijelovi se proračunavaju prema vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih statičkim vlačnim kratkotrajnim opterećenjima. Iznad te granične temperature veličine za izbor materijala i proračun su granica puzanja i statička izdržljivost. Smjernice za poboljšavanje mehaničke otpornosti metala (čelika) pri povišenim temperaturama su [1]:

a) čelici trebaju po mogućnosti sadržavati u kristalu mješancu legirne elemente koji koče pokretljivost atoma – na primjer Mo i Co,
b) čelici se legiraju takvim elementima (Cr, Mo, W, V, Ti) koji tvore teško topive stabilne spojeve – karbide, nitride i intermetalne faze koji u obliku sitno disperziranih čestica otežavaju gibanje dislokacija,
c) *austenitna mikrostruktura* s gusto složenom FCC rešetkom daje manju pokretljivost atoma nego feritna (BCC) pa je veći otpor sklizanju atoma i otežan proces difuzije (koeficijent difuzije niži za FCC rešetku), *Bainitna mikrostruktura* daje optimalnu otpornost na puzanje pri temperaturama od oko 500 °C.

Poželjno je da toplinski čvrsti čelici imaju *grublje zrno* jer je tada ukupna površina granica zrna manja, što znači i ukupno kraća mjesta niže čvrstoće. S druge strane, grubozrnatost je povezana s manjom žilavošću i dinamičkom izdržljivošću.

4. ČELICI ZA RAD PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

S obzirom na temperaturno područje primjene razlikujemo četiri osnovne podskupine čelika [1]:

- ugljične (nelegirane),
- niskolegirane,
- visokolegirane martenzitne,
- visokolegirane austenitne čelike.

4.1. Ugljični čelici

Glavni predstavnici ugljičnih (nelegiranih) čelika za rad pri povišenim temperaturama su čelici za kotlovski lim. Karakterizira ih dovoljna čvrstoća pri povišenim temperaturama, zadovoljavajuća duktilnost, otpornost na starenje, umjerena postojanost prema vodi, vodenoj pari i lužinama, otpornost prema interkristalnoj koroziji, dobra zavarljivost i sl. Čelici za kotlovski lim sadrže niski udio ugljika (< 0,2 %) te mangan (> 0,4 %), aluminij (> 0,02 %) i krom (< 0,3 %). Kotlovski čelici se isporučuju u obliku toplovaljanih limova ili ploča, a primjenjuju se za izradu oplata parnih kotlova, cijevi i spremnika većih promjera. Najčešće korišteni čelici za kotlovski lim su čelici P235GH i P265GH.

U tablici 2 prikazana su mehanička svojstva čelika P235GH i P265GH [6].

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika za kotlovske limove (izvod iz DIN-a 17175)

Oznaka čelika	Kemijski sastav, %		R_m, N/mm^2	$Rp_{0,2}$ min., N/mm^2 pri ϑ, °C			R_{DVM}, N/mm^2 pri ϑ, °C		
	C, maks.	Mn, min.	-	20	200	400	400	450	475
P235GH	0,16	0,40	350-450	210	160	100	90	50	(30)
P265GH	0,20	0,50	410-500	240	180	120	100	60	(40)

Za radne temperature do 400 °C potrebno je uzeti $Rp_{0,2}$, a za temperature između 400 °C i 475 °C uzima se R_{DVM}.

4.2. Niskolegirani čelici

Niskolegiranim čelicima se najčešće dodaju samo molibden ili kombinacija molibdena i kroma, te kod nekih vrsta i manje količine vanadija. Radi postizanja dobre zavarljivosti sadržaj ugljika se ograničava na manje od 0,25 %. Molibden i krom stvaraju karbide Mo2C i Cr7C3 koji usporavaju puzanje te povećavaju prokaljivost i otpornost na popuštanje. Temperaturno područje primjene ove grupe čelika je od 450 °C do 580 °C. Pri temperaturama iznad 580 °C može doći do koagulacije karbida, osiromašenja osnove s molibdenom te

smanjenja temperature rekristalizacije. Niskolegirani čelici za rad pri povišenim temperaturama uglavnom se izrađuju u obliku cijevi i limova. Mikrostruktura im je feritno-perlitna u normaliziranom stanju, a bainitna u poboljšanom stanju. Uglavnom se primjenjuju u termoenergetskim postrojenjima, za oplate kotlova, kotlovske cijevi, kolektore pare, turbinske lopatice i sl. Najčešće korišteni niskolegirani čelici za rad pri povišenim temperaturama su: 15Mo3, 13CrMo4-5, 10CrMo9-10, 22CrMo4-4, 24CrMoV5-5 [6]. Mehanička svojstva ovih čelika su navedena u tablici 3.

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

Oznaka čelika	Mehanička svojstva										
	R_m, N/mm^2 pri 20°C	$Rp_{0,2}$, 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	-	22	48
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

4.3. Visokolegirani martenzitni čelici

Ova skupina čelika je razvijena iz martenzitne vrste X20Cr13 modificiranjem sastava kako bi se ostvarila veća mehanička otpornost pri povišenim temperaturama (do 600 °C) te istovremeno zadržala velika postojanost na opću koroziju.

Visokolegirani martenzitni čelici moraju sadržavati oko 1 % molibdena i do 12 % kroma tako da se nakon kaljenja postigne potpuno martenzitna mikrostruktura uz što manji udio δ-ferita. Popuštanjem na temperaturama 550 - 750 °C dolazi do izlučivanja karbida molibdena, vanadija i kroma te precipitiranja intermetalnih faza što povoljno utječe na povećanje otpornosti na puzanje. Primjena ovih čelika je najčešće kod izrade dijelova za dugotrajni rad pri temperaturama 550 - 600 °C.

Koriste se za sljedeće dijelove[6]:

- lopatice,
- rotori,
- kućišta parnih turbina,
- cijevi pregrijača pare,
- dijelovi otporni na djelovanje morske vode i sl.

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 austenitnih čelika [6]

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

4.4. 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. Unatoč činjenici da im je čvrstoća pri 20 °C relativno niska ona porastom temperature vrlo sporo opada. Austenitni Cr-Ni čelici imaju vrlo visoku temperaturu rekristalizacije (900-1000 °C) pa se mogu dugotrajno primjenjivati pri temperaturama 600-750 °C. Pored otpornosti na puzanje austenitne čelike karakterizira vrlo dobra kemijska postojanost i vatrootpornost. Najčešće korišteni austenitni čelici za rad pri 600-800 °C su: X6CrNi18-11, X8CrNiMoNb16-16, X40CrNiCoNb13-13, X40CoCrNi20-20-20, X12CrNiWTi16-13, X50CoCrNi20-20-20, X6NiCrMoTi28-15 itd [6]. Mehanička svojstva ovih čelika prikazana su u tablici 5.

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

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
X6CrNi18-11	490-690	185	98	78	69	180	80	49	34	-
X8CrNiMoNb16-16	530-690	215	147	132	-	324	226	137	83	54
X40CrNiCoNb13-13	640-830	345	245	196	-	-	186	127	78	49
X5NiCrTi26-15	930-1180	635	520	451	314	451	304	206	118	54

5. VISOKOLEGIRANI MARTENZITNI ČELICI P91 ZA RAD NA VISOKIM TEMPERATURAMA

Komponente termoenergetskih postrojenja su izložene visokim temperaturama i dinamičkim opterećenjima te se javljaju velika naprezanja. Osim vanjskih sila, ovi dijelovi mogu biti izloženim i unutarnjim silama (posljedica zavarivanja, deformacija) koje su ovisne o konstrukcijskim detaljima, tehnološkim i eksploatacijskim faktorima. Od materijala za izradu kritičnih dijelova termoenergetskih postrojenja očekuje se dobra otpornost na puzanje, otpornost na koroziju, dobra zavarljivost, mogućnost nanošenja prevlaka.

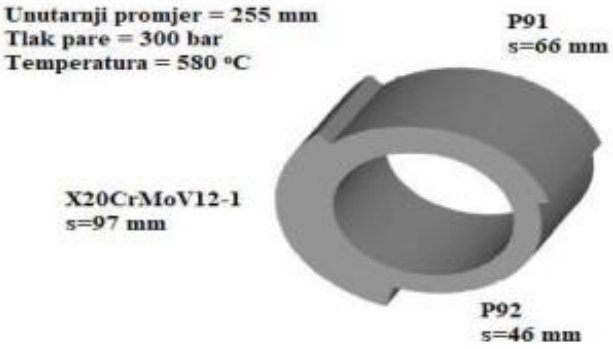
U izboru materijala namijenjenim za upotrebu kod sustava koji su izloženi visokom tlaku i temperaturi, martenzitni čelici otporni na puzanje zauzimaju sve veće mjesto. Kako bi se povećala učinkovitost parnih kotlova u elektranama, potrebno je uvoditi novije materijale s boljim mehaničkim svojstvima. Istraživanje u području materijala omogućilo je rad na višim radnim parametrima poput radne temperature i tlaka, uz otpornost prema raznim vrstama korozije. Neki od novijih čelika su: P91, P92, E911, VM12-SHC i SHM12. Navedeni materijali su relativno kratko u upotrebi.

Oznaka P91 je sukladno američkom ASTM-u, a europska oznaka za ovaj čelik je X10CrMoVNb9-1. P91 je razvijen od polaznog 9CrMo čelika koji je uveden u upotrebu još 1936. godine za potrebe petrokemijske industrije. Od 90-ih godina se intenzivno koristi u Njemačkoj za pregrijače i međupregrijače kod parnih kotlova. Pregrijači i međupregrijači pare koriste se kako bi se povećao stupanj iskoristivosti kružnog procesa. Ovo su toplinski najopterećeniji dijelovi generatora pare i skloni su oštećenjima uzrokovanim puzanjem materijala [8], [7].

5.1. Svojstva čelika P91

Radne temperature za ovaj čelik su od 585 do 625 °C, uz manju otpornost na koroziju u odnosu na konvencionalni martenzitni čelik X20CrMoV12-1 koji je namijenjen za izradu komponenti parnih kotlova. Primjena čelika P91 za izradu komponenti parnih kotlova omogućuje smanjenje debljine stijenke cijevi. Smanjenje debljine je moguće zbog boljih mehaničkih svojstava suvremenih materijala na povišenim temperaturama [8].

Na slici 8 prikazan je primjer upotrebe čelika P91.



Slika 8. Smanjenje debljine stijenke cijevi parovoda primjenom novih materijala

Primjena čelika P91 omogućuje znatno smanjenje debljine stijenke uz zadržavanje mehaničkih svojstava. Time se smanjuju troškovi zavarivanja, zagađenje okoliša, troškovi transporta te se povećava kompaktnost konstrukcije. Korištenjem čelika P92, debljina stijenke se može još dodatno smanjiti [8]. U tablici 6 prikazan je kemijski sastav čelika P91.

Tablica 6. Kemijski sastav čelika P91 [8]

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	0.08-0.10	0.03-0.07	0.04

Preporučeni sadržaj sumpora kod svih čelika je manji od 0,01 %, a fosfora manji od 0,02 %. Kako bi se ostvarila tražena svojstva, čelik se legira. Dodatkom kroma kao legirajućeg elementa povisuje se toplinska čvrstoća, vatrootpornost i otpornost na djelovanje komprimiranog vodika. Legiranjem s molibdenom (najčešće u kombinaciji s ostalim legirajućim elementima) povećava se prokaljivost i čvrstoća čelika, a sprječava pojava visokotemperaturne krhkosti popuštanja. Molibden je karbidotvorac pa utječe na sitnozrnatost čelika. U kombinaciji s kromom molibden povećava otpornost čelika prema općoj i jamičastoj koroziji. Legiranjem s manganom povećava se prokaljivost čelika, a u nekaljenim čelicima poboljšava se čvrstoća i žilavost. Dodatak mangana može dovesti do povišenja granice razvlačenja. Nikal kao legirajući element proširuje područje austenita, te zbog vrlo slabog afiniteta prema ugljiku ne stvara karbide. Legiranjem s niklom može se povisiti žilavost čelika

kao i korozijska postojanost. Dodatkom vanadija kao legirajućeg elementa može se postići usitnjavanje primarnog austenitnog zrna. Vanadij je jaki karbidotvorac i nitridotvorac [6].

U tablici 7 prikazana su mehanička svojstva čelika P91.

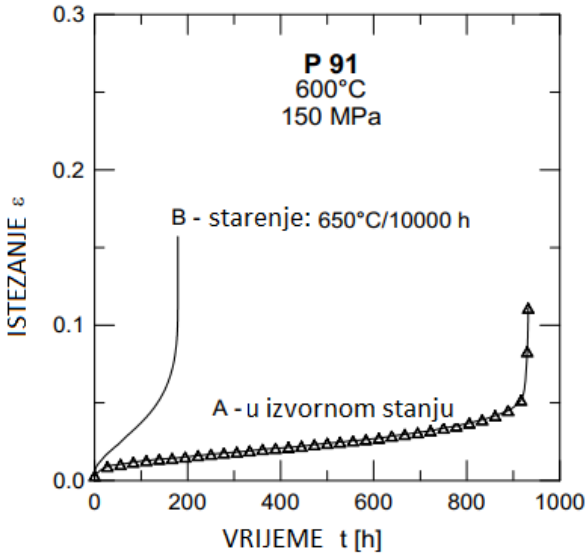
Tablica 7. Mehanička svojstva čelika P91 [9]

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

U metalu zavara i u okolini zone utjecaja topline javlja se lokalno otvrdnjavanje kao rezultat dinamičke promjene temperature kod zavarivanja. Tvrđa područja potrebno je nakon zavarivanja reducirati toplinskom obradom koja se mora odvijati unutar određenog temperaturnog intervala. Kako bi se postigla najpovoljnija, martenzitna mikrostruktura, prvi korak je potpuna martenzitna transformacija zavara, što se može postići hlađenjem ispod temperature M_f (martensite finish) [9].

5.1.1. Puzanje čelika P91

Kako je čelik P91 namijenjen za rad na povišenim temperaturama, potrebno je odrediti njegovo ponašanje u tim uvjetima. Provedeno je standardno vlačno ispitivanje na materijalu u izvornom stanju i na umjetno starenom materijalu. Na slici 9 prikazan je rezultat ispitivanja na puzanje čelika P91.

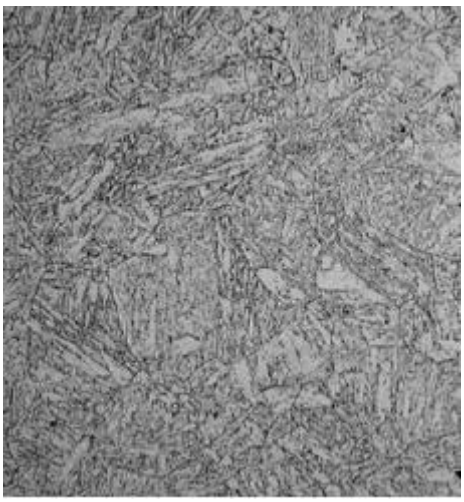


Slika 9. Puzanje čelika P91 [10]

Krivulja A prikazuje ponašanje izvornog materijala u zadanim uvjetima, a krivulja B je dobivena kao rezultat ispitivanja nakon ubrzanog starenja. Ubrzano starenje koristi se kako bi se predvidjelo ponašanje materijala u realnim uvjetima. Nametnuto naprezanje je bilo varijabilno i iznosilo je 50-400 MPa. Uzorci su podvrgnuti opterećenju sve do puknuća. Krivulje puzanja za dva uzorka se znatno razlikuju. Istezanje je puno veće kod ostarenog materijala i dolazi do puknuća u kraćem vremenu. [10].

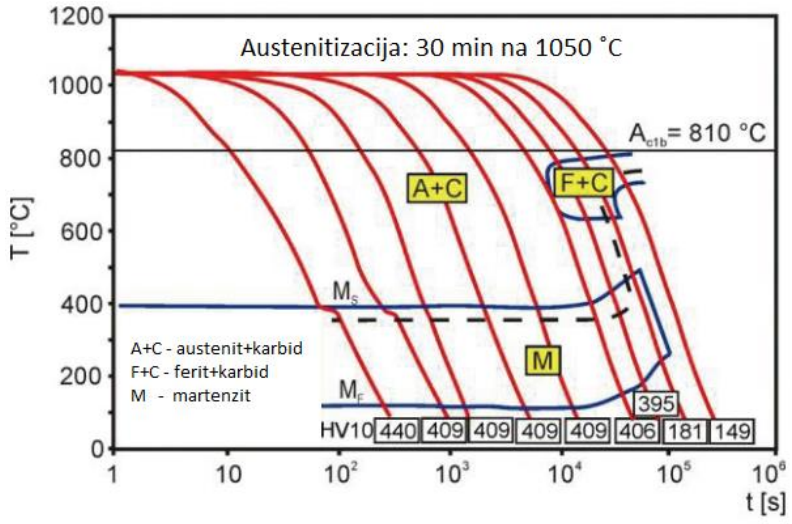
5.1.2. Mikrostruktura čelika P91.

Kod ovih čelika, ugljik je odgovoran za martenzitnu strukturu i formiranje karbida. Visok sadržaj kroma je bitan za otpornost prema oksidaciji. Na slici 10 prikazana je mikrostruktura čelika P91 dobivena svjetlosnim mikroskopom.



Slika 10. Mikrostruktura čelika P91 [10]

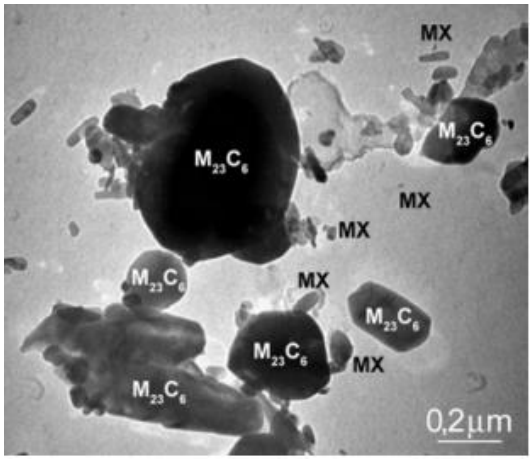
Na slici 11 prikazan je CCT dijagram za čelik P91.



Slika 11. CCT dijagram za čelik P91 [8]

Martenzitna mikrostruktura čelika P91, stabilizirana je karbidima M23C6, s daljim ojačavanjem Mo i finom raspodjelom karbonitrida MX, bogatih vanadijem i niobijem.

Na slici 12 prikazana je mikrostruktura čelika P91 dobivena TEM mikroskopom.



Slika 12. Mikrostruktura čelika P91 [10]

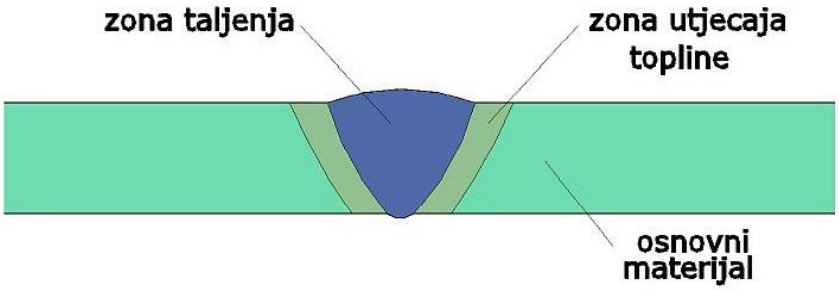
Vidljivi su precipitati koji su najviše odgovorni za otpornost prema puzanju. $M_{23}C_6$ se sastoje uglavnom od kroma i ugljika s dodatkom željeza, molibdena, volframa i bora. Kromovi karbidi nastaju na mjestima gdje su prethodno bile granice austenitnih zrna te na granicama martenzitnih kristala. Veličina $M_{23}C_6$ je oko 100 nm. Zapaženo je da kod dugotrajnog izlaganja opterećenju kod visokih temperatura dolazi do otvrdnjavanja ovih karbida što uzrokuje smanjenje otpornosti materijala prema puzanju. Otvrdnjavanje se može reducirati dodatkom bora te formacijom karbida $M_{23}(C,B)_6$. MX su precipitati male veličine. To su karbonitridi koji također imaju veliku ulogu u otpornosti čelika prema puzanju [10], [11].

6. ZAVARIVANJE ČELIKA P91

Čelik P91, kao i nova generacija materijala kojoj on pripada, s gledišta zavarivanja se dosta razlikuje od drugih čelika, posebno onih niže klase. Moraju biti zadovoljeni strogi uvjeti kako bi se dobio zavareni spoj željenih karakteristika. Potrebno je obratiti pozornost na predgrijavanje, postizanje i održavanje temperature međuprolaza, opasnosti koje se javljaju zbog prekidanja ciklusa zagrijavanja. Naknadna toplinska obrada mora biti adekvatno provedena. Izborom dodatnog materijala također se utječe na kvalitetu zavarenog spoja.

6.1. Utjecaj zavarivanja na strukturne transformacije u zoni utjecaja topline

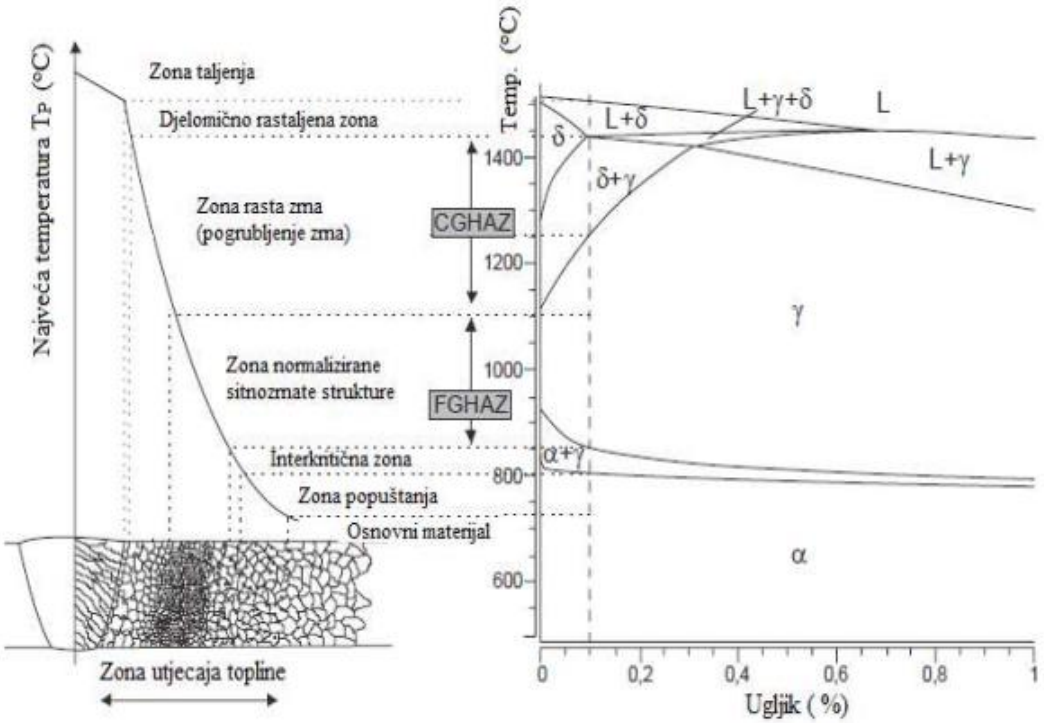
Zavareni spoj se sastoji od zone taljenja (ZT) i zone utjecaja topline (ZUT). Zona taljenja je onaj dio zavarenog spoja koji je za vrijeme zavarivanja bio rastaljen i u kojem je došlo do pojave kristalizacije i do skrućivanja. Može se sastojati od samo osnovnog materijala ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala. ZUT teoretski obuhvaća područje osnovnog materijala (OM), u kojem se OM nije talio za vrijeme zavarivanja, ali u kojem je zbog unošenja topline zavarivanjem došlo do promjene mikrostrukture, mehaničkih, korozijskih ili drugih svojstava [12]. Slika 13 prikazuje osnovna područja zavarenog spoja.



Slika 13. Osnovna područja zavarenog spoja [13]

Zavarivanje ima utjecaja na mikrostrukturu i svojstva osnovnog materijala. U zoni utjecaja topline, promjena mikrostrukture je rezultat toplinskih ciklusa uzrokovanih zavarivanjem. ZUT se može podijeliti na više pod-zona. Između pojedinih podzona nema jasno određenih granica.

Slika 14 prikazuje tipične promjene u strukturi kod zavarivanja visokolegiranog martenzitnog čelika P91 uz fazni dijagram.



Slika 14. Promjene u strukturi kod zavarivanja čelika P91 [14]

Zona taljenja je onaj dio zavarenog spoja koji je za vrijeme zavarivanja bio rastaljen i u kojem je došlo do pojave kristalizacije i do skrućivanja. Može se sastojati od samo osnovnog materijala ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala. U kapljicama rastaljenog metala i talini zavara dolazi do sličnih pojava kao pri proizvodnji taljenju metala u pećima. Javlja se međusobno djelovanje rastaljenog metala, troske i okolne atmosfere. Djelovanjem izvora topline dolazi do taljenja pojedinih elemenata: C, Mn, Si, Cr, Ni, Ti i drugih ili je pak moguće iz troske (obloga elektrode, prah) dolegirati rastaljeni metal raznim elementima. 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. Metalna kupka se može sastojati samo od osnovnog materijala, ako se ne koristi dodatni materijal, ili najčešće od mješavine dodatnog i osnovnog materijala jer pri zavarivanju dolazi do taljenja rubova koji se zavaruju. Daljim hlađenjem u ZT, ovisno o vrsti metala, može doći do strukturnih promjena, izlučivanja različitih faza i pojave grešaka (pore, pukotine). U ZT kod zavarivanja u više prolaza pojavit će se pojedine zone utjecaja topline oko svakog prolaza [12].

Djelomično rastaljena zona predstavlja dvofazno područje (taline i krutine) bogato legirajućim elementima, nečistoćama i plinovima. Zbog brzog hlađenja nakon zavarivanja nema dovoljno vremena za difuzijske procese (izjednačavanje koncentracije nečistoća s okolinom), pa zaostaje mreža otvrdnutih segregiranih nečistoća.

Zona rasta zrna nalazi se značajno iznad temperature A_{c3} (1100 – 1450 °C) , a ispod solidus linije. Svi precipitati koji remete rast austenitnih zrna se otapaju, što rezultira nastankom krupnih zrna austenita. Kod 9-12 % Cr čelika pa i kod čelika P91, austenit se pri hlađenju pretvara u martenzit. Tvrdoća je najveća u zoni rasta i očekivane vrijednosti žilavosti su niske [14].

Zona normalizirane sitnozrnate strukture nalazi se oko temperature A_{c3}. Vršna temperatura nije dovoljno visoka za potpuno otapanje karbida te se ograničava rast austenitnih zrna. Sitnozrnati austenit se kasnije, kod hlađenja, pretvara u martenzit. Ova zona ima najmanju otpornost na puzanje te se smatra najslabijom zonom zavarenog spoja koji je izložen radu na visokim temperaturama [14].

Interkritična zona (djelomična prekristalizacija) se nalazi između temperatura A_{C1} i A_{C3}. Ovdje dolazi do djelomične pretvorbe ferita u austenit. Novi austenit nastaje na granicama prethodnih austenitnih zrna i na granicama martenzitnih lamela. Kod hlađenja se austenit pretvara u nepopušteni martenzit. Ostatak mikrostrukture je popušten. Očekuje se djelomično otapanje precipitata. Vrijednosti tvrdoće su najmanje u ovoj zoni s malom veličinom zrna.

Zona popuštanja je ispod temperature A_{C1}. Mikrostruktura ne prolazi nikakve fazne transformacije, ali je moguće lokalno zbog iznosa temperature. Postoji podobnost okrupnjivanju precipitata zbog većeg koeficijenta difuzije na ovim temperaturama [14].

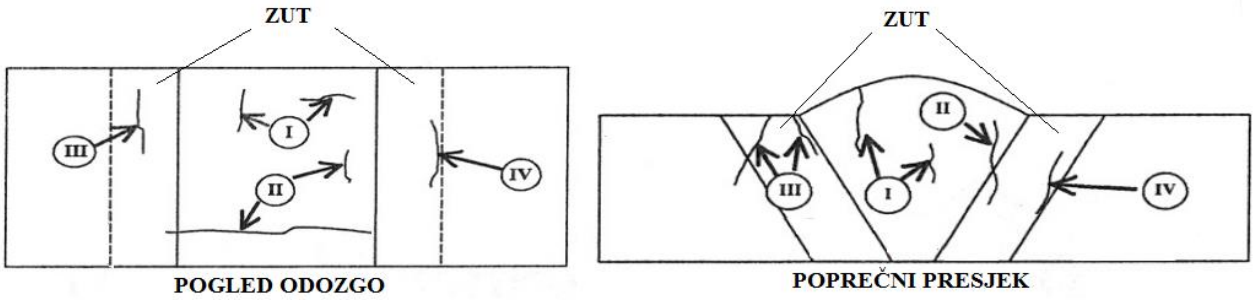
Zona nepromijenjenog osnovnog materijala odnosi se na temperature do približno 700 °C, gdje nema vidljivih promjena u mikrostrukturi niti promjena mehaničkih svojstava materijala.

6.2. Pukotine kod zavarivanja čelika P91

Čelik P91 ima dobre karakteristike koje pogoduju primjeni ovog materijala na visokim temperaturama, ali uz dobre strane ima i loših. Kod ovog materijala može doći do pojave pukotina. Moguća su četiri glavna mehanizma nastanka pukotina kod čelika P91. Pukotine se

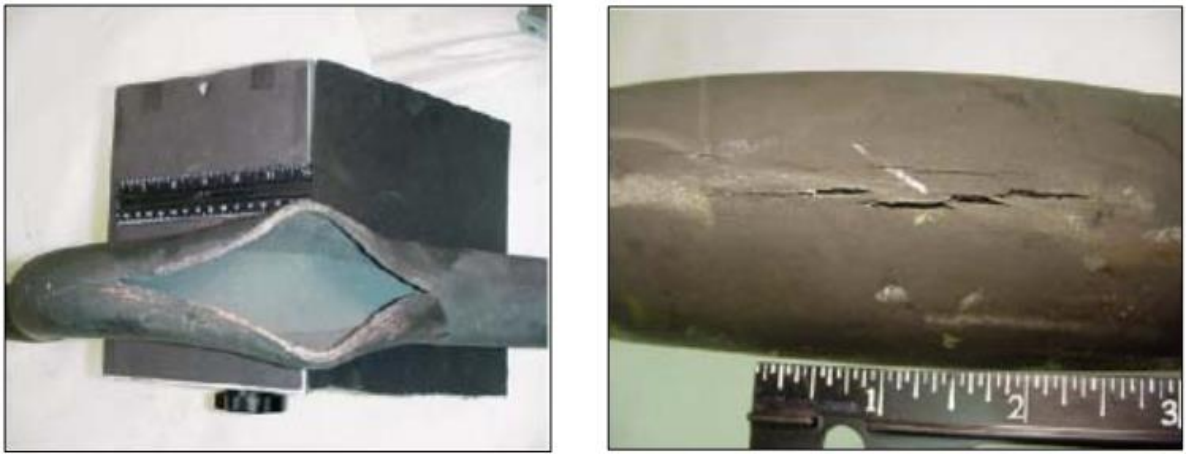
klasificiraju prema položaju i orijentaciji unutar zavarenog spoja. Dijele se na pukotine I, II, III i IV tipa. Pukotine I tipa mogu biti orijentirane transverzalno ili longitudinalno i javljaju se u metalu zavara. Pukotine tipa II su slične pukotinama tipa I, ali se šire izvan metala zavara. Pukotine tipa III javljaju se u zoni rasta zrna s grubozrnatom strukturom, a pukotine tipa IV se javljaju u sitnozrnatoj strukturi interkritične zone [15].

Na slici 15 prikazane su moguće lokacije i orijentacije pukotina kod zavarenih spojeva čelika P91.



Slika 15. Shematski prikaz mogućih orijentacija i lokacija pukotina kod zavarenih spojeva čelika P91 [16]

Čelik P91 osjetljiv je na pojavu pukotina IV tipa, najviše zbog niske čvrstoće na puzanje u zoni sitnozrnate strukture te u interkristaličnoj zoni. Formiranje šupljina, pojava pukotina IV tipa obično se javlja nakon 40000 – 80000 sati eksploatacije i njihova pojava predstavlja dominantan tip otkazivanja ovog materijala. Na slici 16 prikazan je primjer pukotina na cijevima pregrijača izrađenim od čelika P91 koje su se pojavile nakon četiri godine eksploatacije.



Slika 16. Pukotine na cijevima pregrijača izrađenim od čelika P91 [16]

Tijekom zavarivanja sitna zrna nastala u blizini karbida apsorbiraju veće količine ugljika na visokoj temperaturi. S druge strane, sitna zrna koja su nastala daleko od karbida ne apsorbiraju ugljik. Do pojave puzanja i nastanka pukotina dolazi zbog velike zastupljenosti krupnih karbida koji narušavaju čvrstoću materijala u pojedinim zonama. Na granici kritično nastalog karbida javljaju se šupljine puzanja u relativno ranoj fazi rada. Kako bi se spriječila pojava pukotina tipa IV, potrebno je postići homogeni sadržaj ugljika na granicama prethodnih austenitnih zrna. Veliki karbidi ostaju neotopljeni i razlog su pojave pukotina tipa IV. Nehomogena mikrostruktura u zoni utjecaja topline je podobna za nastanak pukotina, a to se može reducirati reaustenitizacijom i toplinskom obradom popuštanjem [15].

6.3. Toplinska obrada čelika P91

Toplinske obrade predstavljaju kritične postupke neophodne za kvalitetno izveden zavareni spoj čelika P91. Njima se osigurava odgovarajuća žilavost, dobra otpornost na puzanje te se smanjuje vjerojatnost pojave pukotina. Provode se predgrijavanje, održavanje međuprolazne temperature i naknadna toplinska obrada.

6.3.1. Predgrijavanje

Predgrijavanje podrazumijeva zagrijavanje područja zavarivanja iznad temperature okoline, na propisanu temperaturu T_o, prije početka zavarivanja. Predgrijavanje je primarno unošenje topline u zavar, a kasnije se izvorom energije zavarivanja sekundarno unosi toplina u zavar, pa su konačni efekti rezultat primarnog i sekundarnog unošenja topline [12]. Cilj predgrijavanja je usporiti prebrzo odvođenje topline s materijala, a izravno time spriječiti neželjeno otvrdnjavanje u području ZUT-a te pojavu zaostalih naprezanja koje mogu dovesti do pucanja materijala.

Predgrijavanjem neposredno prije zavarivanje postižu se još neki efekti [12]:

- smanjenje brzine hlađenja zavarenog spoja i smanjenje zakaljivanja u zavarenom spoju (time se smanjuje vjerojatnost nastajanja hladnih pukotina),
- odstranjivanje površinske (vezane) vlage u području žlijeba za zavarivanje,
- povišenje temperature materijala u temperaturno područje gdje je dozvoljeno zavarivanje,
- smanjenje zaostalih naprezanja uslijed zavarivanja.

Predgrijavati se može cijeli radni komad ili se može izvoditi lokalnim zagrijavanjem uske zone oko pripremljenog žlijeba. Praćenje temperature je bitan parametar kod procesa

zavarivanja čelika P91. Poslije zavarivanja, potrebno je sporo hlađenje zavarenog spoja kako bi se stvorili potrebni uvjeti za pretvorbu svog austenita u martenzit. Prema literaturi [17], preporučuje se predgrijavanje na temperaturu oko 200 °C kako bi se izbjegle hladne vodikove pukotine.

Iako predgrijavanje smanjuje brzinu hlađenja, ona će još uvijek biti dovoljna da se ZT i ZUT potpuno transformiraju u martenzit i pri usporenom hlađenju. Dakle, predgrijavanje se ne koristi kako bi se izbjegla martenzitna struktura nakon završenog zavarivanja, već ono smanjuje nepovoljni učinak temperaturnih naprezanja pri stezanju, jer se smanjuje razlika temperature zavara i osnovnog materijala, a u izvjesnoj mjeri i granice razvlačenja, pa će i zaostala naprezanja biti manje. Pri povećanoj temperaturi se povisuje istezljivost i žilavost, što djeluje povoljno. Također, viša temperatura predgrijavanja omogućava izlazak difuzijskog vodika iz zavara [12].

6.3.2. Održavanje međuprolazne temperature

Temperatura međuprolaza je temperatura predgrijavanja za drugi i svaki naredni prolaz kod zavarivanja. Ona također utječe na mehanička svojstva zavara i stoga ju je potrebno držati unutar predviđenih granica, ovisno o željenim svojstvima. Idealno bi bilo sa stajališta troškova i kvalitete da je temperatura međuprolaza jednaka temperaturi predgrijavanja. To u praksi nije ostvarivo pa se obično temperatura međuprolaza propisuje u granicama od minimalne temperature predgrijavanja do neke, praktično prihvatljive vrijednosti [12].

Preporučena temperatura međuprolaza kod zavarivanja martenzitnih čelika P91 je oko 300 °C i manje, a maksimalna je oko 350 °C. Temperaturu je potrebno strogo kontrolirati s ciljem izbjegavanja toplih pukotina zbog količine niobija i silicija u metalu zavara. Nakon zavarivanja nužno je sporo hlađenje zavarenog spoja ispod 80 – 100 °C za tanki materijal ili na sobnu temperaturu za deblji materijal, kako bi se dovršila martenzitna pretvorba [17].

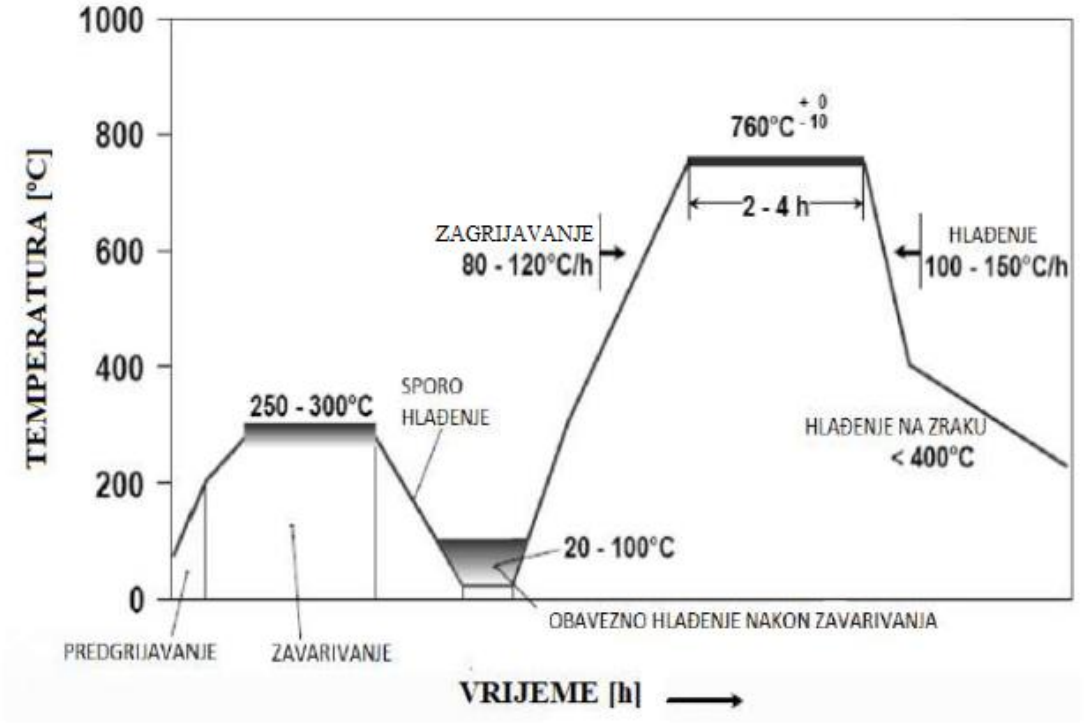
6.3.3. Naknadna toplinska obrada

Preporučeno je da se poslije zavarivanja martenzitnih čelika P91 provede toplinska obrada kako bi se postigla struktura popuštenog martenzita te kako bi se reducirala zaostala naprezanja uzrokovana zavarivanjem. U zoni taljenja i dijelu zone utjecaja topline, javlja se krhka martenzitna mikrostruktura čija mehanička svojstva nisu zadovoljavajuća i potrebna je toplinska obrada.

Odgovarajućom toplinskom obradom poslije zavarivanja osigurava se zahtijevana žilavost zavarenog spoja i produljuje se radni vijek komponente. Čak i kod manjih cijevi preporučuje se toplinska obrada s ciljem postizanja adekvatne mikrostrukture, žilavosti i osiguranja predviđenog radnog vijeka.

Za deblje materijale od čelika P91 preporučuje se zagrijavanje na temperaturu od 750 – 760 °C te držanje u vremenu od najmanje 2 h, ovisno o debljini, obliku spoja te o korištenom postupku zavarivanja. Temperatura toplinske obrade ne smije prijeći liniju A_{c1} jer bi u tom slučaju moglo doći do promjena koje nepovoljno utječu na otpornost materijala na puzanje. Optimalna tvrdoća zavarenog spoja poslije naknadne toplinske obrade trebala bi biti u intervalu 200 – 275 HB. Prihvatljive vrijednosti tvrdoće su do 300 HB, a svaka vrijednost iznad ove upućuje na to da nije provedena adekvatna toplinska obrada. Toplinskom obradom sa strogo definiranim parametrima smanjuje se rizik od pojave pukotina uslijed napetosne korozije. [15] [16].

Na slici 17 prikazan je ciklus toplinske obrade čelika P91. On obuhvaća predgrijavanje, održavanje međuprolazne temperature i naknadnu toplinsku obradu poslije zavarivanja.



Slika 17. Shematski prikaz toplinske obrade čelika P91 prije, za vrijeme i nakon zavarivanja [8]

6.4. Dodatni materijali za zavarivanje čelika P91

Kod zavarivanja čelika P91 koriste se dva osnovna tipa dodatnog materijala [12]:

- približno istog kemijskog sastava kao i osnovni materijal, kako bi se dobila martenzitna struktura nakon zavarivanja,
- Austenitni (AISI 300) tipovi ili Inconel metal sa sadržajem Cr i Ni za potreban omjer miješanja odabranog s ciljem da konačni depozit osigura prihvatljivu količinu austenita koji povećava žilavost i istezljivost zavara.

Primjenom austenitnog DM smanjuje se količina difuzijskog vodika, a time je vjerojatnost pojave hladnih pukotina također smanjena. ZT se ne zakaljuje i zadržava visoku žilavost. Dodatni materijal ovog tipa se upotrebljavaju kada se ne vrši naknadna toplinska obrada. Unatoč svemu ZUT (2-3 mm) će se ipak zakaliti na zraku, a to može biti riješeno samopopuštanjem martenzitne strukture boravkom na visokoj radnoj temperaturi u eksploataciji. Kod korištenja dodatnog materijala različitog kemijskog sastava kao i osnovni materijal, moraju se u obzir uzeti različitosti u koeficijentima rastezanja što pri toplinskoj obradi zavarenih spojeva može dovesti do toplinskih naprezanja i deformacija. Ako se koristi DM istog kemijskog sastava kao i OM, ZT se može naknadno toplinski obrađivati. Jednak koeficijent toplinske istezljivosti osnovnog materijala i zone taljenja je u nekim slučajevima povoljnije (npr. kod navarivanja radnih površina izloženih naglim temperaturnim promjenama), jer neće uzrokovati toplinska naprezanja pri zagrijavanju i hlađenju [12], [18].

Uz legirne elemente poput vanadija, nikla, niobija, koji čeliku P91 daju povoljna svojstva, on sadrži i štetne elemente: fosfor, sumpor, olovo, bakar, antimon i drugi. Štetni elementi tijekom zavarivanja segregiraju po granicama zrna za vrijeme taljenja dodatnog materijala te dolazi do stvaranja faza koje utječu na integritet granica zrna. Zbog toga postoji velika mogućnost pojava pukotina pa se preporučuje korištenje samo materijala koji ima dokazano nizak sadržaj štetnih elemenata. Neophodno je da sadržaj ugljika bude minimalan (do 0,09 %), sadržaj niobija do 0,03 %, a sadržaj dušika najmanje 0,02 % kako bi se osigurala odgovarajuća čvrstoća na puzanje u metalu zavara. Suma Mn + Ni ne smije biti veća od 1,5 %, a odnos Mn/S mora biti veći od 50. Mangan i nikal snižavaju donju temperaturu transformacije i ako je njihov sadržaj veći od 15 %, temperatura transformacije pada ispod 788 °C ograničavajući temperaturno područje u kojem se sigurno može provesti naknadna toplinska obrada. Također dolazi i do sniženja temperature M_f čime se povećava mogućnost pojave zaostalog austenita poslije naknadne toplinske obrade [16].

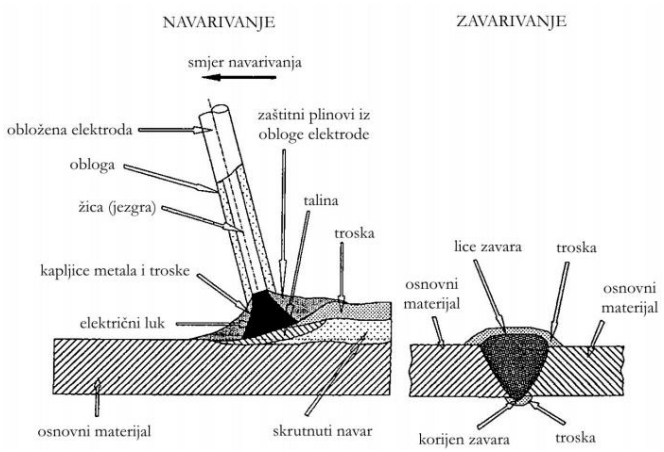
7. POSTUPCI ZAVARIVANJA

Za zavarivanje čelika P91 koriste se uglavnom sljedeći postupci: REL, TIG, MIG i EPP. Primjena REL postupka s elektrodama standardne izvedbe je uobičajena. TIG postupak se koristi uz istosmjernu struju i „-„ pol na elektrodi. TIG je prikladan za zavarivanje cijevi manjeg promjera, za prolaz u korijenu kod bilo koje veličine cijevi i za zavarivanje ploča. MIG postupak koristi obrnuti polaritet istosmjerne struje, gdje se elektrodna žica spaja na „+“ pol. Pri MIG postupku se koristi argon i helij, a ponekad se argonu ili smjesi Ar-He dodaju manje količine kisika ili CO_2 zbog bolje stabilnosti električnog luka. Postupak EPP (s istosmjernom i izmjeničnom strujom) koristi se kada su zadovoljeni uvjeti i kada je potrebno zavarivanje u položajima koji se njime mogu ostvariti. Visoki postotak miješanja te izgaranja kroma i ostalih legirajućih elemenata nadoknađuje se njihovim dodavanjem u prašak [18].
U ovom radu korišten je TIG postupak i on će biti detaljnije razrađen.

7.1. REL postupak zavarivanja

Ručni elektrolučni (REL) postupak zavarivanja obloženom elektrodom spada u postupke zavarivanja taljenjem. U početku se za zavarivanje upotrebljavala metalna elektroda bez obloge koja je ujedno služila kao dodatni materijal. Kasnije se, razvojem obloge, došlo do današnjih obloženih elektroda koje osiguravaju odličnu zaštitu taline, dobru kvalitetu zavarenog spoja, upotrebu izmjenične i istosmjerne struje te zavarivanje u svim položajima [18].

Na slici 18 prikazan je REL postupak zavarivanja.



Slika 18. Shematski prikaz REL postupka zavarivanja [19]

Kod REL postupka, električni luk se uspostavlja kratkim spojem („kresanjem“ između elektrode i radnog komada), nakon čega slijedi ravnomjerno dodavanje elektrode u električni luk od strane zavarivača, te taljenje elektrode i formiranje zavarenog spoja. Toplinska energija dobivena od električnog luka tali dodatni materijal (elektrodu) i osnovni materijal. Najčešće se primjenjuju obložene elektrode, to jest takve elektrode koje imaju metalnu jezgru u obliku žice na koju je nanesena nemetalna obloga. Osim ovog oblika, može se sresti i cjevasta elektroda s jezgrom, tj. punjenjem unutar cijevi koje ima funkciju obloge kod prethodno spomenutog tipa ili može imati poseban sastav, na primjer za tvrda navarivanja slojeva otpornih na trošenje.

Kod istosmjernog izvora elektroda može biti spojena na (+) ili (-) pol. Koja vrsta struje, odnosno vrsta izvora struje će se koristiti ovisi o vrsti materijala koji se zavaruje, vrsti korištenih elektroda, zavarljivosti materijala, položaju zavarivanja, vrsti i dimenzijama konstrukcije. Jakost struje ovisi o promjeru i vrsti elektrode, debljini i vrsti materijala koji se zavaruje, položaju zavarivanja, postupku zavarivanja te o vještini zavarivača. Kod REL postupka zavarivač bira samo struju zavarivanja na uređaju za zavarivanje. Struju zavarivanja preporučuje proizvođač elektroda, a često se može i odrediti i na temelju iskustva. Napon električnog luka definirana je i nepromjenjiva veličina te iznosi od 20 do 40 V. Duljina električnog luka tijekom zavarivanja zavisi o promjeru elektrode i vrsti obloge i bitno utječe ma 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). Pri zavarivanju sitnozrnatih i legiranih čelika preporučuje se što manje njihanje vrha elektrode. Pritom se zavareni spoj treba dobiti povlačenjem u tzv. vezanim slojevima. Kod REL postupka 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 [18], [19], [20].

Prednosti REL postupka zavarivanja [21]:

- razvijen širok spektar dodatnih materijala za zavarivanje,
- manja cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na 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 [21] :

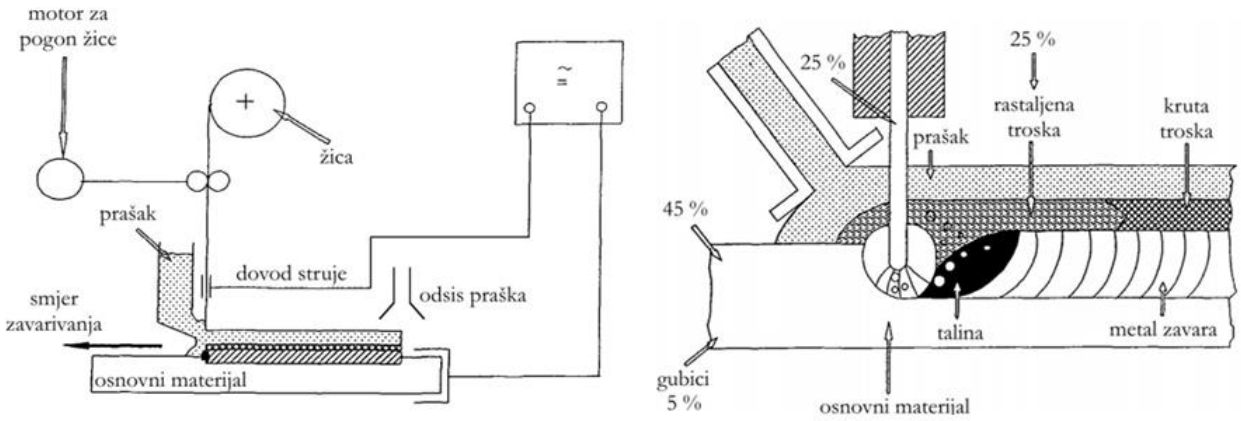
- mala brzina zavarivanja i niska produktivnost u odnosu na MAG i EPP,
- kvaliteta zavara značajno ovisi o vještini zavarivača - čovjeka,
- vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača je dugo,
- neizbježan je otpad elektrode (8-10%),
- teže čišćenje troske nakon zavarivanja i gubitak vremena zbog čišćenja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

REL postupak ima široke mogućnosti primjene: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja većine metalnih materijala. Ipak zbog ekonomičnosti (male brzine zavarivanja i orijentacijski 1,5 do 2 kg depozita na sat) se primjenjuje 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. Elektrode se biraju prema osnovnom materijalu, tj, prema svojstvima osnovnog materijala i zahtjevima zavarenog spoja. Za zavarivanje visokolegiranih čelika izbor elektrode se provodi prema kemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima osnovnog materijala. Metal zavara treba imati jednaka ili bolja svojstva [20], [21].

7.2. Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška

Postupak elektrolučnog zavarivanja pod praškom (EPP) razvijen je 30-ih godina prošlog stoljeća i spada u postupke zavarivanja taljenjem. Električni luk se održava između kontinuirano dovedene taljive metalne elektrode i radnog komada. Elektroda je metalna, obično žica, ili traka. Električni luk je tijekom zavarivanja prekriven slojem praška (debljine nekoliko cm) i troske nastale taljenjem dijela praška pa se ne vidi. EPP postupak se najčešće koristi za sučeljeno i kutno zavarivanje nelegiranih čelika, a u te za niskolegirane konstrukcijske i visokolegirane čelike. Koristi se za navarivanje ugljičnih i niskolegiranih, te visokolegiranih čelika na podlogu od nelegiranih čelika [18].

Prašak štiti rastaljeni metal od djelovanja okolne atmosfere, sprječava naglo hlađenje zavara i oblikuje zavar. Služi za nadomještanje gubitaka legirnih elemenata zbog isparavanja i izgaranja (u nekim slučajevima da izvrši legiranje zone taljenja). On ima utjecaja na kemijski sastav metala zavara. Postoje različite vrste praška, a izbor ovisi o vrsti osnovnog materijala, debljini lima odnosno vrsti spoja, svojstvima površine i parametrima zavarivanja. Shema postupka prikazana je slikom 19.

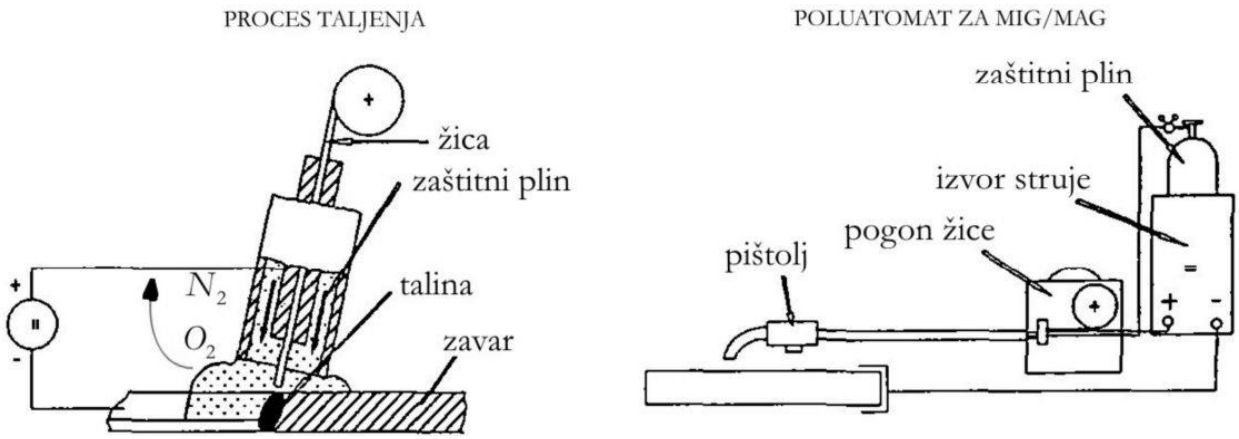


Slika 19. Shema elektrolučnog zavarivanja pod zaštitom praška (EPP) [19]

Zavarivanje EPP postupkom se provodi istosmjernom (elektroda spojena na „+“ i „-“ pol) i izmjeničnom strujom, ovisno o vrsti korištenog praška. Kao izvori struje najčešće se koriste ispravljači s područjem regulacije iznad 1000 A. Koriste se izvori struje s padajućom i ravnom statičkom karakteristikom. Elektrodna žica namotana na kolut preko kontaktne vodilice ili cjevčice dovodi se u zavar, a prašak za zavarivanje se nasipava iz spremnika iznad mjesta zavarivanja. Zavarivač na upravljačkom ormaru regulira i prati sve parametre zavarivanja. Pod utjecajem topline električnog luka na mjestu zavarivanja tale se elektroda (žica), osnovni materijal i prašak. Rastaljeni metal žice (elektrode) i osnovnog materijala tale se u zavareni spoj. Talina praška pliva na talini metala i štiti ga tijekom skrućivanja i hlađenja. Nakon toga se talina praška skrućuje u trosku staklastog izgleda. Kako bi se dobio spoj željenih mehaničkih svojstava, bira se odgovarajuća kombinacija dodatnog materijala (žica ili traka) i praška. Prašak za EPP zavarivanje je smjesa različitih minerala i može se koristiti više puta. Protaljeni se dio nakon pretaljivanja baca. Kod EPP postupka moguće su velike brzine zavarivanja i veća produktivnost u odnosu na REL i MAG. Kvaliteta ne ovisi o operateru jer se radi o automatskom postupku. Ostvaruje se kvalitetan estetski izgled zavara, nema otpada žice, a čišćenje troske je lako. Mehanička svojstva spoja su lošija u odnosu na REL i MAG [18].

7.3. MIG/MAG postupak zavarivanja

Kod ovog postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice, u pravilu spojene na plus pol izvora istosmjernog izvora struje. Proces se odvija u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju inertni plinovi (Ar i He) ili aktivni plinovi (CO_2 i mješavine). Ovisno o vrsti upotrijebljenog plina postupak nosi oznaku MIG (zaštita inertnim plinom) ili MAG (zaštita aktivnim plinom). Uređaji su u oba slučaja načelno isti, ali postoje razlike u nekim detaljima koji dolaze do izražaja kod suvremenih kompjuteriziranih programabilnih uređaja. Elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova spada u postupke zavarivanja taljenjem. Električni luk se uspostavlja između elektrodne žice i osnovnog materijala. Izmjenična struja se ne koristi često zbog slabe ionizacije električnog luka u čistim plinovima. Metalna elektroda (žica) i osnovni materijal tale se toplinom električnog luka. Žica je istodobno i dodatni materijal, odnosno njenim taljenjem popunjava se pripremljeni žlijeb [18], [20]. Na slici 20 prikazana je shema postupka.



Slika 20. Shematski prikaz procesa i uređaja MIG/MAG zavarivanja [19]

Postupak MIG/MAG može biti automatski, poluautomatski (dodavanje žice u električni luk je mehanizirano, a držan je i vođenje pištolja je ručno) i robotiziran. Robotizirani MIG/MAG postupak zavarivanja je programiran, gdje se unaprijed programiraju parametri, a zavarivač prati rad robota. Ovaj postupak se najviše koristi u praksi jer je prilagodljiv svim uvjetima rada i ima veliku produktivnost.

Električna struja dolazi iz izvora struje koji je priključen na električnu mrežu. Struja se iz izvora dovodi vodičima, od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje. Preko kontaktne vodilice električna struja prolazi žicom za zavarivanje koja se

kontinuirano i automatski odmata s koluta pomoću pogonskog elektromotora. Zaštitni plin dolazi na mjesto zavarivanja iz boce kroz sapnicu pištolja. Uloga plina je zaštita mjesta zavarivanja i kapljica rastaljenog metala od okolne atmosfere. Elektro-fizikalna svojstva električnog luka su djelomično određena korištenim plinovima. Zaštitni plinski omotač se upuhuje u atmosferu luka. Pištolj može istodobno odsisavati dimne plinove nastale zavarivanjem, a može biti hlađen zrakom ili vodom.

Prije početka zavarivanja uključi se izvor struje, namjeste protok plina i parametri zavarivanja. Zavarivač pri poluautomatskom postupku prinese pištolj radnom komadu i pritiskom preklopke koja se nalazi na pištolju počinje proces zavarivanja. Otvara se magnetski ventil za protok zaštitnog plina, uključen je izvor struje, aktivira se elektromotor za dodavanje žice. Najprije poteče plin, a zatim počne izlaziti žica. Čim žica dotakne radni komad, zatvori se strujni krug i uspostavi električni luk. Zavarivač pomiče pištolj određenom brzinom u smjeru zavarivanja i zavaruje uz odgovarajuću tehniku rada. Pod utjecajem električnog luka, žica i osnovni materijal se tale, spajaju u jednu talinu i skrućuju u zavareni spoj. Izvori struje za MIG/MAG imaju blago padajuću statičku karakteristiku. Jakost struje zavarivanja, promjer žice, napon električnog luka brzina zavarivanja, duljina slobodnog kraja žice i količina zaštitnog plina su parametri koji bitno utječu na kvalitetu zavarenog spoja. Jakosti struje su obično 120 – 300 A. Optimalna jakost struje zavarivanja ovisi o vrsti i debljini materijala koji se zavaruje, obliku spoja, položaju zavarivanja i promjeru žice kojom se zavaruje. Za određenu jakost struje zavarivanja bira se optimalni napon (prenizak napon daje uzak i ispupčen zavar, dok previsok napon daje širok i nizak zavar, uz jako rasprskavanje i slaba mehanička svojstva zavarenog spoja). Napon električnog luka ovisi o duljini luka (što je veća duljina luka, veći je i napon). Duljina električnog luka ustaljuje se kod izjednačavanja brzine dobave i taljenja žice. Mala promjena duljine luka dovodi do velike promjene jakosti struje, a time i brzine taljenja elektrode. Važno je uspostaviti optimalan odnos između količine taline i brzine zavarivanja. Prevelika količina taline i mala brzina zavarivanja i obrnuto dovode do naljepljivanja što je jedna od karakterističnih pogrešaka za MIG/MAG postupak zavarivanja.

Visokolegirani čelici zavaruju se u atmosferi inertnih plinova (MIG postupak) [18], [20].

Prednosti MIG postupka zavarivanja [21]:

- razvijen dovoljno širok spektar dodatnih materijala za zavarivanje,
- manja cijena opreme za zavarivanje u odnosu na TIG postupak zavarivanja,
- pogodan za pojedinačnu i masovnu proizvodnju, te reparaturna zavarivanja,

- mogućnost zavarivanja u svim položajima zavarivanja,
- pogodan za automatizaciju i robotizaciju,
- daleko veća učinkovitost (kg depozita/h) u odnosu na TIG zavarivanje.

Nedostaci MIG postupka zavarivanja [21]:

- kvaliteta zavara još uvijek ovisi o vještini zavarivača kod poluautomatskog zavarivanja,
- vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača je kraće nego kod TIG zavarivanja (mada je praksa da MIG zavarivači prvo nauče REL postupak zavarivanja),
- kvaliteta zavarenog spoja je lošija u odnosu na kvalitetu spojeva ostvarenih TIG postupkom (kako s estetskog stajališta, tako i sa stajališta grešaka u zavarenom spoju i mehaničkih svojstava zavarenog spoja),
- pri zavarivanju se oslobađaju plinovi (potrebna dobra ventilacija prostora),
- dugotrajni rad može ostaviti štetne posljedice na zdravlje zavarivača.

MIG postupak ima široke mogućnosti primjene: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja. On se uglavnom uspoređuje s TIG postupkom. Ima prednost pred TIG zavarivanjem sa stajališta ekonomičnosti (više kg/depozita na sat). Primjenjuje se za zavarivanje limova i cijevi debljine od 1 mm obično do debljine 20 mm (u nekim slučajevima i daleko iznad tih debljina, kada je ekonomski i tehnološki opravdana primjena MIG postupka. [21].

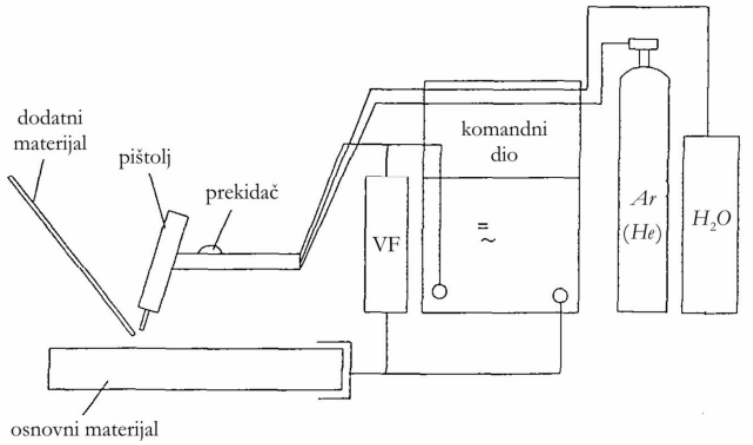
7.4. TIG postupak zavarivanja

TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (Ar, He) ili rjeđe smjesi plinova. Skraćenica imena postupka dolazi od punog naziva "Tungsten Inert Gas", a često se naziva i WIG (Wolfram Inert Gas) ili GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Početak razvoja TIG postupka povezuje se s početkom II. svjetskog rata (1941/1942. godina). Postupak je patentirao Russell Meredith koji je radio za Northrup Aircraft, pod imenom "Heli-Arc Welding" što se smatra pretečom današnjeg TIG postupka zavarivanja. Razvoj ovog postupka zavarivanja nastavila je tvrtka Linde koja je otkupila patent primarno zbog upotrebe inertnih plinova u postupku, a razvoj je nastavljen kroz konstrukciju i primjenu različitih tipova pištolja za zavarivanje, sapnica i proučavanja strujanja zaštitnog plina. Postupak se je najprije razvio za potrebe zrakoplovne industrije, a

kasnije se njegova primjena proširila na izradu uređaja za kemijsku i procesnu industriju. Komercijalna primjena TIG postupka zavarivanja započela je u 50-tim godinama prošlog stoljeća. Danas ovaj postupak, uz vrlo male konstrukcijske promjene, ali zbog značajnih prednosti primjene modificiranih izvedbi (omogućenih kroz razvoj izvora struje za zavarivanje) predstavlja značajan elektrolučni postupak zavarivanja primjenjiv na širokom spektru materijala (čelici, plemeniti metali, teški i laki obojeni metali, itd.) u ručnoj, polu-automatiziranoj ili automatiziranoj primjeni [22] [23].

7.4.1. Princip i oprema kod TIG postupka zavarivanja

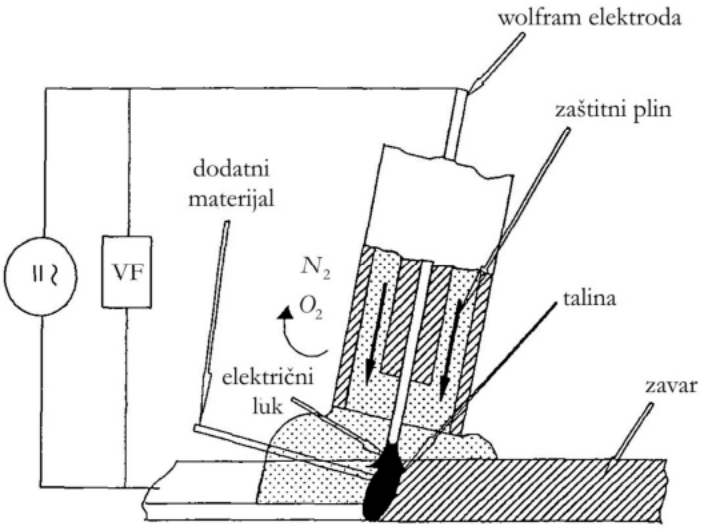
Električni luk se kod TIG postupka zavarivanja uspostavlja između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala. Zona utjecaja topline, osnovni materijal i volframova elektroda zaštićeni su atmosferom inertnog plina. Proces zavarivanja izvodi se s dodatnim materijalom ili bez njega. Električna struja dolazi iz izvora struje za zavarivanje, priključenog na električnu mrežu, jednim vodičem na radni komad, a drugim na pištolju za zavarivanje (u pištolju struja prelazi na elektrodu). Visokofrekventna električna struja dolazi iz posebnog uređaja na radni komad i pištolj, odnosno elektrodu. Zaštitni plin se dovodi gumenim crijevom do mjesta zavarivanja. Na slici 21 prikazana je shema TIG postupka zavarivanja.



Slika 21. Shematski prikaz uređaja za TIG zavarivanje [19]

Netaljiva elektroda služi za uspostavu električnog luka između pištolja za zavarivanje i radnog komada, tj, kao provodnik električne struje. Ne tali se, njezino trošenje isključivo je povezano s oblikovanjem njezine geometrije brušenjem, ili eventualno oštećenjima zbog nepravilne tehnike rada. Prosječni vijek trajanja netaljive elektrode dužine 200 mm iznosi 30 sati. Elektrode se izrađuju od volframa, metala velike gustoće (poznat i kao tungsten; švedski: "teški kamen") i tališta 3422 °C. Uspostavljanje električnog luka je moguće bez dodira

volframove elektrode s radnim komadom i s dodirom volframove elektrode i radnog komada. Uspostavljanje s dodirom se koristi kod uređaja za zavarivanje istosmjernom strujom koji nemaju ugrađen uređaj visokofrekventne struje. Pritiskom na sklopku koja se nalazi na pištolju počinje teći zaštitni plin i sredstvo za hlađenje pištolja. Princip rada poluautomatskog TIG postupka je isti, s tim da se pritiskom na sklopku na pištolju još uključuje elektromotorni sustav za dovođenje žice. Pištolj se približi mjestu zavarivanja na određeni razmak te se uspostavlja električni luk koji tali osnovni materijal. Tijekom zavarivanja zavarivač pomiče pištolj i dodatni materijal (ako se radi s dodatnim materijalom) određenom brzinom po pripremljenom spoju i zavaruje uz određenu tehniku rada [18], [23]. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja nalazi se na slici 22.



Slika 22. Shematski prikaz zavarivanja TIG postupkom

Električni luk kod ovog postupka zavarivanja sastoji se od tri područja: katodnog, anodnog i područja stupa električnog luka. Anodno područje (područje plus pola) i katodno područje (područje minus 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 je po definiciji prema električni luk intenzivno izbijanje u smjesi plinova i para, slijedi da je glavni nosilac ionizacije kod ovog postupka zavarivanja upravo zaštitni plin, a o njemu također ovisi i uspostava i stabilnost luka. Temperature koje se razvijaju kod TIG postupka zavarivanja funkcija su osnovnih parametara zavarivanja, vrsti zaštitnog plina te vrsti osnovnog materijala, a u samoj osi plazme električnog luka mogu dosezati preko 20000 °C.

7.4.2. Zaštitni plinovi kod TIG postupka zavarivanja

Svrha zaštitnog plina je zaštita područja zavarivanja od atmosferskih plinova i održavanje konstantnog električnog luka. Ujedno, svojim svojstvima plin utječe na mehanička svojstva zavarenog spoja. Odabir zaštitnog plina ovisi o željenoj kvaliteti zavarenog spoja, ali ovisi i o vrsti elektrode, debljini osnovnog materijala, željenom načinu prijenosa metala u električnom luku, položaju zavarivanja, kvaliteti pripreme zavara, željenom izgledu zavara i profilu penetracije te samoj cijeni zaštitnog plina. Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste u primjeni TIG postupka zavarivanja su plemeniti plinovi helij i argon. Iako se u izvornom obliku TIG procesa koristio helij, danas je argon taj koji je dominantan u primjeni.

Ionizacijski potencijal

Ion je čestica koja je električki nabijena zbog razlike u broju protona i elektrona. Energija ionizacije ili ionizacijski potencijal je mjera sposobnosti nekog kemijskog elementa da ulazi u kemijske reakcije uz stvaranje iona. Izražava se u elektron voltima, jer se tako izražena odnosi na energiju potrebnu da se ukloni jedan elektron iz svakog atoma u jednom molu nekog elementa.

Električni luk je održavan konstantnim tokom struje kroz ionizirani plin. Energija potrebna da plin otpusti elektron direktno utječe na svojstva električnog luka. Manji ionizacijski potencijal plina znači da zadani plin pri manjoj razlici potencijala prestaje biti dielektrik i dolazi do stvaranja električnog luka (proboja dielektrika) [25].

Toplinska vodljivost

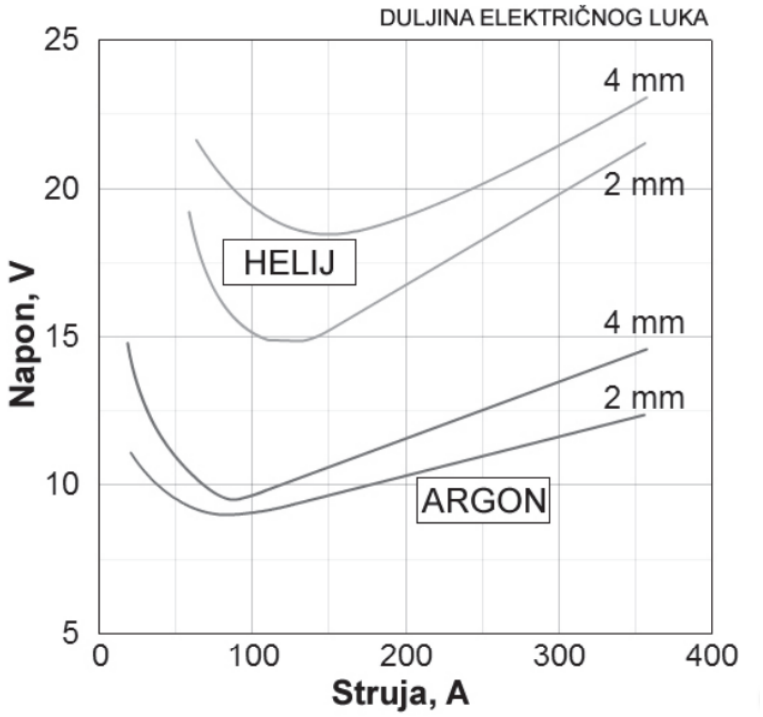
Toplinska vodljivost plina također utječe na stabilnost električnog luka. Visoka toplinska vodljivost može dovesti do smanjenja promjera vodljivog dijela (jezgre) električnog luka što dovodi do povećanja napona i smanjenja stabilnosti električnog luka. Plinovi s većom toplinskom vodljivosti stvaraju širi električni luk s boljom temperaturnom raspodjelom i daju bolju penetraciju zavara.

Argon

Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod TIG zavarivanja, ima niski ionizacijski potencijal (15,7 eV) što olakšava uspostavu i stabilnost električnog luka. 1,4 puta je teži od zraka te izlaskom iz sapnice potiskuje zrak i dobro štiti rastaljeni metal, a zbog težine je potreban manji protok prilikom zavarivanja. Argon u odnosu na helij ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira kompaktnijim električnim lukom čime se ostvaruje manja penetracija i protaljivanje. Minimalna potrebna čistoća argona iznosi 99,95 %.

Helij

Helij je plin s višim ionizacijskim potencijalom (24,5 eV) od argona što otežava uspostavu električnog luka. Male je težine (10 puta manje nego argon), zbog čega protoci helija moraju biti veći nego kod zavarivanja s argonom. Ima vrlo dobru toplinsku vodljivost te 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. Zbog toga je najčešće korišten kod zavarivanja materijala velike toplinske vodljivosti te zavarivanja pozicija većih debljina. Također, javlja se povećavanje napona električnog luka pri nižim strujama (kod helija je to između 50 i 100 A što je nepovoljno kod zavarivanja tanjih materijala koje se upravo i zavaruju u ovom rasponu struja). Minimalna potrebna čistoća helija kao zaštitnog plina iznosi 99,99 %. Slika 23 prikazuje ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG postupka zavarivanja.



Slika 23. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja

Plinske mješavine

Osim čistih inertnih plinova argona i helija, česta je upotreba i njihove mješavine u različitim omjerima. Ovisno o željenim svojstvima i primjeni postupka miješaju se navedeni plinovi i dobiva se plinska mješavina.

Primjeri karakteristika zavarivanja spomenutim plinovima dani su u tablici 1.

Tablica 8. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [23]

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 100% Ar	veća nego 100% Ar

Osim spomenutih kombinacija plinova i mješavina, postoji mogućnost dodavanja manjeg postotka drugih plinova u mješavine. Vodik miješan s argonom povećava iznos napona električnog luka i količinu unesene topline te povećava penetraciju, dok se mješavine s dodatkom dušika upotrebljavaju uglavnom kod zavarivanja materijala s austenitnom strukturom [23].

7.4.3. Modificirane verzije TIG zavarivanja

Postoji puno modifikacija koje daju razne postupke zavarivanja, a najčešće se koriste impulsno zavarivanje, visokoučinsko TIG zavarivanje s aktivirajućim praškom, K-TIG postupak, orbitalno zavarivanje cijevi, zavarivanje s vrućom žicom (TIP-TIG), točkasto zavarivanje.

Impulsno TIG zavarivanje

Omogućava optimalno korištenje energije jer se jačina struje značajno povećava samo u kratkom periodu vremena kada se rastopljeni vrh dodatnog materijala odvaja i prenosi u metalnu kupku. Impulsno TIG zavarivanje je veoma pogodno za automatsko (orbitalno) zavarivanje cijevi.

TIG točkasto zavarivanje

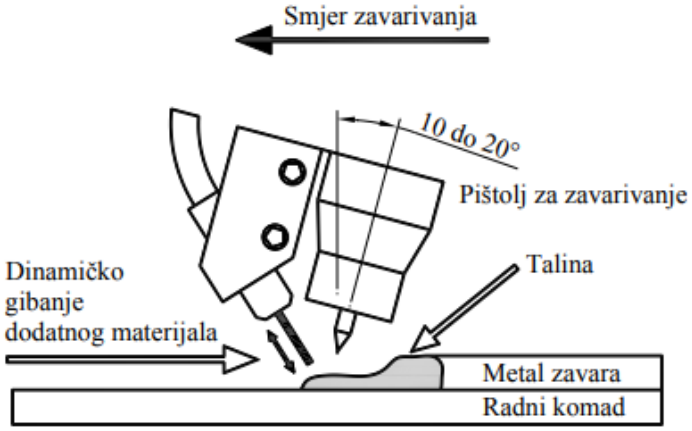
Omogućava dobivanje spoja preklapanjem bez prethodne perforacije radnih komada. Postupak je jednostavan i ne zahtijeva veliku vještinu operatera, postoji mogućnost automatizacije. Postupak je primjenljiv na niskolegirane čelike, Al, debljine 0.5 do 2 mm.

K-TIG -visoko penetracijski postupak

K-TIG je automatizirani visokobrzinski, jednoprolazni proces s punom penetracijom koji eliminira potrebu za dodatnim materijalom. Nije potrebna priprema rubova niti vještinama zavarivača. Proizvodi se zavare bez greške brzinama većim do 100 puta u odnosu na konvencionalni TIG postupak za materijale debljine do 16 mm. Nema potrebe za naknadnom obradom korijena ili lica zavara, čišćenjem ili brušenjem. K-TIG postupak je jednostavan za uporabu, struktura luka i „ključanica“ se razvijaju spontano i održavaju se automatski kontrolnim sustav kroz proces zavarivanja. Zbog svoje jednostavnosti niski su troškovi održavanja, sustav je robustan i pouzdan [26].

TIP TIG postupak

TIP TIG zavarivanje je modernizirana varijanta TIG postupka zavarivanja uz primjenu automatskog dodavanja žice tj. dodatnog materijala koje se sastoji od dvije komponente. Princip postupka prikazan je na slici 24.



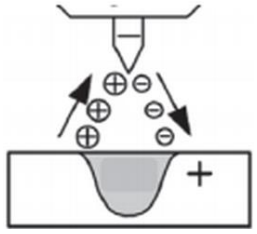
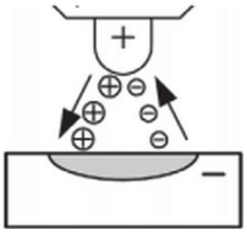
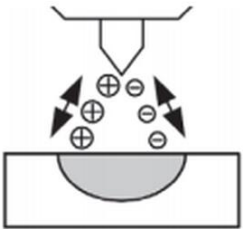
Slika 24. Koncept i tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja [27]

Žica za zavarivanje se primarno giba kontinuirano prema naprijed u smjeru zavara te se na to gibanje integrira sekundarno linearno gibanje „naprijed-nazad“ koje proizvodi dodavač žice preko mehaničkog sustava. Kinetička energija tog dinamičkog gibanja umanjuje utjecaj površinske napetosti taline što omogućava bolje spajanje i miješanje osnovnog i dodatnog materijala dok nečistoćama i plinovima omogućava izlaz iz rastaljenog metala. Depozit dodatnog materijala može se povećati i do 50 % kad se radi o varijanti s vrućom tj. predgrijanom žicom. Dinamički efekti gibanja žice osiguravaju stabilan i upravljiv zavarivački proces. Brzina žice i oscilatorno gibanje naprijed-nazad su kontinuirano podesivi i njima je moguće nezavisno upravljati. TIP TIG postupkom može se zavarivati širok spektar materijala [27].

7.4.4. Utjecaj vrste struje i polariteta elektrode na TIG zavarivanje

O primijenjenoj vrsti struje zavarivanja te polaritetu elektrode ovisi raspodjela topline u električnom luku (raspodjela topline između netaljive elektrode i radnog komada). Slijedom toga moguća su tri slučaja prikazana u tablici 9.

Tablica 9. Karakteristike TIG zavarivanja ovisno o polaritetu i vrsti struje [23]

Vrsta struje	DC	DC	AC
Polaritet elektrode	Negativan	Pozitivan	
			
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	duboka, uska	plitka, široka	srednja
Kapacitet elektrode	Odličan npr. elektroda Ø 3,2 mm – 400 A	Mali npr. elektroda Ø 6,4 mm – 120 A	Dobar npr. elektroda Ø 3,2 mm – 255 A

Zavarivanje TIG postupkom istosmjernom strujom s elektrodom na negativnom polu (kod istosmjerne struje ne dolazi do promjene smjera toka elektrona u jedinici vremena) je najčešća kombinacija struje/polariteta kod primjene TIG postupka. Elektroni se kreću s negativne elektrode na pozitivni osnovni materijal, ubrzavajući kroz električni luk, a pozitivni ioni imaju suprotan smjer. Pri tome, količina kinetičke energije elektrona značajno je veća od one iona pa dolazi do većeg zagrijavanja radnog komada, a manjeg vrha elektrode. Zbog toga ovaj način TIG zavarivanja omogućuje rad s manjim promjerima elektroda tj. rad s velikim strujama, a vrh elektrode može biti zašiljen što daje stabilnost električnom luku. Ovaj način zavarivanja daje dobru penetraciju. Kod zavarivanja TIG postupkom istosmjernom strujom gdje je elektroda na pozitivnom polu smjer elektrona je suprotan pa je time i raspodjela topline drugačija, dolazi do velikog toplinskog opterećenja elektrode. Ovaj način zavarivanja je moguć kod manjih struja zavarivanja uz primjenu netaljivih elektroda većeg promjera.

Također, u odnosu na prethodni slučaj, penetracija je manja, a zaobljenost vrha elektrode može rezultirati nestabilnošću električnog luka. Ipak, smjer pozitivnih iona (s elektrode na radni komad) rezultira razaranjem tankih površinskih oksida s površine osnovnog materijala što omogućuje zavarivanje aluminija, magnezija i njihovih legura. Zavarivanje TIG postupkom izmjeničnom strujom je način TIG zavarivanja gdje se uz mogućnost dobrog čišćenja oksida s površine osnovnog materijala dobiva i dobra penetracija, a toplinsko opterećenje je približno podjednako na elektrodi i radnom komadu, ali ovisi o balansu izmjenične struje. Pri tome, dolazi do mijenjanja pravca kretanja čestica (ovisno o frekvenciji struje), a time i do uspostavljanja i gašenja električnog luka što dovodi do njegove nestabilnosti. Kod TIG AC zavarivanja promjenom frekvencije izmjenične struje, ali i njezinim balansom (odnosom koliko vremena je elektroda na pozitivnom, a koliko na negativnom polu), može se utjecati na geometriju zavarenog spoja, čišćenje oksida, ali i toplinsko opterećenje radnog komada i elektrode [23].

7.4.5. Primjena TIG postupka zavarivanja

TIG postupak se široko primjenjuje: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja aluminijskih legura i drugih nehrđajućih materijala i legura. On se uglavnom uspoređuje s MIG i plazma postupkom zavarivanja. Primjenjuje se za zavarivanje limova i cijevi. TIG postupak je izvorno ručni postupak. Koristi se i kao automatski i robotizirani postupak zavarivanja, ali je primjena tih uređaja kompleksnija i skuplja.

Osnovne prednosti TIG postupka su koncentriranost električnog luka, smanjeni ZUT, nema prskanja, nema troske, količina štetnih plinova je minimalna, mogućnost zavarivanja širokog spektra metala i njihovih legura, mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala, mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima, mogućnost zavarivanja pozicija male debljine, pravilno izveden zavareni spoj spada u najkvalitetnije zavarene spojeve izvedene elektrolučnim postupkom te odličan izgled zavarenog spoja.

Osnovni nedostaci TIG postupka su mala brzina zavarivanja, mali depozit dodatnog materijala, neekonomičnost u zavarivanju debljih pozicija, zahtijeva se precizna priprema zavarenog spoja, viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova, zahtjevnost izvođenja ručnog TIG zavarivanja, duža izobrazba zavarivača, otežanost izvođenja zavarivanja na otvorenim prostorima, potreba za prisilnom ventilacijom zraka kod izvođenja zavarivanja u skučenim prostorima, pojačana svjetlost i UV zračenje. [21], [23].

8. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Cilj rada bio je odrediti utjecaj mješavine Ar-He na zavareni spoj dvaju uzoraka. Uzorci su zavareni spojevi cijevi od čelika P91. Zavarivanje uzoraka izvedeno je ručnim TIG postupkom.

Najprije su definirani parametri zavarivanja. Jedan uzorak je poslije zavarivanja bio toplinski obrađen. Nakon zavarivanja i toplinske obrade provedena su ispitivanja radi utvrđivanja svojstava dobivenih zavarenih spojeva. Na ispitnim uzorcima provedena su nerazorna ispitivanja (vizualna metoda i radiografija) i razorna ispitivanja (mjerenje tvrdoće i statičko vlačno ispitivanje).

8.1. Oprema za zavarivanje

Zavarivanje cijevi od čelika P91 izvedeno je ručnim TIG postupkom. Korišteni izvor struje za TIG zavarivanje je uređaj „MagicWawe 2200 Job G/F“ proizvođača Fronius koji je prikazan na slici 25.



Slika 25. Uređaj za zavarivanje Fronius MagicWawe 2200 Job G/F

Ovaj izvor je potpuno digitalno upravljivi izvor za TIG postupak. Moguće je zavarivanje istosmjernom ili izmjeničnom strujom, a postoji i mogućnost korištenja izvora za REL postupak zavarivanja. Najveća jakost struje zavarivanja je 220 A pri intermitenciji od 35 % [28]. U tablici 10 prikazane su tehničke karakteristike korištenog izvora struje za zavarivanje.

Tablica 10. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje [28]

Naziv izvora struje	MagicWave 2200 Job G/F
Priključni napon	230 V (-20 % / + 15 %), 50 Hz
Strujni opseg TIG – AC/DC	3 – 220 A
Strujni opseg REL	10 - 180 A
Struja zavarivanja	Max 220 A
Intermitencija	35 %
Napon praznog hoda	88 V
Stupanj zaštite	IP 23
Dimenzije	485 x 180 x 390 mm
Težina	17,4 kg

Masa uređaja dopušta njegovo lako prenošenje pa se on može koristiti i za zavarivanje na terenu.

Tijekom zavarivanja bilo je potrebno nadzirati međuprolaznu temperaturu. Mjerenje međuprolazne temperature obavljeno je pomoću infracrvenog termometra Fluke 568. Pomoću istog uređaja mjerila se je i temperatura predgrijavanja. Na slici 26 prikazan je uređaj za mjerenje temperature.



Slika 26. Infracrveni termometar Fluke 568 [29]

8.2. Osnovni i dodatni materijal

Osnovni materijal korišten u eksperimentu su cijevi izrađene od čelika P91. Ispitni uzorci izrađeni su zavarivanjem dva para cijevi TIG postupkom zavarivanja. Dimenzije cijevi su Ø51x6,3 mm, različitih duljina. P91 je visokolegirani martenzitni čelik čija oznaka po europskoj normi EN 10216-2 je X10CrMoVNb9-1. Ovaj materijal koristi se pri izradi i reparaturi termoenergetskih postrojenja. U tablici 11 prikazan je njegov kemijski sastav, a u tablici 12 mehanička svojstva.

Tablica 11. Kemijski sastav osnovnog materijala [8]

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	0.08-0.10	0.03-0.07	0.04

Tablica 12. Mehanička svojstva osnovnog materijala [8]

Oznaka čelika	Mehanička svojstva			
	R_m, N/mm^2	$Rp_{0,2}$,N/mm^2 min.	A_5,% min.	*KV*, J min.
P91	620	450	19	190

Na slici 27 prikazane su cijevi izrađene od čelika P91 prije zavarivanja.



Slika 27. Izgled cijevi prije zavarivanja

Kao dodatni materijal za vrijeme zavarivanja korištena je žica trgovačkog naziva BÖHLER C 9 MV-IG proizvođača dodatnog materijala Böhler. To je žica za zavarivanje 9 – 12 Cr martenzitnih čelika namijenjenih za upotrebu kod izrade turbina, elemenata u kemijskoj i energetskoj industriji [30].

Mehanička svojstva dodatnog materijala prikazana su u tablici 13, a njegov kemijski sastav je prikazan u tablici 14.

Tablica 13. Mehanička svojstva dodatnog materijala [30]

Mehanička svojstva dodatnog materijala BÖHLER C 9 MV-IG			
Vlačna čvrstoća, MPa	Granica razvlačenja, MPa	Istezljivost, %	Udarni rad loma (+20 °C), J
760	640	19	150

Tablica 14. Kemijski sastav dodatnog materijala [30]

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb
%	0.11	0.3	0.5	9.0	0.5	0.9	0.2	0.06

Za zavarivanje je korištena žica promjera 2,4 mm.

Svrha zaštitnog plina kod zavarivanja je zaštita taline zavara od vanjskih utjecaja. On utječe na stabilnost električnog luka, geometriju i izgled zavarenog spoja i na količinu para koje se oslobađaju za vrijeme zavarivanja. Za zavarivanje je korištena plinska mješavina argona i helija u omjeru 50:50, a plin koji se je koristio kod zaštite korijena je 100 % Ar. Dobavljač plinova korištenih u eksperimentalnom dijelu je tvrtka Messer. Na slici 28 prikazane su čelične boce u kojima se skladište zaštitni plinovi za zavarivanje.

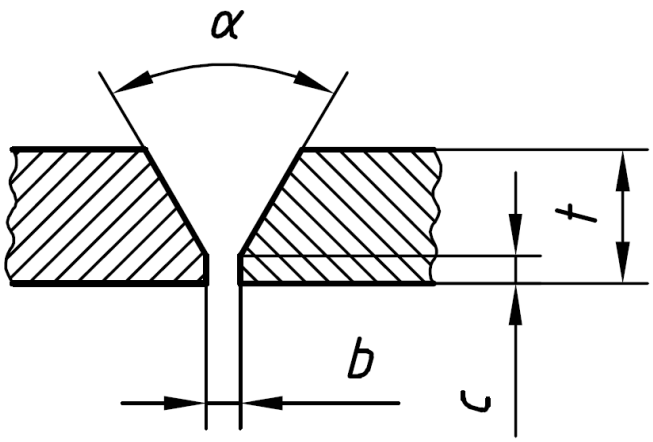


Slika 28. Čelične boce s korištenim zaštitnim plinovima

Zelena boca (desno na slici) je preko manometra i gumenog crijeva povezana s pištoljem za zavarivanje. U svrhu zaštite korijena, plin iz manje boce dovodi se gumenim crijevom na mjesto zavarivanja s unutarnje strane cijevi.

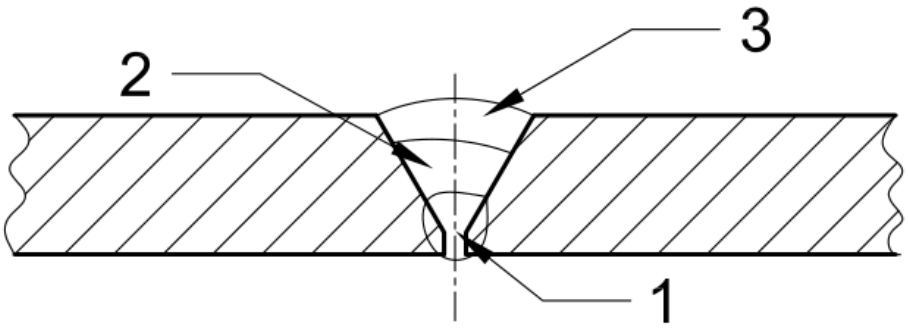
8.3. Postupak zavarivanja cijevi čelika P91

Prije zavarivanja, s površine cijevi odstranjene su nečistoće. Provedena je adekvatna priprema spoja za zavarivanje koja se sastoji od rezanja, brušenja, odmašćivanja i otklanjanja nečistoća. Priprema koja se koristi je sučeljeni jednostrani spoj prema normi HRN EN ISO 9692 – 1. Na slici 29 prikazana je priprema spoja za zavarivanje.



Slika 29. priprema spoja [31]

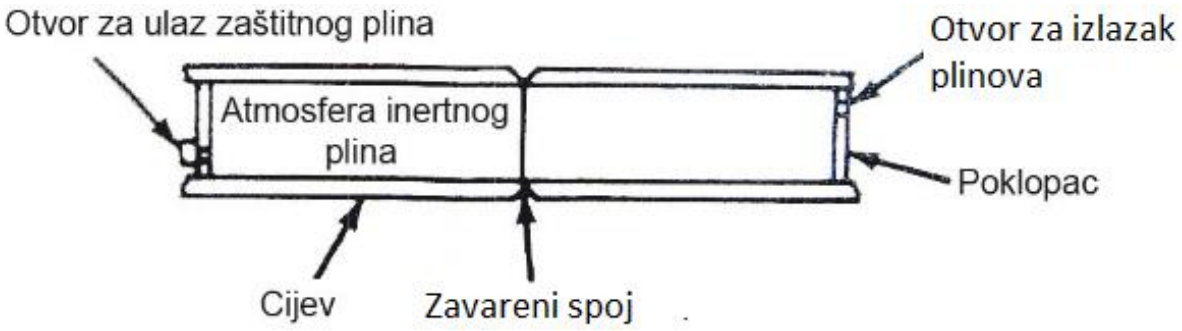
Dimenzije pripreme spoja iznose: t = 6,3 mm, b = 3 mm, c = 1 mm, α = 60 °. Slika 30 prikazuje shemu spoja s prolazima.



Slika 30. Izgled spoja s prolazima

Kod zavarivanja konstrukcijskih dijelova izrađenih od čelika P91, obavezno je predgrijavanje. Stoga je zavarivanju prethodilo predgrijavanje cijevi na 200 °C. Nakon predgrijavanja provedeno je pripajanje cijevi približno na svakih 120º po obodu cijevi. Pripajanje se izvodi kako bi se osigurao položaj cijevi za vrijeme zavarivanja i održao predodređeni razmak između njih. Kod izvođenja korijenskog prolaza potrebno je korijen zavara zaštiti od utjecaja

plinova iz atmosfere. Iako se zavaruje s jedne strane, na suprotnoj strani zavara je također potrebna zaštita zbog mogućnosti sakupljanja nečistoća iz atmosfere koje nepovoljno utječu na mehanička svojstva zavara. Zaštita s unutarnje strane se izvodi tako da se atmosferski plinovi odstranjuju, odnosno osigurava se dovod zaštitnih plinova. Na slici 31 dan je shematski prikaz zaštite korijenskog prolaza s unutarnje strane kod zavarivanja cijevi.



Slika 31. Zaštita korijena zavara kod spoja cijevi [32]

Na slici 32 prikazana je izvedba zaštite korijenskog zavara. S lijeve strane vidi se gumeno crijevo za dovod zaštitnog plina.



Slika 32. Izvedba zaštite korijena

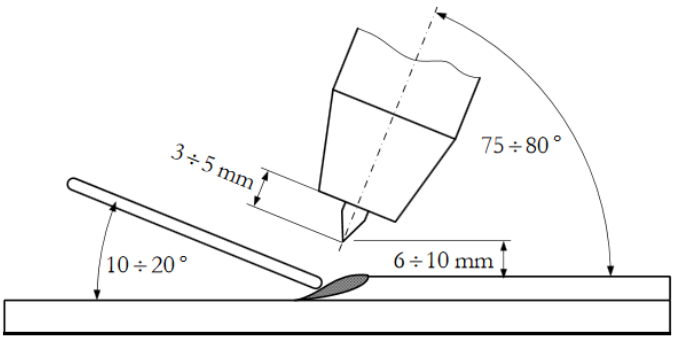
Nakon pripreme spoja za zavarivanje može se krenuti sa zavarivanjem korijenskog prolaza. Zavarivanje je izvedeno s jednim korijenskim prolazom i dva prolaza popune. Kod svih prolaza korištena je žica promjera 2,4 mm, a zavarivalo se s istosmjernom strujom (DC), s elektrodom na (-) polu. Na upravljačkom sučelju izvora struje za zavarivanje namješteni su osnovni parametri koji su za vrijeme zavarivanja minimalno odstupali od namještenih vrijednosti.

Na slici 33 prikazano je zavarivanje cijevi od čelika P91 u laboratoriju za zavarivanje.



Slika 33. Zavarivanje cijevi od čelika P91

Za zavarivanje je korištena lijeva tehnika rada – pištolj u desnoj ruci, dodatni materijal u lijevoj, smjer zavarivanja s desna na lijevo. Kod TIG postupka se na početnom mjestu uspostavi električni luk i njime se zagrijava osnovni materijal sve dok se ne počne stvarati talina koja se štiti plinom. Istodobno, za vrijeme povlačenja pištolja, vrh žice (dodatnog materijala) se dovodi u prednji rub taline. Žica se zbog topline koju oslobađa talina i električni luk trenutno rastali. Talina ne smije „bježati“ ispred električnog luka na hladni i neprotaljeni materijal zbog mogućnosti pojave grešaka u obliku naljepljivanja. Na slici 34 prikazani su položaji pištolja za zavarivanje i dodatnog materijala.



Slika 34. Položaj pištolja i žice kod ručnog TIG postupka [19]

U tablici 15 prikazani su parametri za vrijeme zavarivanja svakog pojedinog prolaza kod zavarivanja prvog para cijevi (uzorak 1) dok su u tablici 16 prikazani parametri zavarivanja uzorka 2.

Tablica 15. Parametri zavarivanja uzorka 1

Redni broj prolaza	Struja zavarivanja, A	Napon zavarivanja, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/cm	Protok plina, l/min	
					Zaštita korijena	Zaštitni
Korijen	80	11,5	2,24	14,79	7	5
1	90	11,6	2,84	13,23	7	5
2	100	11,9	2,75	15,58	7	5

Tablica 16. Parametri zavarivanja uzorka 2

Redni broj prolaza	Struja zavarivanja, A	Napon zavarivanja, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/mm	Protok plina, l/min	
					Zaštita korijena	Zaštitni
Korijen	80	11,8	2,50	13,60	7	5
1	90	11,7	3,2	11,85	7	5
2	100	12,0	2,98	14,50	7	5

Unos topline računa se prema izrazu [33]:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v} \times \frac{60}{1000}$$

gdje je:

Q – unesena toplina, kJ/cm,

U – napon zavarivanja, V,

I – jakost struje zavarivanja, A,

v – brzina zavarivanja, cm/min,

k – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja koji za TIG postupak prema HRN EN 1011-1 iznosi 0,6.

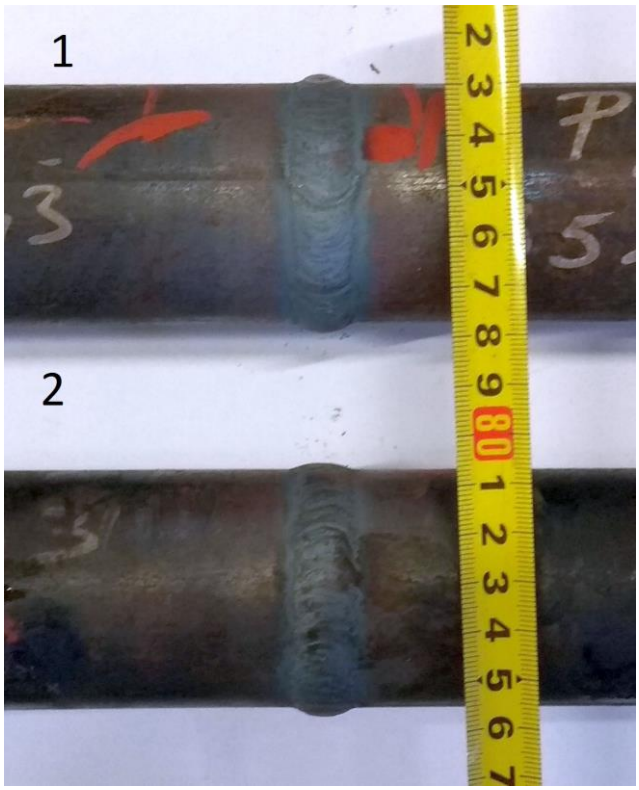
Nakon svakog prolaza potrebno je zavar dobro očistiti od površinskih oksida, a to je provedeno korištenjem čiste četke. Električni luk je kod zavarivanja bio stabilan i raspodjela

taline je bila jednolika. Propisana međuprolazna temperatura bila je između 200 °C i 300 °C. Na slici 33 prikazano je mjerenje međuprolazne temperature pomoću uređaja Fluke 568.



Slika 35. Mjerenje međuprolazne temperature

Na slici 36 vide se uzorci 1 i 2 nakon zavarivanja.



Slika 36. Uzorci nakon zavarivanja

Kako su parametri zavarivanja bili slični, izgled zavara je gotovo identičan. Estetski izgled uzoraka je prihvatljiv što uz pravilno odabrane parametre zavarivanja također upućuje na zadovoljavajucu kvalitetu izvedenog zavarenog spoja.

8.4. Toplinska obrada uzorka

Nakon što su uzorci zavareni, potrebno je provesti toplinsku obradu na jednome od njih (uzorak 2) kako bi se ispitao utjecaj predložene toplinske obrade poslije zavarivanja na svojstva zavarenog spoja. Toplinska obrada provedena je u Laboratoriju za toplinsku obradu prema uputama za čelik P91. Na uzorku 2 u području osnovnog materijala izbušen je provrt Ø2 mm s ciljem praćenja temperature u materijalu uzorka pomoću termopara. Pomoću jednog termopara praćena je temperatura u materijalu uzorka, a pomoću drugog ambijentna temperatura unutar peći. Korišteni termoparovi su tipa K (NiCrNi). Na slici 37 prikazano je radno mjesto s pripadajućom opremom na kojem je provedena toplinska obrada uzorka 2.



Slika 37. Oprema za provođenje toplinske obrade

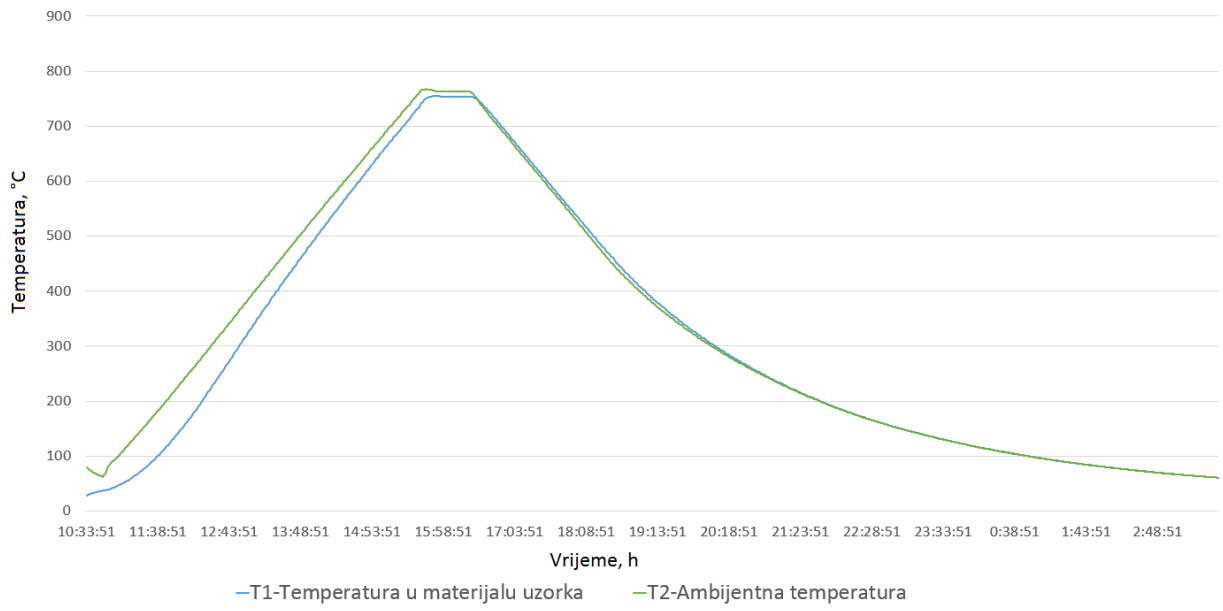
Nakon što je uzorak umetnut u peć i postavljena oprema za praćenje temperature obrade, postavljeni su parametri obrade i započeta je toplinska obrada. Temperatura je praćena pomoću četverokanalnog digitalnog termometra TC 390. Uređaj se koristi s programskim paketom Computer Linking Software koji omogućava iščitavanje, analizu i obradu podataka na računalu. Ovaj digitalni termometar ima mogućnost istovremenog priključka do 4 termopara i dolazi s memorijom u kojoj je moguće pohraniti 16 000 mjernih vrijednosti (4000 po kanalu). Uređaj se često koristi za mjerenje na terenu. Mjerno područje uređaja je od -200 °C do +1370 °C, a za napajanje koristi 9 V bateriju [34].

Parametri toplinske obrade navedeni su u tablici 17.

Tablica 17. Parametri toplinske obrade

Materijal	Čelik P91 (X10CrMoVNb9-1)
Dimenzije	Ø51x6,3
Brzina grijanja	150 °C/h
Brzina hlađenja	150 °C/h
Temperatura držanja	760 °C
Vrijeme držanja	45 min
Dodatna uputstva: uzorke staviti na 300 °C; hladiti do sobne temperature	

Slika 38 prikazuje dijagram ovisnosti temperature o vremenu tijekom toplinske obrade. Termoparovima se mjere temperatura T1 koja predstavlja temperaturu unutar materijala uzorka, a T2 je ambijentna temperatura unutar peći.



Slika 38. Dijagram promjene temperature u materijalu uzorka i ambijentne temperature

Ambijentna temperatura na početku raste brže od temperature u materijalu uzorka zbog mehanizma prijenosa topline do unutrašnjosti materijala. Razlika između mjerenih temperatura se smanjuje s vremenom te se gotovo izjednačavaju na temperaturi držanja od 760 °C. Vrijeme držanja je 45 min, a nakon toga se uzorci sporo hlade do sobne temperature.

8.5. Radiografska kontrola zavarenih spojeva

Radiografska metoda je volumna metoda te se koristi za otkrivanje nepravilnosti u unutrašnjosti materijala koje nisu otvorene prema površini. Kod ove metode ispitivanja iskorištavaju se svojstva elektromagnetskog zračenja X (rendgenskim) i gama (radioizotopnim) zrakama koje prodiru kroz ispitne materijale. Ako su u materijalu prisutne nehomogenosti, one će imati različita svojstva apsorpcije zraka od osnovnog materijala. Jakost energije zračenja će na izlazu iz materijala biti različita za područja osnovnog materijala i nehomogenosti. Radiografija spada u metode ispitivanja bez razaranja.

Ispitivanje je provedeno je s ciljem detekcije geometrijskih nepravilnosti, poroznosti, pora, uključaka i pukotina u metalu zavara, a provedeno je u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja. Upotrijebljen je rendgenski uređaj BALTEAU GM 300D. Snimanje je izvedeno izvorima zračenja (RTG) na slikovne ploče. Skeniranjem se slika sa slikovnih ploča pretvara u digitalni zapis koji se kasnije može analizirati na računalu. U tablici 18 prikazani su podaci o opremi i parametri snimanja.

Tablica 18. Podaci o opremi, parametri snimanja i skeniranja

Podaci o rendgenu, skeneru i slikovnoj ploči	
Rendgen	BALTEAU GM 300D
Skener	VMI 5100
Slikovna ploča	Kodak industrex flex Blue
Parametri snimanja	
Napon	175 kV
Struja	4 mA
FF udaljenost	700 mm
Vrijeme ekspozicije	4,15 min
Parametri skeniranja	
Napon lasera	15 V
Napon fotomultiplikatora	5,25 V
Rezolucija skeniranja	50 μm

Na slici 39 prikazan je rendgen uređaj s kojim je izvedeno snimanje s uzorcima postavljenim na ispitnom stolu, a na slici 40 je prikazano upravljačko sučelje rendgenskog uređaja s parametrima za vrijeme skeniranja.

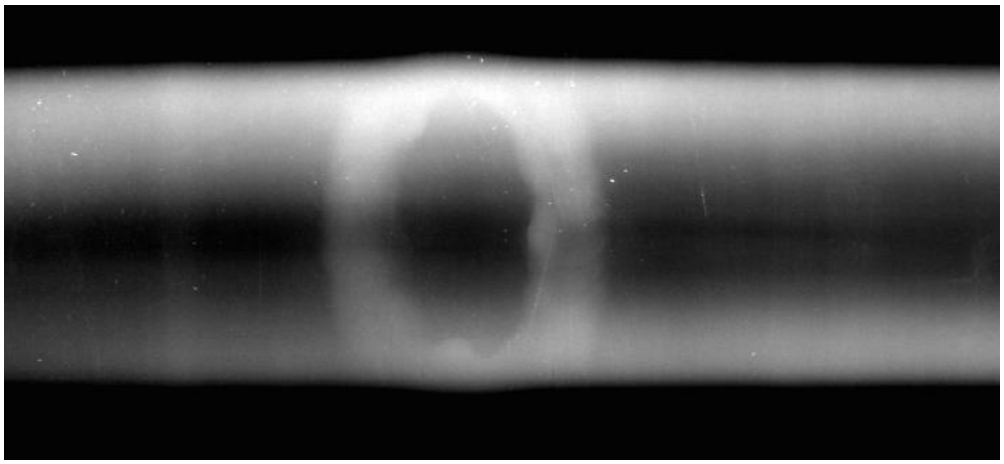


Slika 39. Rengen uređaj BALTEAU GM 300D



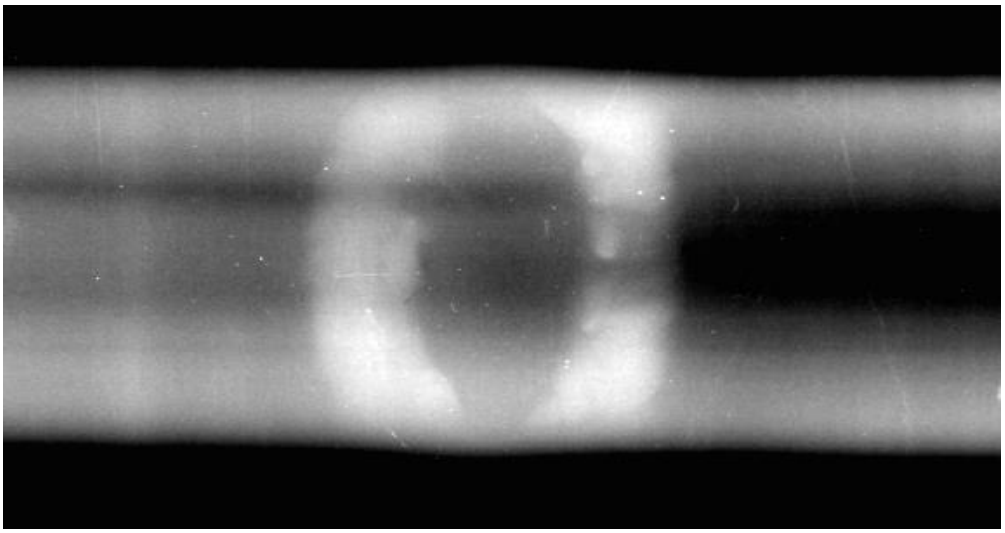
Slika 40. Upravljačko sučelje uređaja BALTEAU GM 300D

Prije samog snimanja napravljena je priprema uzorka za snimanje. Na uzorke su dodatni indikatori kvalitete radiograma i brojevi s oznakama uzoraka. Snimanje je provedeno u dva položaja uzoraka (položaj A i B). Slika 41 prikazuje uzorak 1 u položaju A.



Slika 41. Radiogram uzorka 1

Slika 42 prikazuje radiogram uzorka 2 (toplinski obrađen) u položaju snimanja A.



Slika 42. Radiogram uzorka 2

Slike su detaljnije obrađene u programskom paketu. Od grešaka se vidi tek nekoliko sitnih pora i može se zaključiti da je kvaliteta zavara adekvatna.

8.6. Analiza makrostrukture

Nakon zavarivanja i toplinske obrade potrebno je izraditi makroizbruske. Makrostruktura se može vidjeti golim okom ili uz malo povećanje. Iz svakog uzorka izrezan je po jedan makroizbrusak. Pomoću makroizbruska može se djelomično utvrditi uspješnost provođenja zavarivanja. Prilikom rezanja potrebno je izbjeći pregrijavanje materijala koje može rezultirati oštećenjima te pukotine u blizini reza. Rezanje je provedeno na tračnoj pili u Laboratoriju za zavarivanje. Slika 43 prikazuje izrezivanje makroizbrusaka tračnom pilom.



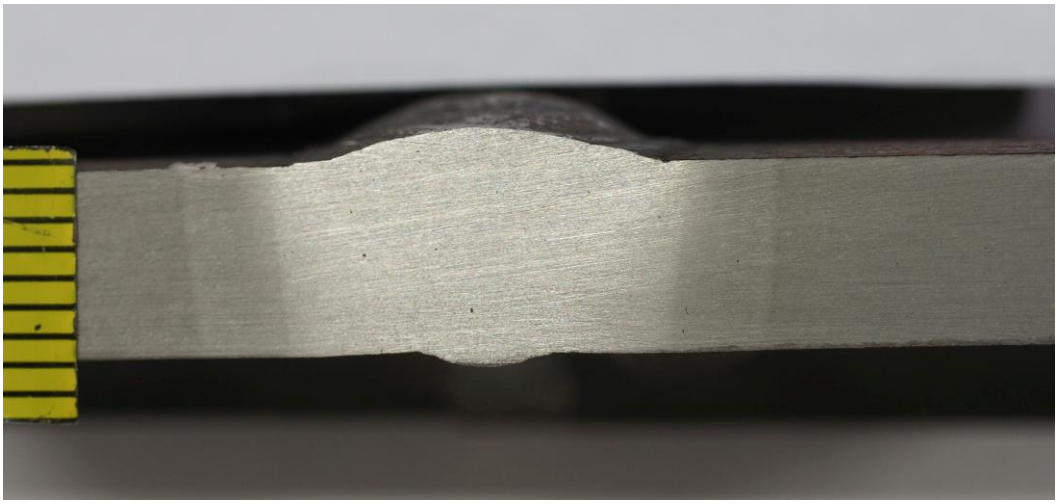
Slika 43. Izrezivanje makroizbrusaka

Poslije izrezivanja makroizbrusci se bruse. Površina se čisti te se uklanjaju tragovi koji nastaju prilikom rezanja. Provedeno je ručno brušenje s brusnim papirima sljedećih granulacija:

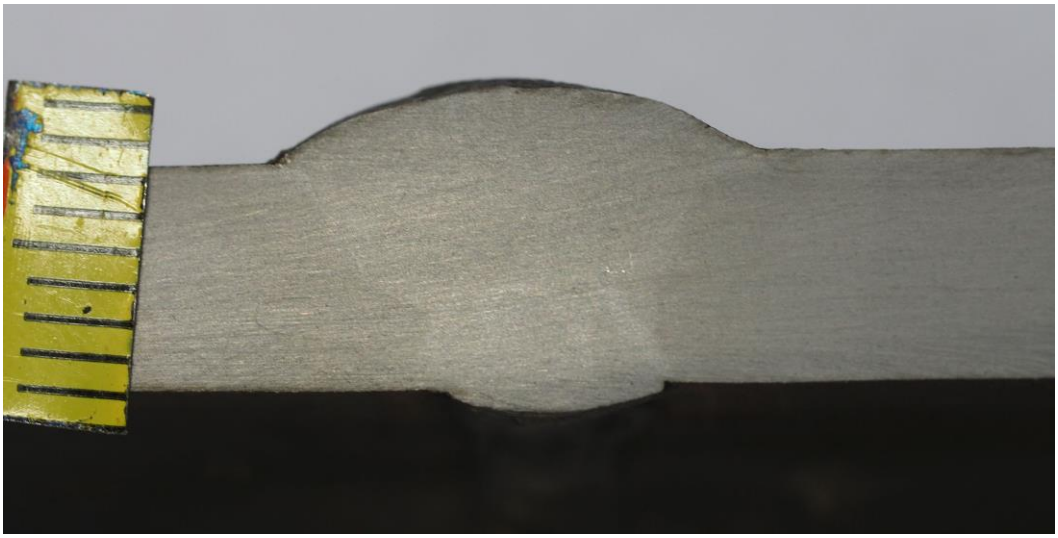
- P80,
- P100,
- P200,
- P320.

Nakon što su površine makroizbrusaka izbrušene, one se nagrizaju. Provedeno je elektrokemijsko nagrizanje u 10 % - oksalnoj kiselini, u vremenu od 4 minute, pri naponu od 5 V i struji od 2 A.

Na slikama 44 i 45 prikazane su površine izrezanih i obrađenih makroizbrusaka. Uzorak 2 je toplinski obrađen.



Slika 44. Makroizbrusak uzorka 1



Slika 45. Makroizbrusak uzorka 2

Vizualnom kontrolom makroizbrusaka nisu uočene greške naljepljivanja što upućuje na adekvatan odabir parametara zavarivanja i tehnike rada. Razna literatura preporučuje analizu mikrostrukture skenirajućim mikroskopima.

8.7. Mjerenje tvrdoće

Tvrdoća je definirana kao otpornost materijala prema prodiranju drugim tijelom znatno veće tvrdoće, gdje tvrđe tijelo može biti dijamant (najtvrđi prirodni materijal) ili neki drugi tvrdi materijal (kaljeni čelik, tvrdi metal). Ovisno o metodi, ispitivanje tvrdoće je moguće na poluproizvodima, a nekada i na gotovim proizvodima. U strojarstvu se najčešće koriste tri metode, nazvane po njihovim autorima: Vickers, Brinell, Rockwell.

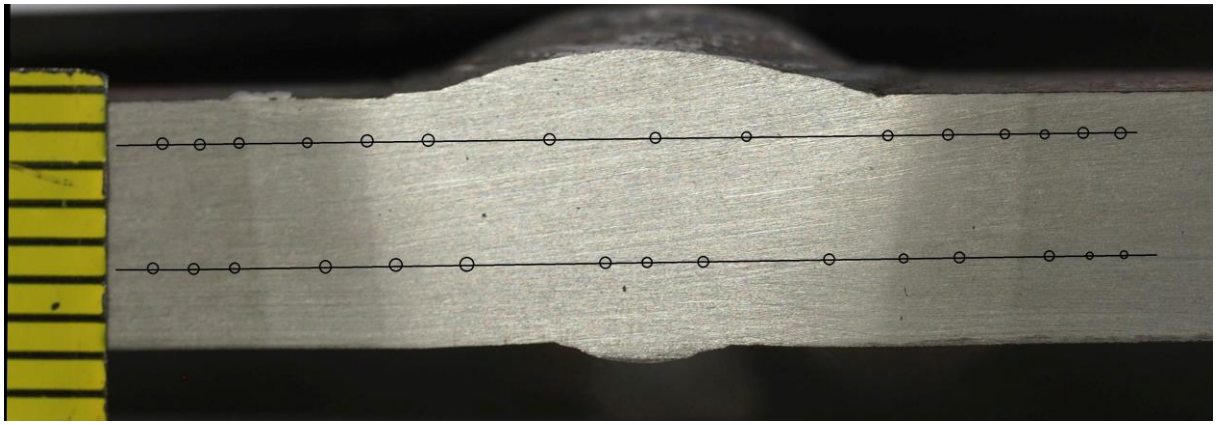
U ovom radu je za ispitivanje korištena Vickersova metoda (HV10). Ovom metodom moguće je ispitivati tvrdoću širokog spektra materijala, posebno onih s vrlo visokom tvrdoćom. Kao indentor se koristi četverostrana dijamantna piramida s vršnim kutem od 136°, a trajanje opterećenja je oko 10 sekundi. Rezultat se očitava pomoću mjernog mikroskopa pomoću kojeg se očitava duljina dijagonale otiska. Ovisno o duljini dijagonale, tvrdoća po Vickersu se očitava iz priložene tablice. Na slici 46 prikazan je uređaj za mjerenje tvrdoće Reicherter na kojem je provedeno mjerenje.



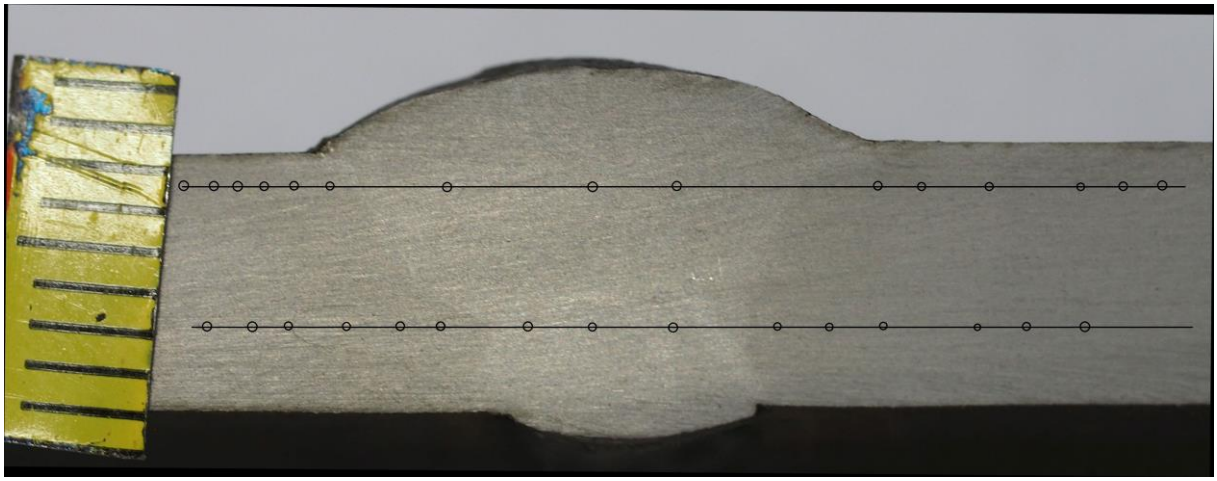
Slika 46. Uređaj za mjerenje tvrdoće

Mjerenje je provedeno na prethodno izrezanim i brušenim makroizbruscima. Važno je da su mjerna mjesta prije samog ispitivanja adekvatno pripremljena (fino brušenje, poliranje ako je potrebno) kako bi se osigurala refleksija svjetlosti za mjerenje otiska pomoću mjernog mikroskopa.

Na slici 47 i 48 prikazani su makroizbrusci uzorka 1 (nije toplinski obrađen) i uzorka 2 (toplinski obrađen) s označenim mjernim mjestima.



Slika 47. Makroizbrusak uzorka 1 s označenim točkama mjerenja tvrdoće



Slika 48. Makroizbrusak uzorka 2 s označenim točkama mjerenja tvrdoće

Mjerenja su provedena na oba uzorka, a na svakom uzorku je napravljeno 30 mjerenja (2 pravca po 15 mjerenja). U tablici 19 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće uzorka 1 i uzorka 2.

Tablica 19. Rezultati mjerenja tvrdoće

Uzorak 1				Uzorak 2			
Broj mjerenja	Izmjerena tvrdoća (HV10)	Broj mjerenja	Izmjerena tvrdoća (HV10)	Broj mjerenja	Izmjerena tvrdoća (HV10)	Broj mjerenja	Izmjerena tvrdoća (HV10)
1	274	16	297	1	292	16	285
2	264	17	304	2	274	17	236
3	275	18	302	3	289	18	297

4	383	19	413	4	297	19	283
5	397	20	428	5	285	20	294
6	421	21	459	6	322	21	256
7	464	22	542	7	317	22	312
8	401	23	473	8	351	23	309
9	409	24	566	9	342	24	300,5
10	397	25	468	10	319	25	292
11	464	26	572	11	292	26	285
12	409	27	514	12	283	27	264
13	260	28	314	13	287	28	285
14	266	29	309	14	285	29	304
15	260	30	297	15	283	30	306

Kod oba uzorka vidi se povećanje tvrdoće s približavanjem središnjem dijelu uzorka.

U tablici 20 prikazane su prosječne vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala, ZUT-a i metala zavara.

Tablica 20. Prosječne vrijednosti tvrdoće u uzorcima

	Tvrdoća (HV10)		
Uzorak 1 (bez T.O.)	Osnovni materijal	ZUT	Metal zavara
	285,2	443,75	475,83
Uzorak 2 (s T.O.)	Osnovni materijal	ZUT	Metal zavara
	285,3	289,33	321,92

Rezultati mjerenja poklapaju se s teorijskim pretpostavkama. Zavarivanjem čelika P91 utječe se na njegova svojstva, a to se između ostaloga očituje kroz povećanje tvrdoće. Provođenjem toplinske obrade poslije zavarivanja u određenom dijelu se je smanjila tvrdoća u metalu zavara i ZUT-u. Prema normi HRN EN ISO 15614-1:2017 vrijednosti tvrdoće u metalu zavara trebaju biti manje od 350 HV10.

8.8. Statičko vlačno ispitivanje

Statički vlačni pokus je postupak ispitivanja kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstava, te je to ujedno i najčešće primjenjivano ispitivanje mehaničkog svojstva. Njime se ispituje elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima statičkog vlačnog naprezanja. Određuju se osnovna svojstva materijala kao što su granica razvlačenja, vlačna čvrstoća itd. Ispitivanje se provode na kidalicama, uređajima na kojima se ispitne epruvete kontinuirano opterećuju sve do pojave loma. Prirast sile pri statičkom vlačnom ispitivanju u jedinici vremena mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja bude 10 N/mm^2 u sekundi, a za takvo sporo opterećivanje najprikladniji je hidraulički pogon kidalice. Ovaj pogon omogućuje rasterećivanje ispitnog uzorka u svakom trenutku [5].

Za vrijeme opterećivanja kontinuirano se mjere sila i produljenje epruvete i na temelju toga se određuje dijagram „sila-produljenje“. Mjerenje je provedeno na kidalici WPM EU 40 mod. Na slici 49 prikazano je radno mjesto na kojem je provedeno statičko vlačno ispitivanje.



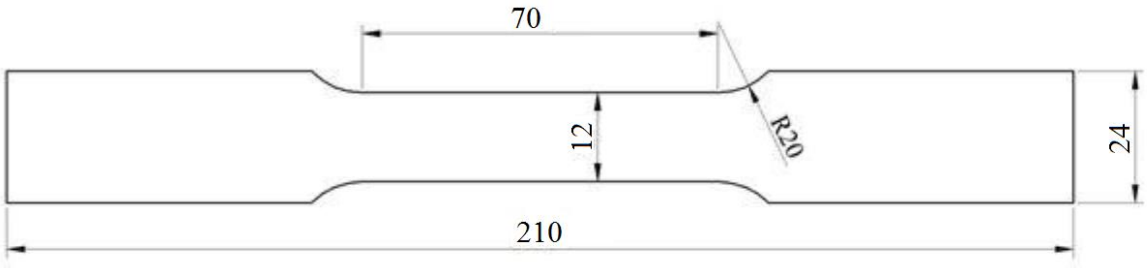
Slika 49. Oprema korištena za provođenje statičkog vlačnog ispitivanje

U tablici 20 prikazane su specifikacije korištene kidalice.

Tablica 21. Specifikacije kidalice

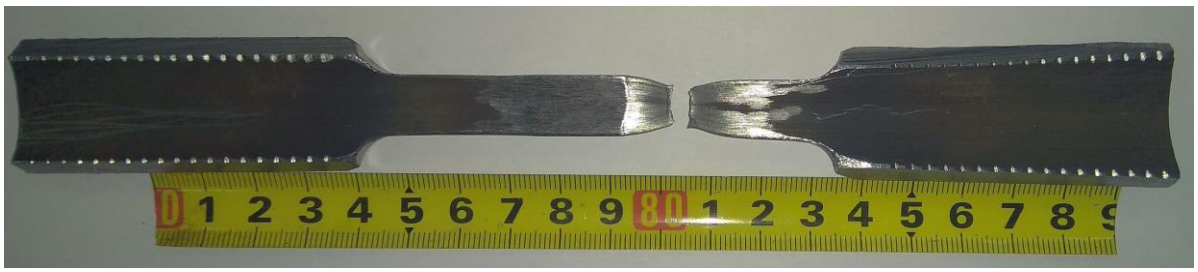
Vrsta kidalice	Univerzalna, hidraulična
Proizvođač	WPM, Njemačka
Model	EU 40 MOD
Serijski broj	990–06–83-35
Radno područje	0-400 kN

Epruvete za statički vlačni pokus izrađene su glodanjem prema normi ISO 4136:2012. Ispitane su dvije epruvete (jedna iz svakog uzorka). Na slici 50 prikazane su dimenzije ispitivanih epruveta.



Slika 50. Dimenzije ispitnih epruveta

Nakon stezanja epruvete pomoću steznih naprava u čeljusti kidalice i postavljanja ekstenzometra, moglo se je krenuti s ispitivanjem. Statički vlačni pokus odvijao se je sve do loma epruveta. Na slikama 51 i 52 prikazane su epruvete nakon statičkog vlačnog ispitivanja.



Slika 51. Uzorak 1 nakon statičkog vlačnog ispitivanja



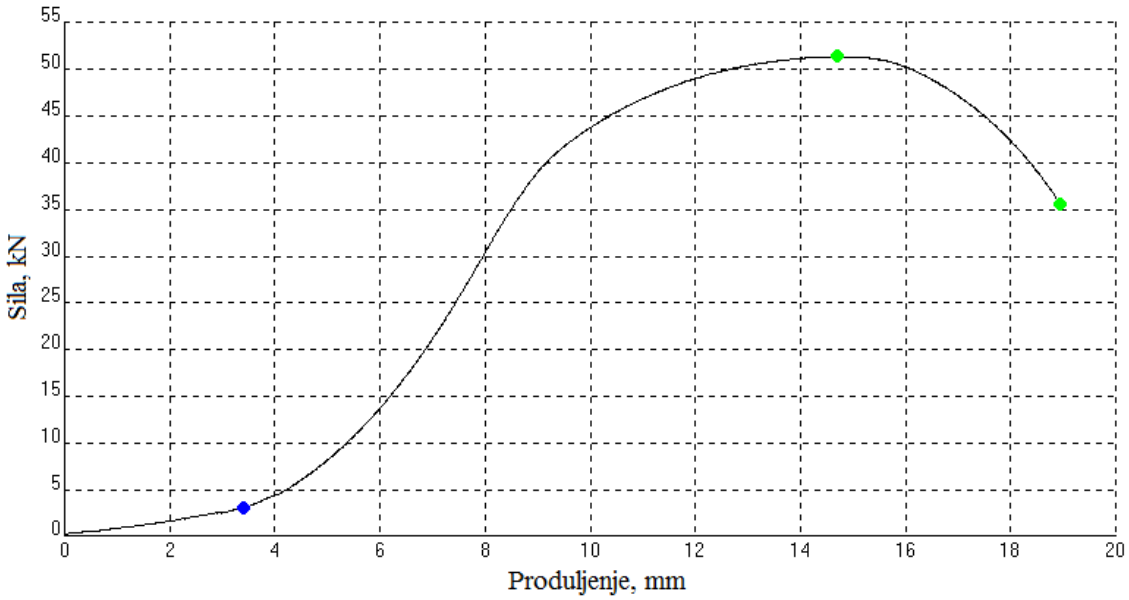
Slika 52. Uzorak 2 nakon statičkog vlačnog ispitivanja

Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja navedeni su u tablici 21.

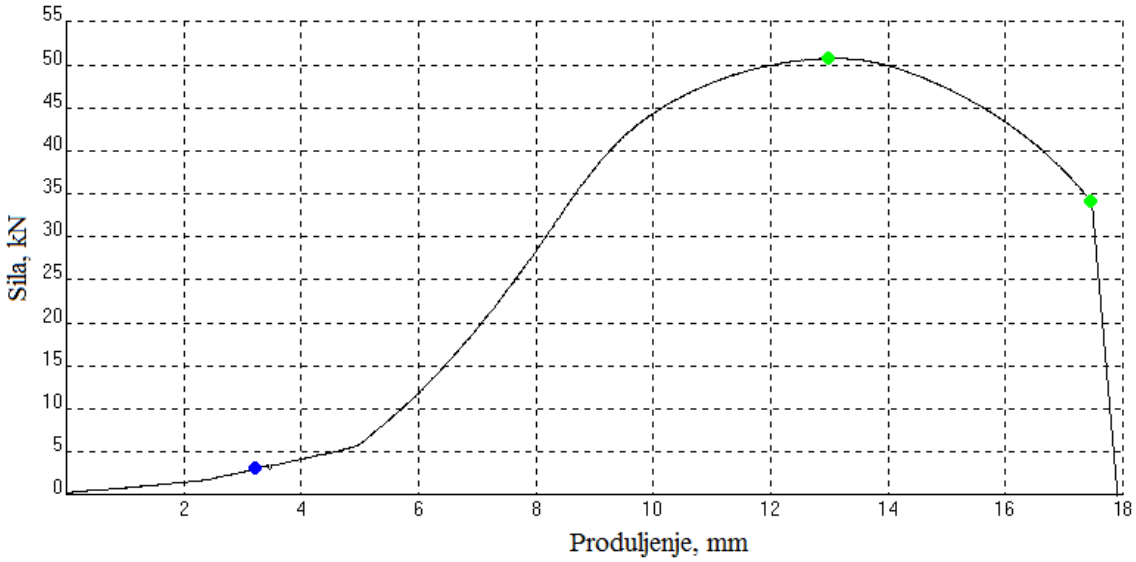
Tablica 22. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Epruvete	R_m, MPa	F_m, kN	F_k	Mjesto puknuća
Uzorak 1	617,71	51,13	35,56	Osnovni materijal
Uzorak 2	628,15	50,49	34,00	Osnovni materijal

Na slikama 53 i 54 prikazani su dijagrami sila-produljenje uzoraka dobiveni za vrijeme ispitivanja.



Slika 53. Dijagram sila-produljenje uzorka 1



Slika 54. Dijagram sila-produljenje uzorka 2

Iz rezultata ispitivanja je vidljivo da je razlika u sili kidanja minimalna. Puknuća su nastala u osnovnom materijalu i može se reći da zavari zadovoljavaju statičko vlačno ispitivanje.

9. ZAKLJUČAK

Suvremeni zahtjevi za energijom uvjetuju povećanje iskoristivosti energetskih postrojenja. Kako bi se to ostvarilo, parametri rada postrojenja su sve zahtjevniji i postoji potreba za kontinuiranim napretkom procesa i materijala korištenim u teškim uvjetima rada. Od materijala se zahtijeva kontinuirani rad pri visokim temperaturama i tlakovima uz zadržavanje mehaničkih svojstava kroz dugi vremenski period.

Suvremeni martenzitni čelici P91 nude veće mogućnosti u odnosu na zahtjevne radne parametre (temperature, naprezanja, radni medij) kao i učinkovitiju pretvorbu energije. Najveća prednost ovih čelika je otpornost na puzanje i zato se sve više koriste u zahtjevnim operativnim uvjetima energetske i kemijske industrije. Ovaj materijal je cjenovno pristupačniji od drugih materijala koji bi se mogli iskoristiti za jednaku namjenu, a mehanička svojstva su mu zadovoljavajuća za primjenu kod izgradnje i reparature termoenergetskih postrojenja.

Postoje određene razlike kod zavarivanja čelika P91 u odnosu na konvencionalne čelike čije karakteristike su puno više istražene. Kako bi se osigurala zadovoljavajuća svojstva konstrukcije, kod zavarivanja ovog čelika potrebno je provesti predgrijavanje, mora se održavati odgovarajuća međuprolazna temperatura. Nakon zavarivanja neophodna je toplinska obrada, a izbor dodatnog materijala i osiguravanje njegove kvalitete imaju veliku ulogu u očuvanju postojanosti konstrukcije.

U eksperimentalnom dijelu bilo je potrebno ostvariti kvalitetan zavareni spoj cijevi od čelika P91. Ovaj čelik se može zavarivati raznim postupcima zavarivanja. Odabir postupka zavarivanja ovisi o vrsti materijala, obliku spoja, pristupačnosti mjestu zavara, ekonomičnosti primjene, vrsti i veličini oštećenja kod reparaturnog zavarivanja, ekonomičnosti primjene, itd.

U eksperimentu je bilo potrebno ocijeniti primjenjivost mješavine Ar-He pri zavarivanju čelika P91. Kako bi se postigao zavareni spoj zadovoljavajućih svojstava, bilo je potrebno definirati odgovarajuće parametre zavarivanja. Korišten je TIG postupak zavarivanja. Zavarena su dva uzorka. Jedan uzorak je poslije zavarivanja bio toplinski obrađen, a drugi nije. Time se je htjelo ispitati utjecaj toplinske obrade poslije zavarivanja na svojstva zavarenog spoja. Nakon provođenja ispitivanja na ispitnim uzorcima zaključuje se:

- Električni luk je za vrijeme zavarivanja bio stabilan, a raspodjela taline je bila jednolika.

- Parametri zavarivanja nisu puno varirali što upućuje na njihov pravilan odabir.
- Radiografskim ispitivanjem nisu uočene veće greške u metalu zavara.
- Kod analize makrostrukture nisu uočene nepravilnosti i greške unutar profila zavara.
- Mjerenjem tvrdoće uzorka koji nije bio toplinski obrađen utvrđuje se znatna promjena tvrdoće po presjeku. Tvrdoća uzorka koji je toplinski obrađen varira znatno manje po zonama zavarenog spoja.
- Oba zavarena spoja zadovoljavaju statičko vlačno ispitivanje.

Dobiveni rezultati upućuju na dobro odabrane parametre zavarivanja. TIG postupkom zavarivanja postignut je adekvatan estetski izgled zavara. Rezultati provedenih ispitivanja ukazuju na to da je korištena zaštitna mješavina Ar-He primjenjiva za zavarivanje čelika P91. Vrijednosti tvrdoće po presjeku toplinski obrađenog uzorka dokazuju uspješnost provođenja toplinske obrade. Duljim držanjem na propisanoj temperaturi toplinske obrade može se dodatno smanjiti tvrdoća u metalu zavara.

LITERATURA

[1] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indol, Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2011.

[2] I. Garašić, Autorizirana predavanja iz kolegija „Zavarljivost materijala“, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.

[3] Predavanja iz kolegija „Posebni metalni materijali, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[4] http://www.amelin.ca/en/catalogue/75/index.html (dostupno 02. 04. 2019.)

[5] D. Ćorić, Ž. Alar, Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala - predavanja, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.

[6] S. Kožuh, Specijalni čelici – skripta, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.

[7] Properties and Welding Procedure for Grade 91 Alloy Steel, International Journal of Engineering Research and Technology, Volume 6, Number 6, 2013., pp. 767-772.

[8] B. Despotović, T. Marsenić, D. Bajić, T. Vuherer, I. Samardžić, Zavarljivost suvremenih 9-12 Cr martenzitnih čelika za komponente u kotlogradnji, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 2013., str. 5-14.

[9] T. Vuherer, M. Dunšer, LJ. Milović, M. Zrilić, I. Samardžić, Microstructural Investigation of the Heat-Affected Zone of Simulated Welded Joint of P91 Steel, Scientific Article, The journal Metalurgija, Sisak 2013.

[10] D. Gandy, J. Shingledecker, R. Viswanathan, Proceedings from the Sixth International Conference, Santa Fe, USA, 2010.

[11] D. Halici, Microstructural Evolution of the Heat-affected zone in 9 % Cr Steel, Master Thesis, Graz University of Technology, Graz, 2011.

[12] I. Samardžić, Analiza tehnologičnosti zavarenih konstrukcija, Digitalni udžbenik. http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar (dostupno 15. 05. 2019.)

[13] https://hr.wikipedia.org/wiki/Zona_utjecaja_topline#/media/File:Zona_taljenja.jpg, (dostupno 15. 05. 2019.)

[14] P. Mayr, Evolution of microstructure and mechanical properties of the heat affected zone in B-containing 9 % chromiinstructionum steels, Doctoral dissertation, Graz, 2007.

[15] Lj. Milović, Significance of cracks in the heat-affected zone of steels for elevated temperature application, Structural integrity and life, 2008., str. 55-64.

[16] V. Šiljački, G. Bakić, M. Đukić, Mismatched Welded Joints of X10CrMoVNb91 Steel - Beneficial And Non Beneficial Properties, International Conference Power Plants 2012, Serbian Society of Thermal Engineers, 2012.

[17] Instruction of welding and review of steels for power plant equipment and possibility of using HAZ simulation in order improve weld joint quality, Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2011, Slavonski Brod 2011.

[18] M. Gojić, Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.

[19] S. Kralj, Skripta za učenje iz kolegija Zavarivanje 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.

[20] S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić, Zavarivački i srodni postupci-priručnik, Zagreb, 2015.

[21] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/postupci1.pdf (dostupno 1. 6. 2019.)

[22] John Norrish, Advanced welding processes, Cambridge 1997.

[23] M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki, Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavrivanja, 2012.

[24] S. Kralj, Š. Andrić, Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

[25] J.E. Holum, Chemistry. The study of matter and its changes, John Wiley & Sons, 1993.

[26] http://www.k-tig.com/keyhole-gtaw-welding, (dostupno 1. 6. 2019.)

[27] S. Kralj, Z. Kožuh, I. Garašić, V. Panjko, Automatizirano TIP TIG zavarivanje, Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2009, Robotizacija i automatizacija u zavarivanju i ostalim tehnikama, Slavonski Brod, 2009.

[28] https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/tig/magicwave/magicwave-2200, (dostupno 20. 6. 2019.)

[29] https://www.fluke.com/en-us/product/temperature-measurement/ir-thermometers/fluke-568, (dostupno 20. 6. 2019.)

[30] http://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/29102015000000B_Boehler%20C%209%20MV-IG_tr.pdf (dostupno 20. 6. 2019.)

[31] Norma HRN EN 9692 – 1 : 2004

[32] American Welding Society, Welding handbook – volume 2, American Welding Society, 1991.

[33] Norma HRN EN 1011 – 1 : 1999

[34] http://www.probus.hr/termometri/termometri-kontaktni/5020-0309-termometar-tc-309-detalji.html, (dostupno 20. 6. 2019.)

PRILOZI

I. CD-R disc