

# Utjecaj parametara AC TIG zavarivanja na mikrostrukturu P91 čelika

---

Škrtić, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:839281>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-07**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mislav Škrtić**

Zagreb, 2021. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Mislav Škrtić

Zagreb, 2021. godina

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

Zahvaljujem mentoru prof.dr.sc. Ivici Garašiću na savjetima i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem dr.sc. Maji Jurici - Remenar na pomoći, savjetima i primjedbama tijekom izrade teorijskog i eksperimentalnog dijela ovog rada.

Zahvaljujem g. Ivanu Vovku na pomoći oko pripreme uzoraka za mikroskopsku analizu.

Također, zahvaljujem svim kolegama i prijateljima koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija.

Hvala obitelji na ukazanom povjerenju, podršci i motivaciji tijekom studiranja i tijekom izrade ovog rada.

Mislav Škrtić





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MISLAV ŠKRTIĆ** Mat. br.: 0035203535

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj parametara AC TIG zavarivanja na mikrostrukturu P91 čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of AC TIG welding parameters on microstructure of P91 steel**

Opis zadatka:

Ne temelju literaturnog pregleda obrazložiti problematiku zavarivanja čelika P91 koji se primjenjuje u izgradnji termoenergetskih postrojenja. Opisati utjecaj zavarivanja na mikrostrukturne transformacije u zoni utjecaja topline te navesti glavne probleme zavarljivosti i mehanizme nastanka pukotina. Detaljno proučiti TIG zavarivanje zavarivanje izmjeničnom strujom i definirati distribuciju topline električnog luka ovisno o promjeni polariteta i frekvencije.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno kvantificirati utjecaj parametara TIG zavarivanja izmjeničnom strujom na geometriju i svojstva cijevnih komponenti od čelika P91. Ispitivanje provesti na različitim razinama balansa polariteta i područja frekvencija mehaniziranim TIG postupkom. Na zavarenom uzorku provesti analizu makroizbruska i mikrostrukture zavara te provesti mjerenja tvrdoće.

Zaključno, na temelju dobivenih rezultata odrediti utjecaj balansa polariteta i frekvencije izmjenične struje na geometriju i mikrostrukturu zavarenog spoja i dati preporuke za daljnje istraživanje.

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

Zadatak zadan:  
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:  
2. prosinca 2021.

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

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Džerka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA .....	IX
POPIS KRATICA .....	XI
SAŽETAK.....	XIII
SUMMARY .....	XIV
1. UVOD .....	1
2. IZBOR MATERIJALA.....	3
2.1. Zahtjevi za materijalima i kriteriji izbora materijala .....	3
2.1.1. Zavarljivost materijala .....	5
3. METALNI MATERIJALI ZA RAD PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA .....	7
3.1. Promjene mehaničkih svojstava materijala porastom temperature .....	9
3.2. Puzanje materijala.....	13
4. ČELICI MEHANIČKI OTPORNI PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA	24
4.1. Ugljični (nelegirani) čelici.....	24
4.2. Niskolegirani Mo– ili Mo–Cr čelici .....	26
4.3. Visokolegirani martenzitni super 12 %Cr čelici.....	27
4.4. Visokolegirani austenitni Cr–Ni čelici .....	28
5. VISOKOLEGIRANI MARTENZITNI ČELIK P91 ZA RAD PRI VISOKIM TEMPERATURAMA .....	30
5.1. Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika P91 .....	31
5.2. Mikrostruktura čelika P91 .....	38
5.3. Transformacijske promjene čelika P91 .....	38
5.4. Svojstva nakon precipitacijskog očvršćivanja .....	41
5.5. Puzanje čelika P91 .....	42
6. ZAVARIVANJE ČELIKA P91 .....	44
6.1. Zavarivanje čelika P91 s nelegiranim i niskolegiranim čelicima .....	46
6.2. Zavarivanje čelika P91 i martenzitnih 9–12 %Cr čelika .....	47
6.3. Zavarivanje čelika P91 s austenitnim čelicima i niklovim legurama .....	48

---

6.4. Ciklus toplinske obrade u postupku zavarivanja čelika P91 .....	49
6.4.1. Predgrijavanje .....	49
6.4.2. Međuprolazna temperatura .....	50
6.4.3. Naknadna toplinska obrada .....	51
6.5. Struktura zavarenog spoja .....	53
6.6. Mehanizmi nastanka pukotina .....	56
6.6.1. Pukotine Tip I i Tip II .....	57
6.6.2. Pukotine Tipa III .....	58
6.6.3. Pukotine Tipa IV .....	59
7. POSTUPCI ZAVARIVANJA ČELIKA P91 .....	61
7.1. REL postupak zavarivanja .....	61
7.2. EPP postupak zavarivanja .....	65
7.3. TIG postupak zavarivanja .....	69
7.3.1. Vrsta struje i polariteta elektrode TIG postupka zavarivanja .....	77
8. EKSPERIMENTALNI DIO .....	82
8.1. Osnovni materijal .....	83
8.2. Zaštitni plin i netaljiva elektroda .....	85
8.3. Oprema za zavarivanje .....	87
8.4. Postupak pretaljivanja uzoraka čelika P91 .....	90
8.5. Izrada ispitnih uzoraka .....	97
8.6. Analiza makrostrukture .....	98
8.7. Analiza mikrostrukture .....	105
8.8. Ispitivanje tvrdoće .....	113
9. ZAKLJUČAK .....	118
POPIS LITERATURE .....	120

## POPIS SLIKA

Slika 1. Udjeli ukupne svjetske potrošnje energije 2019. godine [1].....	1
Slika 2. Međusobna povezanost utjecajnih faktora na zavarljivost materijala [8].....	6
Slika 3. Ovisnost modula elastičnosti i modula smičnosti čelika o temperaturi [9] .....	10
Slika 4. Ovisnost koeficijenta toplinskog istežanja čelika o temperaturi [9] .....	11
Slika 5. Ovisnost promjene mehaničkih svojstava pri povećanju temperature [9] .....	11
Slika 6. Ovisnost promjene dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika X10NiCrWTi36-15 s porastom temperature [9] .....	12
Slika 7. Ovisnost karakteristika mehaničke otpornosti o temperaturi za dvije vrste čelika [4] .....	13
Slika 8. Epruvete za statički vlačni pokus; a) okrugla epruveta, b) plosnata epruveta [11] ..	14
Slika 9. Dijagram sila – produljenje [11] .....	14
Slika 10. Konačna mjerna duljina $L_u$ [11] .....	15
Slika 11. Dijagram naprezanje – istežanje [11].....	16
Slika 12. Utjecaj povišene temperature na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja [11].....	18
Slika 13. Rezultati ispitivanja statičkog vlačnog ispitivanja u uvjetima različitih temperatura [11] .....	19
Slika 14. Utjecaj legirnih elemenata na promjenu statičke izdržljivosti pri različitim radnim temperaturama [9] .....	21
Slika 15. Utjecaj mikrostrukture na statičku izdržljivost pri 500 °C [9].....	22
Slika 16. Ovisnost statičke izdržljivosti o temperaturi [9] .....	23
Slika 17. Smanjenje potrebne debljine stjenke cijevi parovoda primjenom različitih materijala [14] .....	32
Slika 18. Usporedba toplinske vodljivost čelika P91 i nehrđajućeg čelika TP304H [13] .....	34
Slika 19. Usporedba koeficijenta linearnog toplinskog širenja čelika P91 i TP304H [13].....	35
Slika 20. Ovisnost modula elastičnosti čelika P91 i temperature [13].....	35
Slika 21. Ovisnost konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ čelika P91 i temperature [13] ..	36
Slika 22. Ovisnost vlačne čvrstoće čelika P91 i temperature [13] .....	37
Slika 23. Ovisnost žilavosti čelika P91 i temperature [13] .....	37
Slika 24. Mikrostruktura čelika P91 nakon normalizacije i popuštanja [13].....	38
Slika 25. Dijagram kontinuiranog hlađenja (CCT dijagram) čelika P91 [13] .....	39

Slika 26. Utjecaj postupka popuštanja na mehanička svojstva čelika P91 [13].....	40
Slika 27. Konvencionalna granica razvlačenja čelika P91 nakon dozrijevanja [13] .....	41
Slika 28. Vlačna čvrstoća čelika P91 nakon dozrijevanja [13] .....	41
Slika 29. Žilavost čelika P91 nakon dozrijevanja [13].....	42
Slika 30. Istezljivost čelika P91 nakon dozrijevanja [13] .....	42
Slika 31. Ovisnost granice puzanja čelika P91 pri različitim radnim temperaturama [13].....	43
Slika 32. Ovisnost naprežanja i temperature na pojavu loma uslijed puzanja čelika P91, X20 i P22 [13].....	43
Slika 33. Nedovoljno protaljivanje [5] .....	45
Slika 34. Elektrootporno predgrijavanje cijevi čelika P91 [18] .....	50
Slika 35. Iznos tvrdoće i žilavosti čelika P91 nakon postupka naknadne toplinske obrade [18] .....	52
Slika 36. Osnovna strukturna podjela zavarenog spoja [5].....	53
Slika 37. Metalurške promjene strukture zavarenog spoja čelika P91 [21] .....	54
Slika 38. Klasifikacija pukotina u zavarenim spojevima čelika za rad pri visokim temperaturama [21] .....	57
Slika 39. Pukotina Tipa I i Tipa II čelika 1,25Cr–0,5Mo [21].....	58
Slika 40. Interkristalna pukotina u grubozrnatoj zoni utjecaja topline čelika P23 [21] .....	59
Slika 41. Pukotina Tipa IV u cijevi iz niskolegiranog čelika 1Cr0,5Mo [21].....	60
Slika 42. Shematski prikaz REL postupka zavarivanja [22] .....	62
Slika 43. REL postupak zavarivanja [22].....	64
Slika 44. Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška [5] .....	66
Slika 45. Brizgalica s komorom u proizvodnji parnih kotlova [14].....	67
Slika 46. Orbitalni TIG postupak i automatizirani EPP postupak zavarivanja [14] .....	68
Slika 47. Zavareni spoj brizgalice s komorom u proizvodnji parnih kotlova [14].....	68
Slika 48. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [23].....	69
Slika 49. Shema standardne opreme TIG postupka zavarivanja [23] .....	71
Slika 50. TIG postupak zavarivanja s automatiziranim dodavanjem žice [23].....	74
Slika 51. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG postupka zavarivanja [23].....	75
Slika 52. Valni oblik izmjenične struje pravokutnog oblika kod TIG postupka zavarivanja [23] .....	80

Slika 53. Cjelokupni proces postupka zavarivanja čelika P91 [18] .....	82
Slika 54. Cijevi čelika P91 korištene u postupku zavarivanja .....	84
Slika 55. Boca zaštitnog plina <i>Argon 4,8</i> .....	86
Slika 56. Uređaj za zavarivanje <i>Welbee WB-A350P</i> [26] .....	87
Slika 57. Sučelje uređaja za zavarivanje <i>Welbee WB-A350P</i> .....	89
Slika 58. <i>Bug-O</i> sustav za automatizirani postupak zavarivanja .....	90
Slika 59. Položaj pištolja i cijevi čelika P91 u postupku zavarivanja .....	91
Slika 60. Referentni uzorak R1 pretaljivan istosmjernom strujom .....	92
Slika 61. Grafički prikaz iznosa unosa topline pojedinog uzorka .....	96
Slika 62. Izrada ispitnih uzoraka .....	97
Slika 63. Makroizbrusak referentnog uzorka R1 .....	98
Slika 64. Makroizbrusak uzorka 1 .....	98
Slika 65. Makroizbrusak uzorka 2 .....	99
Slika 66. Makroizbrusak uzorka 3 .....	99
Slika 67. Makroizbrusak uzorka 4 .....	99
Slika 68. Makroizbrusak uzorka 5 .....	100
Slika 69. Makroizbrusak uzorka 6 .....	100
Slika 70. Makroizbrusak uzorka 7 .....	100
Slika 71. Makroizbrusak uzorka 8 .....	101
Slika 72. Makroizbrusak uzorka 9 .....	101
Slika 73. Mjerene veličine u postupku analize geometrije referentnog uzorka R1 .....	102
Slika 74. Grafički prikaz širine zone taljenja pojedinih ispitnih uzoraka .....	103
Slika 75. Grafički prikaz dubine zone taljenja pojedinih ispitnih uzoraka .....	104
Slika 76. Grafički prikaz širine zone utjecaja topline pojedinih ispitnih uzoraka .....	105
Slika 77. Sitnozrnata mikrostruktura osnovnog materijala prije postupka pretaljivanja pod povećanjem od 200x .....	106
Slika 78. Mikroskopska snimka zone taljenja i ZUT-a ispitnog uzorka 2 pod uvećanjem 100 puta .....	107
Slika 79. Mikroskopska snimka zone taljenja i ZUT-a ispitnog uzorka R1 pod uvećanjem 100 puta .....	107
Slika 80. Mikroskopska snimka zone taljenja i ZUT-a ispitnog uzorka 1 pod uvećanjem 100 puta .....	108

---

Slika 81. Mikroskopska snimka zone taljenja i ZUT-a ispitnog uzorka 5 pod uvećanjem 100 puta.....	108
Slika 82. Mikroskopska snimka zone taljenja i ZUT-a ispitnog uzorka 9 pod uvećanjem 100 puta.....	109
Slika 83. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka R1 pod uvećanjem 100 puta	110
Slika 84. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka 2 pod uvećanjem 100 puta...	110
Slika 85. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka 3 pod uvećanjem 100 puta...	111
Slika 86. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka 7 pod uvećanjem 100 puta...	111
Slika 87. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka 8 pod uvećanjem 100 puta...	112
Slika 88. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka 9 pod uvećanjem 100 puta...	112
Slika 89. Tvrdomjer proizvođača <i>REICHERTER</i> .....	113
Slika 90. Shematski prikaz redoslijeda ispitivanja tvrdoće ispitnih uzoraka .....	114
Slika 91. Usporedba prosječnih vrijednosti mjerenja tvrdoće s iznosom unesene topline ....	116

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature metalnih materijala [9]..	8
Tablica 2. Kemijski sastav i mehanička svojstva ugljičnih čelika za kotlovske limove prema DIN 17175. [9] .....	25
Tablica 3. Mehanička svojstva nelegiranih toplinski postojanih čelika za rad pri radnim temperaturama nižim od 580 °C. [9].....	26
Tablica 4. Mehanička svojstva visokolegiranih martenzitnih čelika za dugotrajni rad pri temperaturama do 600 °C. [9] .....	28
Tablica 5. Mehanička svojstva austenitnih čelika za primjenu u radu pri visokim temperaturama od 600 °C do 750 °C [9].....	29
Tablica 6. Kemijski sastav čelika P91 [13].....	32
Tablica 7. Glavna fizikalna svojstva čelika P91 [13].....	33
Tablica 8. Vrijednosti mehaničkih svojstava čelika P91 [13].....	36
Tablica 9. Tipične vrijednosti udjela kemijskih elemenata metala zavara za različite postupke zavarivanja [13] .....	47
Tablica 10. Usporedba karakteristika pojedinih vrsta elektroda u TIG postupku zavarivanja [23] .....	72
Tablica 11. Orijentacijske vrijednosti jakosti struje TIG postupka zavarivanja [5].....	73
Tablica 12. Usporedba karakteristika zavarivanja primjenom zaštitih plinova Ar i He [23]...	76
Tablica 13. Karakteristike TIG postupka zavarivanja u ovisnosti o vrsti struje zavarivanja i polaritetu elektrode [23] .....	78
Tablica 14. Utjecaji parametara frekvencije i balansa zavarivanja na zavareni spoj i netaljivu elektrodu [23] .....	81
Tablica 15. Kemijski sastav osnovnog materijala [13] .....	85
Tablica 16. Mehanička svojstva osnovnog materijala [13].....	85
Tablica 17. Specifikacije uređaja za zavarivanje <i>Welbee WB-A350P</i> [26].....	87
Tablica 18. Iznosi parametara postupka zavarivanja istosmjernom strujom .....	91
Tablica 19. Parametri postupka zavarivanja izmjeničnom strujom .....	91
Tablica 20. Ispitni uzorci nakon pretaljiivanja izmjeničnom strujom.....	93
Tablica 21. Vrijednosti iznosa unosa topline tijekom postupka zavarivanja pojedinih uzoraka .....	95



Tablica 22. Rezultati mjerenja geometrije pretaljenih uzoraka.....	102
Tablica 23. Rezultati ispitivanja tvrdoće.....	114
Tablica 24. Prosječne vrijednosti iznosa tvrdoće u zoni taljenja i zoni utjecaja topline.....	115

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
$\Delta L$	mm	produljenje
$\Delta L_u$	mm	produljenje nakon kidanja
$A$	%	istezljivost
$A_{c1}$	°C	temperatura eutektoidne pretvorbe
$A_{c3}$	°C	temperatura pretvorbe austenita
$A_9$	%	istezljivost pri radnoj temperaturi
$C_e$	%	ekvivalent ugljika
$E$	kJ/mm	unos topline
$E_9$	N/mm <sup>2</sup>	modul elastičnosti pri radnoj temperaturi
$F$	N	sila
$F_e$	N	sila tečenja
$F_k$	N	kritična sila
$F_m$	N	maksimalna sila
$G$	N/mm <sup>2</sup>	modul smičnosti
$I$	A	jakost struje
$L_o$	mm	početna mjerna duljina epruvete
$L_u$	mm	konačna mjerna duljina epruvete
$M_f$	°C	temperatura završetka martenzitne pretvorbe
$M_s$	°C	temperatura početka martenzitne pretvorbe
$R_{d/9}$	N/mm <sup>2</sup>	dinamička izdržljivost pri radnoj temperaturi
$R_e$	N/mm <sup>2</sup>	granica razvlačenja
$R_{eh}$	N/mm <sup>2</sup>	gornja granica razvlačenja
$R_{el}$	N/mm <sup>2</sup>	donja granica razvlačenja
$R_k$	N/mm <sup>2</sup>	lomna čvrstoća
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoće
$R_{m/9}$	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća pri radnoj temperaturi
$R_{p0,2/9}$	N/mm <sup>2</sup>	konvencionalna granica razvlačenja pri radnoj temperaturi
$S_o$	mm <sup>2</sup>	površina poprečnog presjeka epruvete
$t$	s	vrijeme
$T_p$	°C	vršna temperatura
$T_r$	°C	radna temperatura
$T_t$	°C	temperatura tališta
$U$	V	napon struje
$v$	mm/min	brzina zavarivanja
$\beta$	K <sup>-1</sup>	koeficijent toplinskog istezanja

$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	naprezanje
$\varepsilon$	mm/mm	relativno produljenje
$\varepsilon_u$	mm/mm	konačno relativno produljenje
$\eta$	-	koeficijent iskoristivosti električnog luka
$\vartheta$	K	temperatura

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
A	austenit
AC	<i>Alternating Current</i> – izmjenična struja
Al	aluminij
As	arsen
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> - Američko udruženje inženjera strojarstva
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> - Američko udruženje za ispitivanja i materijale
B	bainit
B	bor
BCC	<i>Body Centered Cubic</i> – prostorno centrirana kristalna rešetka
C	ugljik
Co	kobalt
Cr	krom
DC	<i>Direct Current</i> – istosmjerna struja
DCEN	<i>Direct Current Electrode Negative</i> – elektroda na negativnom polu istosmjerne struje
DCEP	<i>Direct Current Electrode Positive</i> – elektroda na pozitivnom polu istosmjerne struje
DVM	<i>Deutscher Verband für Materialprüfung</i> – Njemačka udruga za ispitivanje materijala
EPP	elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška
F	ferit
FCC	<i>Face Centered Cubic</i> – plošno centrirana kristalna rešetka
HB	tvrdoća prema Brinell-u
HRC	tvrdoća prema Rockwell-u
HV	tvrdoća prema Vickers-u
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
M	martenzit
MAG	<i>Metal Active Gas</i> – elektrolučno zavarivanje u zaštiti aktivnog plina
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> – elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog plina
Mn	mangan
Mo	molibden
N	dušik
Nb	niobij
Ni	nikal
P	fosfor

---

REL	ručno elektrolučno zavarivanje
S	sumpor
Sb	antimon
SSC	<i>Sulfide Stress Cracking</i> – napetosna korozija
Si	silicij
Sn	kositar
Ti	titan
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> – elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
V	vanadij
W	volfram
ZT	zona taljenja
ZUT	zona utjecaja topline
$\alpha$ -Fe	ferit
$\gamma$ -Fe	austenit
$\delta$	delta ferit

## **SAŽETAK**

U teorijskom dijelu rada dan je pregled metalnih materijala za rad pri visokim temperaturama. Opisane su promjene koje se događaju u čelicima uslijed rada pri visokim temperaturama. Detaljno su opisane karakteristike visokolegiranog martenzitnog čelika P91 koji se primjenjuje u izgradnji termoenergetskih postrojenja. Obrazložena je problematika zavarivanja čelika P91, opisane mikrostrukturne transformacije u zoni utjecaja topline i mehanizmi nastanka pukotina. Prikazani su najčešće korišteni postupci zavarivanja s posebnim naglaskom na primjeni TIG postupka zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje utjecaja parametara TIG postupka zavarivanja izmjeničnom strujom na geometriju i svojstva zavarenog spoja čelika P91. Nakon postupka pretaljivanja, za svaki ispitni uzorak utvrđen je unos topline. Ispitni uzorci su podvrgnuti analizi mikrostrukture i mjerenju tvrdoće. Na temelju analiziranih podataka dobivenih ispitivanjem, doneseni su zaključci o primjeni TIG AC postupka zavarivanja čelika P91.

**Ključne riječi:** čelik P91, balans izmjenične struje, frekvencija izmjenične struje

## **SUMMARY**

In the theoretical part of the paper, an overview of high temperature metallic materials is given. The changes that occur in steels due to the high temperature operation are described. The characteristic features of high-alloy martensitic steel P91 used in construction of thermal power plants are described in detail. The weldability of steel P91 is explained, microstructural transformations in the heat affected zone and the mechanisms of crack formation are described. The most commonly used welding procedures are presented with special emphasis on the application of TIG welding process.

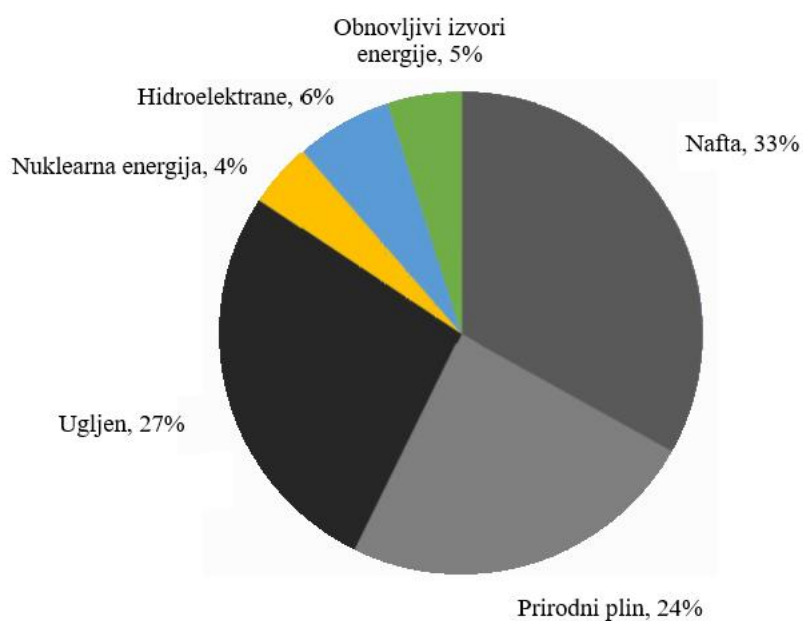
In the experimental part of the paper, the influence of parameters of the TIG AC welding process on the geometry and properties of the welded joint of steel P91 was investigated. After the welding procedure, heat input for each test sample was determined. The test specimens were subjected to microstructural analysis and hardness measurement. Based on the analyzed data obtained by testing, conclusions were made on the application of TIG AC welding procedure of steel P91.

**Key words:** P91 steel, alternating current balance, alternating current frequency

## 1. UVOD

Ukupna svjetska potrošnja energije u 2019. godini porasla je za 1,3%, što je gotovo upola manje od iznosa stope povećanja potrošnje energije 2018. godine (2,8%). Ovime je ostvarena deseta uzastopna godina u kojoj je svijet postavio rekord u potrošnji energije. Najveći udio u povećanju potrošnje energije 2019. godine, s 41% pridonijeli su obnovljivi izvori energije. Korištenje prirodnog plina doprinosi drugom najvećem povećanju potrošnje energije s 36%. Međutim, u ukupnom udjelu potrošnje energije prednjači korištenje nafte s 33% svjetske potrošnje energije. Ostatak globalne potrošnje energije ostvaruje se korištenjem ugljena (27%), prirodnog plina (24%), hidroelektrana (6%), obnovljivih izvora energije (5%) i nuklearnih elektrana (4%). U ukupnoj svjetskoj potrošnji energije 2019. godine, udio fosilnih goriva još uvijek čini 84% potrošnje energije, kako je prikazano na slici 1. [1]

### SVJETSKA POTROŠNJA ENERGIJE 2019. GODINE



Slika 1. Udjeli ukupne svjetske potrošnje energije 2019. godine [1]

Napori gospodarstava za smanjenjem korištenja fosilnih goriva i prijelaz na obnovljive izvore energije za rješavanje klimatskih promjena suočeni su sa značajnim tehnološkim preprekama koje su često izvan samih ekonomskih utjecaja pojedinih gospodarstava. Potpuni



prijelaz na obnovljive izvore energije zahtijeva ogromne, a pojedini znanstvenici tvrde i neodržive količine sirovina i zemljišta. Nadalje, cjelokupna industrijska proizvodnja koja sudjeluje u pojedinim fazama u životnom ciklusu fosilnih goriva poput ekstrakcije, obrade, transporta i sagorijevanja fosilnih goriva izgubit će svoj smisao postojanja. Također, obnovljivi izvori energije imaju manju gustoću energije u odnosu na fosilna goriva, pa je za dobivanje iste količine proizvedene snage potrebno uložiti veću količinu energije iz obnovljivih izvora po masi ili po volumenu. Tako npr. benzin ima milijardu puta veću gustoću energije za dobivanje snage u odnosu na energiju vjetra i vode, i deset milijuna puta veću energiju za dobivanje snage u odnosu na snagu čovjeka. Prednosti i nedostaci pojedinih izvora energije postavljaju temeljna ograničenja o količinama energije koja se može dobiti korištenjem obnovljivih izvora energije i fosilnih goriva. U mnogim slučajevima, utjecaj obnovljivih izvora energije na okoliš može biti isti ili čak i veći od utjecaja koji imaju vađenje i sagorijevanja nafte, prirodnog plina ili čak ugljena. [2]

Kako bi se smanjio štetni utjecaj fosilnih goriva na okoliš potrebno je povećati učinkovitost energetske postrojenja. To se postiže povećanjem radnih parametara poput tlakova i temperatura čime se žele smanjiti gubici pri prijenosu topline. Na taj način, za istu količinu fosilnih goriva povećava se iznos proizvedene električne energije. Presudni faktor povećanju radnih parametara predstavlja materijal, od kojega se zahtijeva svojstvo otpornosti na puzanje i visokotemperaturnu koroziju tj. oksidaciju u uvjetima naprežanja u iznosu od 140 MPa i temperature od 600 °C. Potreba za višim radnim parametrima u industriji proizvodnje energije rezultirala je razvojem čelika otpornih na puzanje s visokim udjelom kroma, poput visokolegiranog martenzitnog čelika P91. Dijelovi konstrukcija izrađenih od čelika P91 koji se koriste u energetske postrojenjima spajaju se postupcima zavarivanja, a za kvalitetno izrađeni zavareni spoj važno je provoditi predgrijavanje, održavati propisanu međuprolaznu temperaturu i toplinski obraditi radni komad nakon postupka zavarivanja. [3]

## 2. IZBOR MATERIJALA

Odabirom materijala bitno se utječe na tehničke karakteristike konstrukcije, njezine troškove prilikom izrade, održavanja kao i na ukupnu konkurentnost proizvoda. Izbor materijala usko je povezan s projektiranjem i konstruiranjem dijelova i izborom materijala i razradom postupka proizvodnje i montaže. Ključne odluke o materijalu u pravilu se donose u početnoj fazi konstruiranja, iako se problem izbora i zamjene materijala može pojaviti i tijekom upotrebe proizvoda. Osnovni zadatak u početnoj fazi konstruiranja je uskladiti konstrukcijsko – tehnološke zahtjeve s jedne, i zahtjeve za određenim svojstvima materijala s druge strane. Sam proces konstruiranja započinje iz vizualnog koncepta cjelovitog proizvoda pri čemu je u obzir potrebno uzeti sljedeća svojstva proizvoda [4]:

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

Promatrajući povijest tehnike može se uočiti da su konstrukcije poput: svemirskih letjelica i naprava, motora i turbina, sklopova u elektrotehnici, bioimplantata, vozila, kućanskih aparata, vojne tehnike i sl. doživjele značajna poboljšanja zahvaljujući primjeni drugačijih materijala u odnosu na prije 30-ak ili 50-ak godina. Sve raznovrsniji i stroži zahtjevi za kvalitetom, pouzdanošću i trajnošću dijelova, sklopova i postrojenja učinili su izbor prikladnog materijala sve složenijim i odgovornijim zadatkom za konstruktora i tehnologa. Nadalje, zbog sve kraćeg vremena između razvoja nekog novog materijala i njegove primjene potrebno je raspolagati kvalitetnim informacijama o tim materijalima u odnosu na postojeće kako bi se moglo brže reagirati i ostvariti konkurentsku prednost. [4]

### 2.1. Zahtjevi za materijalima i kriteriji izbora materijala

Najvažniji i osnovni zahtjevi tijekom konstruiranja povezani su s funkcioniranjem dijela, sklopa ili cijele konstrukcije tijekom cjelokupnog vremena upotrebe proizvoda. Eksploatibilnost govori o ponašanju materijala u uvjetima eksploatacije pri čemu treba voditi računa o [4]:

- očuvanju definiranih dimenzija i oblika konstrukcije pri čemu su važna mehanička svojstva materijala,
- očuvanju cjelovitosti konstrukcije tj. otpornosti na lom za koju su važna mehanička svojstva materijala,
- sprječavanju oštećenja površine uslijed trošenja, korozije i sličnih procesa dotrajavanja,
- zadržavanju ostalih fizikalnih svojstava bitnih za očuvanje funkcije proizvoda tijekom vremena njegove upotrebe.

Navedeni se zahtjevi izražavaju kroz traženu: nosivost, sigurnost i pouzdanost, trajnost, prikladnost za održavanje i zamjenom. Osnovna svojstva materijala koja opisuju ove zahtjeve i kriterije izbora materijala su [4]:

- fizikalno – kemijska svojstva
- mehanička otpornost
- otpornost na trošenje
- otpornost na djelovanje agresivnih medija, plinova,
- otpornost na biološke utjecaje, zračenje i sl.

Tehnološkičnost materijala govori o prikladnosti tj. sposobnosti materijala za obradu ili oblikovanjem nekim od tehnoloških procesa. U širem smislu tehnološkičnost je određena materijalom i tehnološkim postupkom (vrstom opreme, parametrima procesa i ljudskim faktorom). Opća prikladnost za obradu ili oplemenjivanjem materijala obično se kvantificira pomoću sljedećih tehnoloških svojstava [4]:

- livljivost,
- obradivost odvajanjem čestica – rezljivost,
- oblikovljivost deformiranjem,
- spojivost: zavarljivost, lemljivost, prikladnost za lijepljenje,
- toplinska obradivost: zakaljivost, prokaljivost,
- prikladnost za prevlačenje i zaštitu površine,
- troškovi izrade povezani uz materijale.

Raspoloživost, nabavljivost i cijena materijala obuhvaća informacije o porijeklu materijala, raspoloživim vrstama, stanju i dimenzijama materijala, kvaliteti materijala pojedinih proizvođača, troškovima i cijeni nabave materijala pojedinih proizvođača. [4]

Standardiziranost tj. normiranost ukazuje na potrebu da se primarno primjenjuju materijali propisani normama. Osim toga često se polazi od potrebe ispunjenja određenih propisa, zakona, normi i preporuka u pogledu obavezne primjene unaprijed određenih vrsta materijala ili zadovoljenja specifičnih svojstava, ograničenja i uvjeta primjene, uvjeta sigurnosti i zdravlja ljudi ili zaštite okoliša. [4]

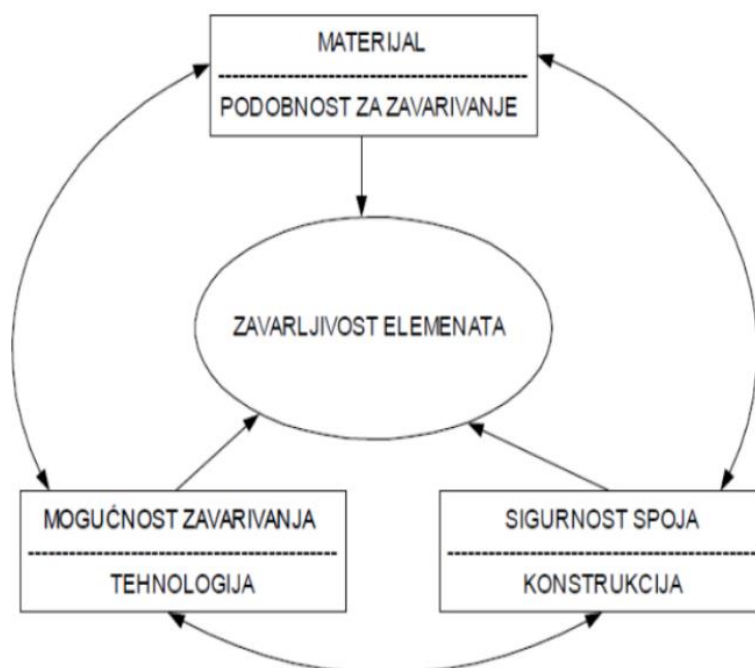
### ***2.1.1. Zavarljivost materijala***

Zavarivanje se u današnje vrijeme smatra jednim od najvažnijih i najprikladnijih načina čvrstog spajanja sastavnih dijelova prilikom izgradnje svih vrsta metalnih konstrukcija, neovisno o njihovim dimenzijama, namjeni i vrsti metala. Može se definirati kao spajanje dvaju ili više, istorodnih ili raznorodnih materijala, taljenjem ili pritiskom, s ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogeni zavareni spoj. Vrlo često predstavlja neizostavnu tehniku spajanja materijala koji su tijekom eksploatacije izloženi vrlo visokim ili vrlo niskim temperaturama, agresivnim medijima, udarnom i dinamičkom opterećenju, te različitim kombiniranim opterećenjima. U pojedinim situacijama zavarivanje se nameće kao najtehnologičnije rješenje spajanja materijala za postizanje zahtijevane kvalitete spoja i uz najniže troškove spajanja. [5,6]

Zavarljivost materijala predstavlja jedan od ključnih pojmova u zavarivačkoj tehnologiji, a odnosi se kako na osnovni i dodatni materijal, tako i na zavarivani proizvod ili strukturu, parametre, režim i postupak zavarivanja. Predstavlja jedno vrlo složeno svojstvo kojega nije jednostavno definirati. Ipak, dosta pojednostavljeno, može se reći da je zavarljivost materijala svojstvo zavarivanog metala koje pokazuje da se određenim postupkom zavarivanja može ostvariti homogeni spoj, koji će udovoljiti predviđenim uvjetima i vijeku uporabe zavarenog proizvoda ili strukture. Praktički nema opće zavarljivosti nekog metala, već se ona mora utvrditi za svaki pojedini postupak zavarivanja, dodatni materijal, vrstu spoja, predviđenu namjenu proizvoda ili strukture, odnosno za svaki slučaj zavarivanja posebice. Prema definiciji Međunarodne organizacije za normizaciju, metal je za određenu namjenu zavarljiv određenim postupkom zavarivanja, ako se može postići homogenost zavarenog spoja. Kod toga,

homogenost se zavarenog spoja može narušiti, prije svega, pojavom pukotina, nemetalnih uključaka i poroznosti, pa se zavarljivost metala često ocjenjuje na temelju sklonosti pojavi pukotina. Zavarljivost je komparativno svojstvo pri čemu se uspoređuje zavarljivost dvaju ili više materijala uz primjenu iste ili različite tehnologije zavarivanja. Ocjena zavarljivosti najčešće je kvalitativna (zadovoljavajuća/nezadovoljavajuća), ali može biti i kvantitativna, određena jednadžbama za ekvivalent ugljika  $C_e$ . Do uvođenja i korištenja vrijednosti ekvivalenta ugljika došlo se saznanjem da se pojava pukotina povećava s porastom sadržaja ugljika i da pojedini legirni elementi poput: mangana, kroma, vanadija, molibdena, nikla i dr. imaju sličan, ali relativno manji utjecaj na pojavu pukotina od ugljika. Najznačajniji utjecaj na zavarljivost ima materijal, kako njegov nominalni kemijski sastav, također, ali u manjoj mjeri, primjese, veličina zrna, vrsta primijenjene prethodne toplinske obrade, stanje izrade, veličina i oblik komada i konstrukcije. [5,7]

Na slici 2. prikazana je povezanost utjecajnih faktora koji definiraju zavarljivost materijala.



Slika 2. Međusobna povezanost utjecajnih faktora na zavarljivost materijala [8]

### 3. METALNI MATERIJALI ZA RAD PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

Pojedini dijelovi strojeva mogu tijekom eksploatacije biti izloženi povišenim i visokim radnim temperaturama pa se nad tim konstrukcijskim materijalima stavlja zahtjev za zadržavanjem mehaničke otpornost uslijed postizanja povišenih i visokih radnih temperatura. Povišene ili visoke radne temperature prisutne su u termoenergetskim postrojenjima, kemijskim i procesnim postrojenjima, u metalurškim pogonima, u nuklearnim električnim elektranama, raketama i svemirskim brodovima i sl., pa se od takvih materijala izrađuju [9]:

- dijelovi parnih kotlova,
- dijelovi uređaja za preradbu nafte,
- kolektori pare kotlova i turbine,
- dijelovi parnih i plinskih turbina (osovine, rotor, lopatice),
- cijevi i oplata pregrijača pare,
- toplinski čvrsti vijci i matice,
- dijelovi motora s unutarnjim izgaranjem (posebno velikih brodskih).

Pojedini materijali pokazuju izraženije promjene ponašanja u odnosu na druge materijale, pa se svakoj skupini materijala može pridružiti karakteristično područje temperatura kod kojih nastupaju izraženije promjene svojstava. Visina iznosa granične temperature iznad koje dolazi do značajnijih promjena u svojstvima ovisi o talištu materijala ( $T_t$ ), pri čemu se radne temperature ( $T_r$ ) uobičajeno dijele na [9]:

- niske temperature:  $T_r < 0,25 \cdot T_t$ ,
- povišene temperature:  $T_r = (0,25-0,4) \cdot T_t$ ,
- visoke temperature:  $T_r > 0,4 \cdot T_t$ .

Pri čemu su iznosi radnih temperatura i temperatura tališta materijala izraženi u kelvinima.

Čelici predstavljaju materijale čija je temperatura tališta relativno visoka u odnosu na npr. aluminij, bakar i njihove legure ili pak polimerne materijale pa zbog bolje mehaničke otpornosti pri povišenim i visokim temperaturama imaju prednost u primjeni u odnosu na te materijale. Relativnost visina temperatura može se vidjeti iz primjera za željezne legure [4,9,10]:

- niske temperature su iznosa nižih od  $T_r = 0,25 \cdot (1536 + 273) = 452,25$  K, tj. nižih od 450 K, što znači da za željezne legure niskim temperaturama treba smatrati radne temperature niže od 180 °C,
- povišenim temperaturama smatrat će se sve one radne temperature između;  $T_r = (0,25 - 0,4) \cdot (1536 + 273) \rightarrow 452,25 \text{ K} < T_r < 723,6 \text{ K}$ , tj radne temperature između 180 °C i 450 °C,
- visoke radne temperature za željezne legure su sve one iznad 450 °C, a to su praktički temperature više od rekristalizacijske temperature čistog željeza, hladno oblikovanog deformiranjem stupnjem oblikovanja višim od 92 %.

Iskustva pokazuju da se zadovoljavajuća mehanička svojstva postižu do temperatura od približno  $2/3 \cdot T_i$ , premda su u praksi maksimalne radne temperature često znatno niže. [9]

U tablici 1. prikazane su radne temperature za pojedine vrste metalnih materijala.

Tablica 1. Niske, povišene, visoke i maksimalne radne temperature metalnih materijala [9]

Vrsta metala	Talište ( $T_i$ ), °C	Niske temperature, °C	Povišene temperature, °C	Visoke temperature, °C	Potencijalna radna temperatura ( $2/3 \cdot T_i$ ), °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

Važnost daljnjeg unapređivanja materijala za rad pri visokim temperaturama proizlazi iz činjenice da je u današnje vrijeme materijal jedini ograničavajući faktor daljnjem povišenju radnih temperatura, i to ili zbog naprezanja ili zbog preskupe primjene. Na dijelove strojeva i aparata, izloženih dugotrajnom djelovanju naprezanja pri povišenoj ili visokoj temperaturi, djeluje i okoliš, te uz temperature iznad 600 °C izaziva kemijsku koroziju tj. oksidaciju. Poželjno je da se čelici opiru tom djelovanju, ali nažalost još nije moguće osigurati istodobnu otpornost na puzanje i visokotemperaturnu koroziju tj. vatrootpornost. Stoga se danas visokotemperaturni čelici dijele na [9,10]:

- toplinski otporne – visoke otpornosti na puzanje i općenito mehanička svojstva, ali slabe vatrootpornosti,
- vatrootporne – visoko postojane na oksidaciju, ali slabije otpornosti puzanju.

Poseban problem pri izboru optimalnog materijala proizlazi iz činjenice, da neki uređaji moraju biti tako konstruirani da budu u mogućnosti raditi bez prekida godinama, pa čak prema suvremenim zahtjevima katkada i više od 20 godina (npr. uređaji u procesnoj industriji, nuklearnim pogonima, u svemirskim letjelicama itd.). Ponekad se u takvim uvjetima neće moći izvoditi nikakvi remontni radovi, pa i materijal u takvim slučajevima mora pridonijeti potpunoj sigurnosti rada. Problemi će biti tim izraženiji što je više radno naprezanje, viša radna temperatura i predviđena trajnost. Tipične pojave vezane uz mehanička svojstva pri povišenim temperaturama su [9,10]:

- promjene vrijednosti granice razvlačenja, vlačne čvrstoće, modula elastičnosti, istežljivosti i žilavosti,
- pojava puzanja,
- promjena dinamičke izdržljivosti.

### 3.1. Promjene mehaničkih svojstava materijala porastom temperature

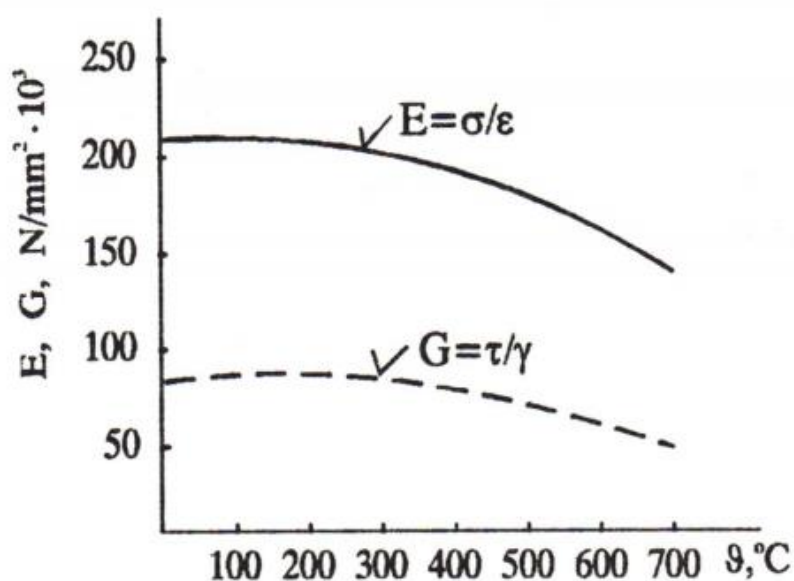
Dijelovi strojeva koji se primjenjuju u radu pri povišenim i visokim radnim temperaturama u području u kojemu još ne dolazi do puzanja, dimenzioniraju se na temelju mehaničkih svojstava utvrđenih pri definiranoj temperaturi koja obično odgovara radnoj temperaturi  $T_r$ . Za proračun takvih konstrukcija u obzir se uzimaju sljedeća svojstva [9]:

- $R_{m/9}$  – vlačna čvrstoća pri radnoj temperaturi,

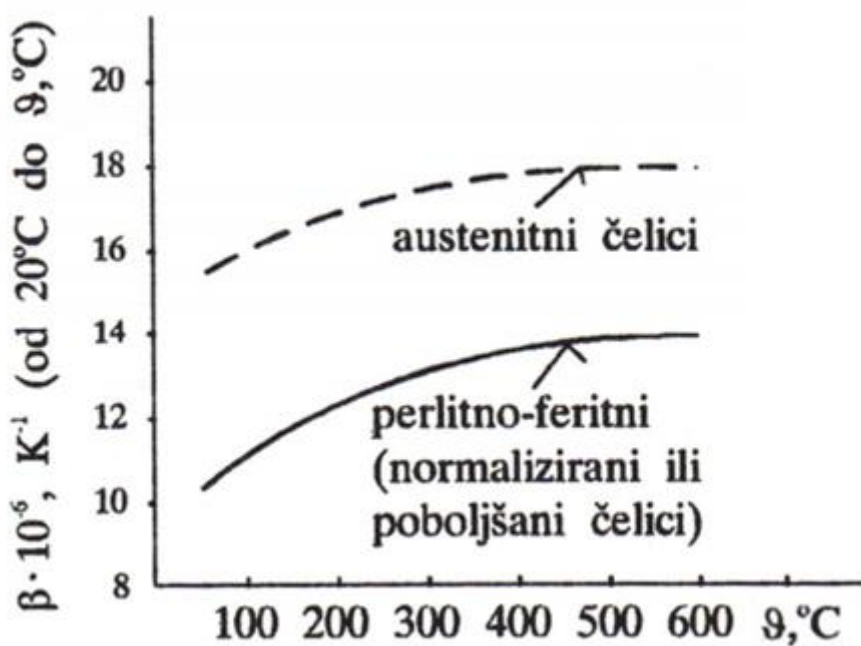


- $R_{p0,2/\vartheta}$  – konvencionalna granica razvlačenja pri radnoj temperaturi,
- $E_{\vartheta}$  – modul elastičnosti pri radnoj temperaturi,
- $A_{\vartheta}$  – istezljivost pri radnoj temperaturi,
- $R_{d/\vartheta}$  – dinamička izdržljivost pri radnoj temperaturi.

Usljed povećavanja temperature, od mehaničkih svojstava snižava se modul elastičnosti ( $E$ ) i modul smičnosti ( $G$ ), a raste koeficijent toplinskog istezanja ( $\beta$ ). Ovisnost modula elastičnosti i modula smičnosti o temperaturi te koeficijenta toplinskog istezanja u ovisnosti o temperaturi prikazani su na slikama 3. i 4. [9]

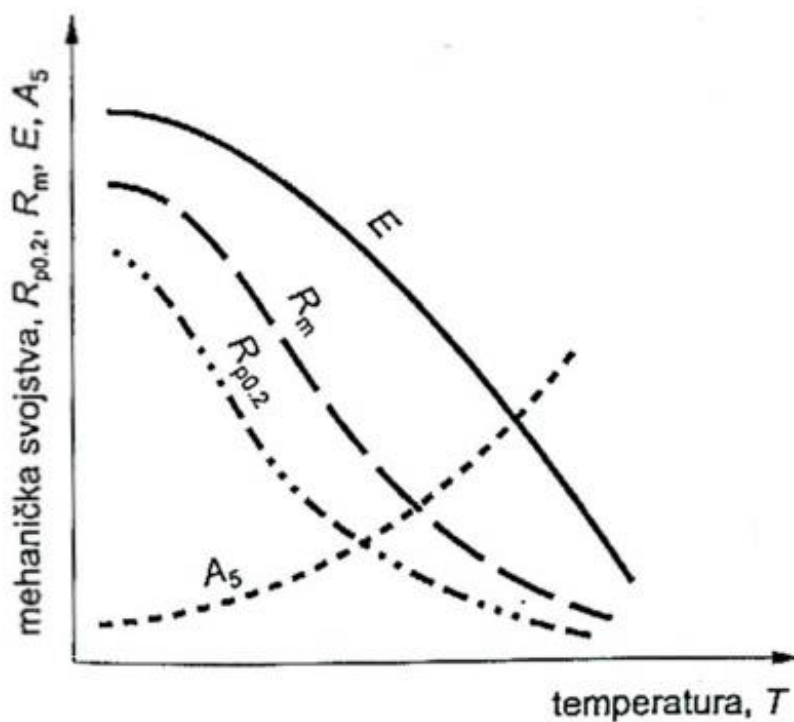


Slika 3. Ovisnost modula elastičnosti i modula smičnosti čelika o temperaturi [9]



Slika 4. Ovisnost koeficijenta toplinskog istežanja čelika o temperaturi [9]

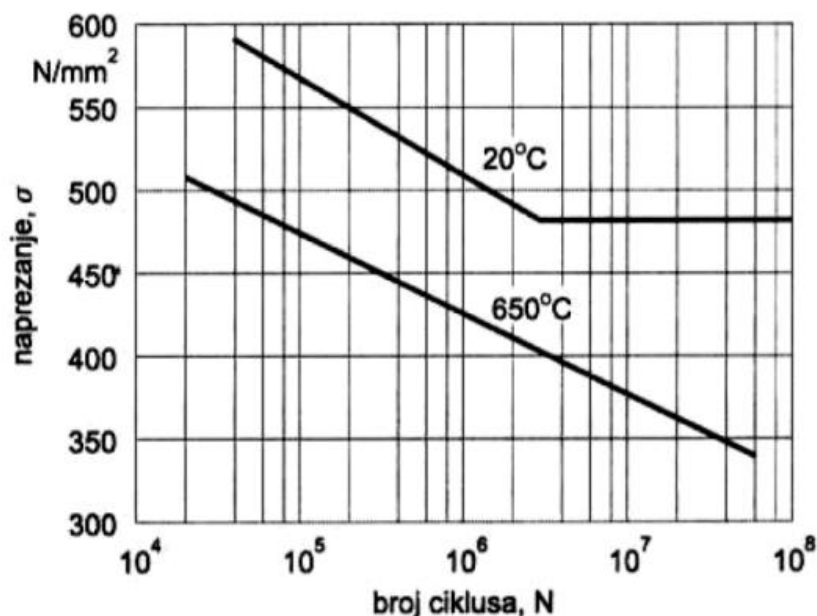
Pri povišenim i visokim temperaturama također se snižavaju granica razvlačenja i čvrstoća materijala uz istovremeno povećanje istezljivosti te pojavu suženja poprečnog presjeka, kako je prikazano na slici 5. [9]



Slika 5. Ovisnost promjene mehaničkih svojstava pri povećanju temperature [9]

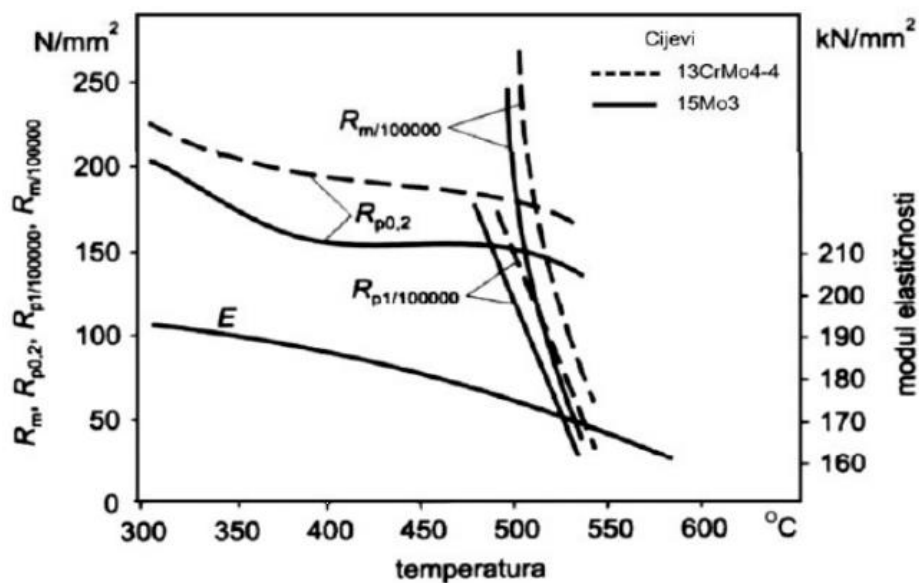
Nadalje, povećavanjem temperature dinamička izdržljivost materijala se smanjuje ili uopće ne postoji, tj. dolazi do loma kod određenog broja promjena opterećenja. [9]

Na slici 6. prikazana je ovisnost promjene savojne dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika X10NiCrWTi36-15 s porastom temperature.



Slika 6. Ovisnost promjene dinamičke izdržljivosti austenitnog čelika X10NiCrWTi36-15 s porastom temperature [9]

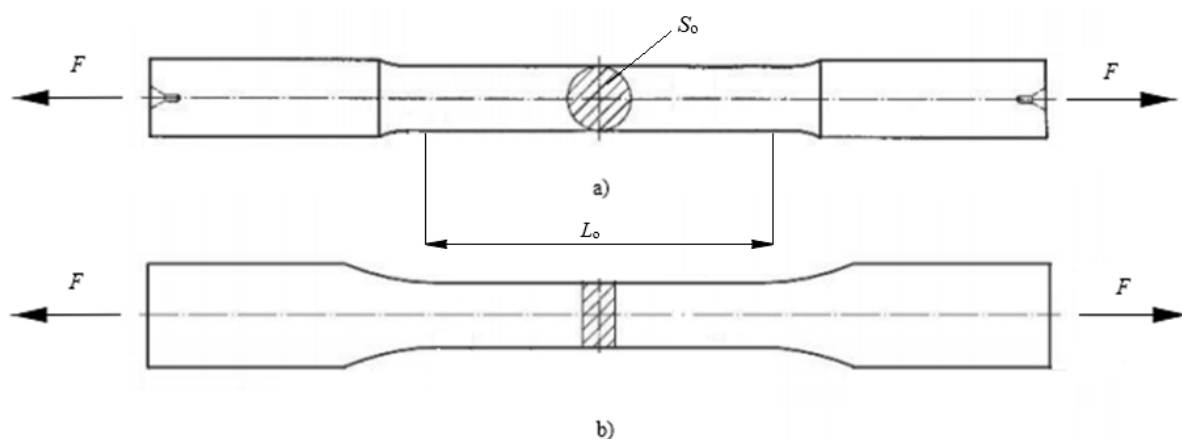
Za dimenzioniranje dijelova koji se koriste u uvjetima rada pri povišenim i visokim temperaturama upotrebljavaju se dijagrami ovisnosti mehaničkih svojstava o radnoj temperaturi kako je prikazano na slici 7. pri čemu se do radnih temperatura iznad kojih počinje puzanje, dijelovi proračunavaju prema vrijednostima mehaničkih svojstava dobivenih statičkim vlačnim kratkotrajnim opterećenjem, a iznad te granične temperature, veličine za izbor materijala i proračun su vrijednosti granica puzanja i statička izdržljivost. [4]



Slika 7. Ovisnost karakteristika mehaničke otpornosti o temperaturi za dvije vrste čelika [4]

### 3.2. Puzanje materijala

Jedno od najčešće primjenjivanih ispitivanja kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstava je statički vlačni pokus. Ispitivanje se provodi na ispitnim uzorcima ili epruvetama okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka kako je prikazano na slici 8., primjenjujući opterećenje na ispitne epruvete pomoću hidrauličnog pogona kidalice. Prirast sile pri statičkom vlačnom ispitivanju izmjeren u jedinici vremena treba biti takav da iznos proizvedenog naprezanja bude manji od  $10 \text{ N/mm}^2$  u sekundi, što su relativno male vrijednosti opterećenja, pa je hidraulični sustav kidalice najprikladnije koristiti zbog mogućnosti rasterećenja ispitnog uzorka u svakome trenutku ispitivanja. [11]

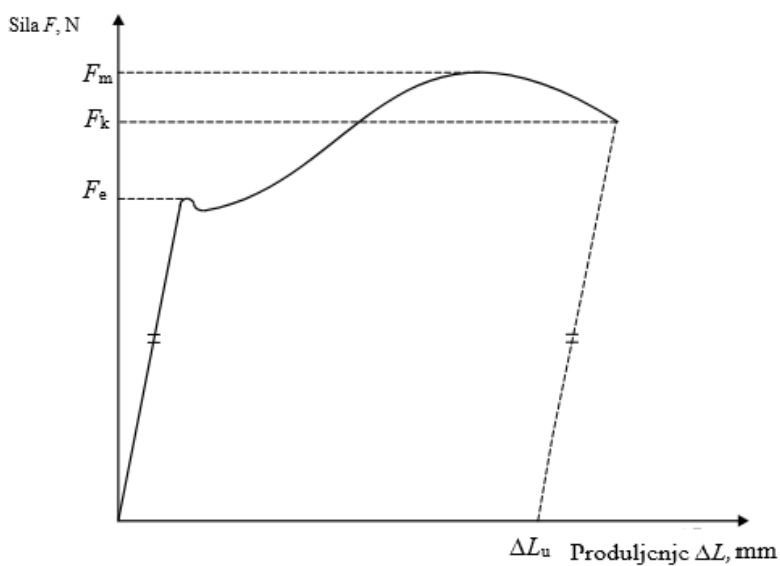


Slika 8. Epruvete za statički vlačni pokus; a) okrugla epruveta, b) plosnata epruveta [11]

$L_0$  – početna mjerna duljina epruvete, mm

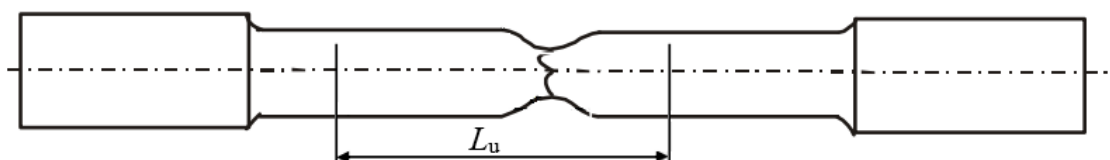
$S_0$  – površina poprečnog presjeka epruvete, mm<sup>2</sup>

Iznos sile  $F$  kojom je opterećena epruveta tijekom statičkog vlačnog ispitivanja iskazuje se u N ili kN. Uslijed naprezanja prilikom ispitivanja javlja se deformacija, a epruveta se produljuje. Na pisacu kidalice dobiva se dijagram sila – produljenje, tj.  $F - \Delta L$ , kako je prikazano na slici 9. [11]



Slika 9. Dijagram sila – produljenje [11]

Početni dio dijagrama  $F - \Delta L$  prikazuje linearnu ovisnost sile i produljenja, sve do dostizanja vrijednosti  $F_e$ , tj. sile razvlačenja ili sile tečenja. Nakon dostizanja sile razvlačenja, epruveta se nastavlja produljivati čak uz mali pad sile. Za daljnje rastezanje epruvete potrebno je ponovno povećanje sile, a slijedi dio dijagrama u kojem više ne postoji linearna ovisnost prirasta sile i produljenja. Iznos opterećenja povećava se sve do postizanja sile  $F_m$ , tj. maksimalne sile, nakon čega epruveta nastavlja produljivati uz smanjene iznose potrebne sile zbog smanjenja površine poprečnog presjeka epruvete do vrijednosti  $F_k$ , tj. kritične sile pri kojoj nastupa lom epruvete. Kada se puknutoj epruveti izmjeri razmak između točaka koji je prije ispitivanja iznosio početnoj mjernoj duljini  $L_o$  dobiva se konačna mjerna duljina  $L_u$  kako je prikazano na slici 10. [11]



Slika 10. Konačna mjerna duljina  $L_u$  [11]

Pri čemu produljenje nakon kidanja  $\Delta L_u$  iznosi [11]:

$$\Delta L_u = L_u - L_o \quad (1)$$

Iznosi sila uslijed provođenja statičkog vlačnog pokusa ne daju pravi uvid u mehaničku otpornost materijala ukoliko se ne uzme u obzir iznos površine poprečnog presjeka epruvete. Zato je umjesto sile  $F$  potrebno uvesti naprezanje  $\sigma$  prema izrazu [11]:

$$\sigma = \frac{F}{S_o} \quad (2)$$

$\sigma$  – naprezanje,  $\text{N/mm}^2$

$F$  – sila,  $\text{N}$

$S_o$  – površina poprečnog presjeka epruvete,  $\text{mm}^2$

Ukoliko se produljenje nastalo tijekom statičkog vlačnog ispitivanja epruvete  $\Delta L$  podijeli s početnom mjernom duljinom  $L_0$  dobiva se iznos relativnog produljenja ili istežanja  $\varepsilon$  prema izrazu [11]:

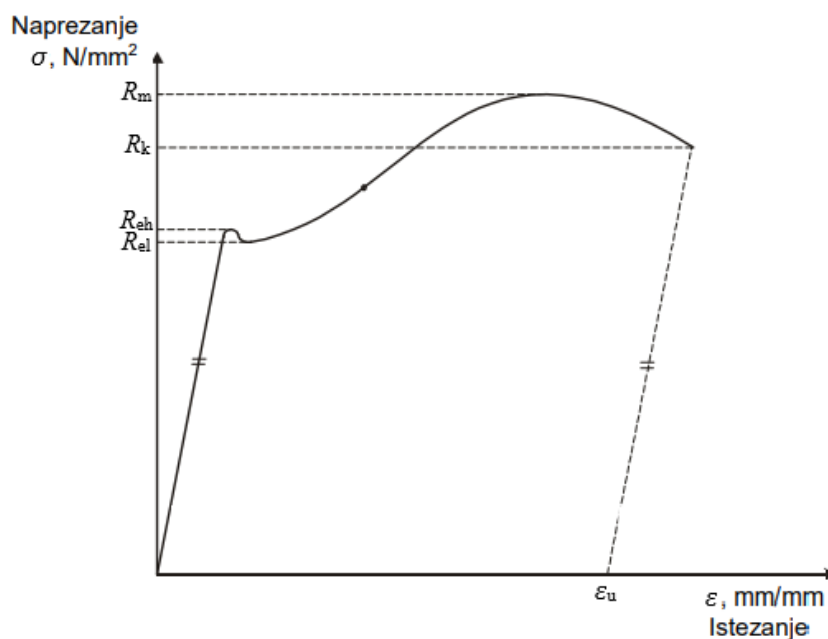
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

$\varepsilon$  – relativno produljenje, mm/mm

$\Delta L$  – produljenje, mm

$L_0$  – početna mjerna duljina epruvete, mm

Na taj se način iz dijagrama sila – produljenje, tj.  $F - \Delta L$ , dobiva dijagram naprežanje – istežanje, tj.  $\sigma - \varepsilon$  dijagram kako je prikazano na slici 11. [11]



Slika 11. Dijagram naprežanje – istežanje [11]

$R_m$  – vlačna čvrstoća, N/mm<sup>2</sup>

$R_e$  – granica razvlačenja, N/mm<sup>2</sup>

$R_{eh}$  – gornja granica razvlačenja, N/mm<sup>2</sup>

$R_{el}$  – donja granica razvlačenja, N/mm<sup>2</sup>

Granica razvlačenja  $R_e$  je iznos naprezanja kod kojeg se tijekom statičkog vlačnog pokusa epruveta produljuje uz konstantno ili privremeno smanjenje naprezanja. Prema iznosu granice razvlačenja uz odabrani stupanj sigurnosti utvrđuju se dopuštena naprezanja pri radu strojnih dijelova. Naprezanja do iznosa granice razvlačenja uzrokuju elastičnu deformaciju epruvete, a naprezanja iznad vrijednosti granice razvlačenja uz elastičnu, izazivaju i plastičnu, tj. trajnu deformaciju epruvete. Vlačna čvrstoća  $R_m$  je iznos naprezanja pri maksimalnoj sili, pri čemu se poprečni presjek epruvete od trenutka postizanja ove vrijednosti počinje naglo smanjivati do iznosa naprezanja  $R_k$  pri kojemu dolazi do loma epruvete. [11]

Statički vlačni pokus koristi se i za utvrđivanje konačnog relativnog produljenja tj. konačnog istežanja  $\varepsilon_u$  prema izrazu [11]:

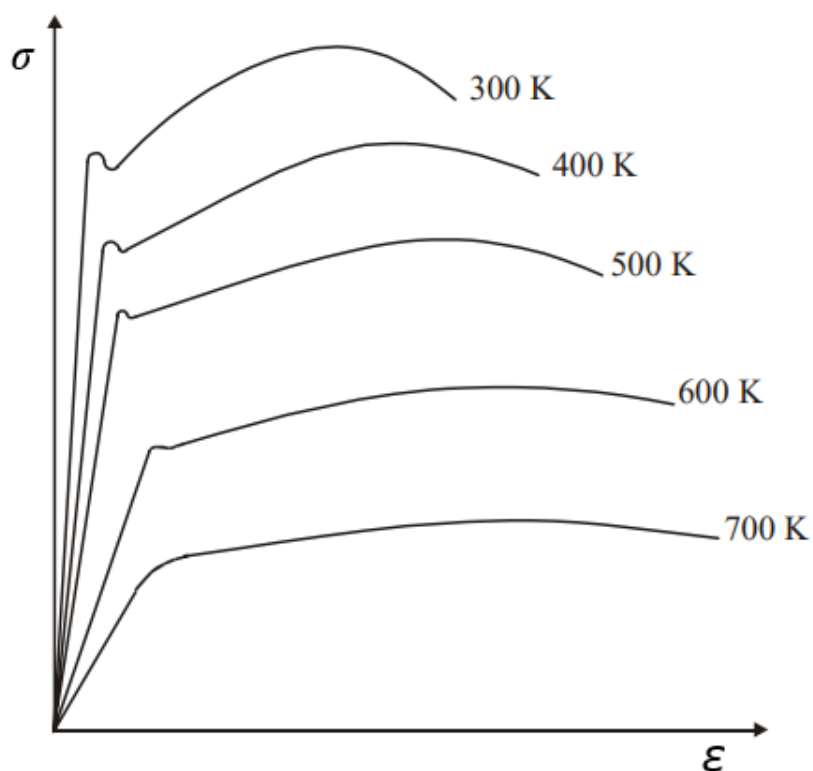
$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_o} \quad (4)$$

Pri čemu se definira svojstvo istežljivosti  $A$  prema izrazu [11]:

$$A = \varepsilon_u \cdot 100, \% \quad (5)$$

Ponašanje materijala i rezultati ispitivanja materijala pri statičkom vlačnom ispitivanju ovise prvenstveno o svojstvima samog materijala poput mikrostrukture definirane iz kemijskog sastava i tehnoloških parametara obrade. Dodatni utjecaj imaju vanjski parametri poput brzine prirasta opterećenja i djelovanja temperature okoline. Utjecaj povišene temperature u uvjetima u kojima djeluje kratkotrajno statičko opterećenje predstavlja uvod u ponašanje materijala pri ovakvom naprezanju u uvjetima dugotrajnog opterećivanja što za posljedicu ima pojavu puzanja materijala. Kako bi se utvrdilo ponašanje materijala pri povišenim temperaturama statički vlačni pokus provodi se na epruveti koja je prethodno zagrijana na određenu temperaturu. Ispitivanje se provodi na onim materijalima koji će tijekom eksploatacije biti izloženi uvjetima povišene temperature, poput onih uvjeta kakvi se javljaju u kotlogradnji i energetske postrojenjima. Utjecaj povišene temperature na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja prikazani su na slici 12. [11]

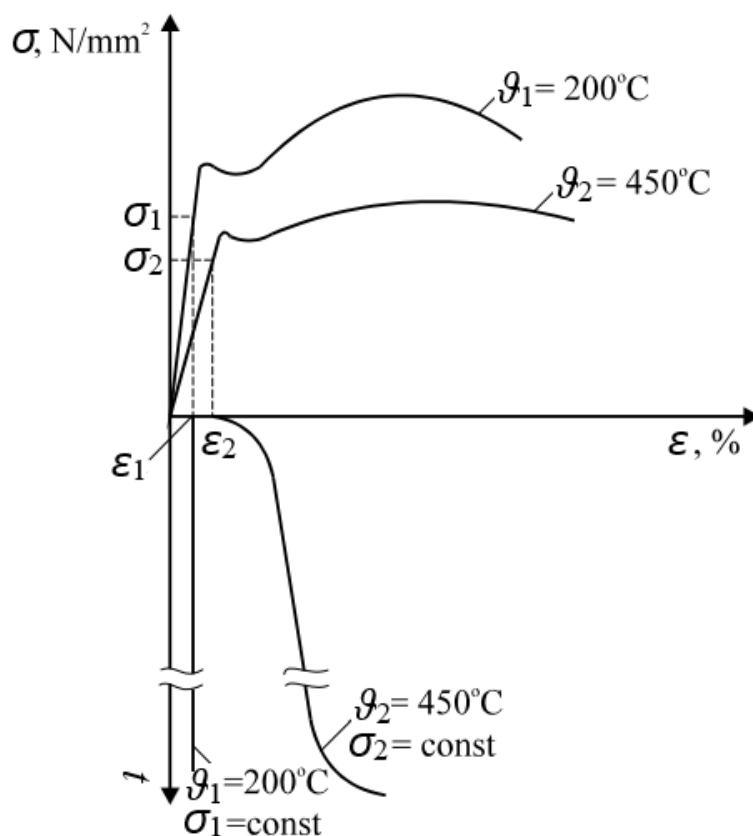




Slika 12. Utjecaj povišene temperature na rezultate statičkog vlačnog ispitivanja [11]

Povišenje temperature pri statičkom vlačnom ispitivanju uzrokuje smanjenje otpornosti materijala; granice razvlačenja  $R_e$  i vlačne čvrstoće  $R_m$ . Nadalje, granica razvlačenja  $R_e$  postaje manje izražena, a istežljivost  $A$  se povećava. [11]

Na slici 13. prikazani su rezultati statičkog vlačnog ispitivanja dviju epruveta iz istog kotlovskog čelika u uvjetima različitih iznosa temperatura.



Slika 13. Rezultati ispitivanja statičkog vlačnog ispitivanja u uvjetima različitih temperatura

[11]

Prva epruveta od istog čelika zagrijana na temperaturu  $\vartheta_1$  napregnuta je nekim naprežanjem  $\sigma_1$  koje je manje od granice razvlačenja  $R_e$  za tu temperaturu. Od trenutka kada je epruveta napregnuta naprežanjem  $\sigma_1$  postignuto je istezanje  $\epsilon_1$ , a daljnjim praćenjem tijekom vremena istezanje se nije povećavalo, kako je prikazano na slici 13. Druga epruveta od istog čelika kao i prva ispitna epruveta zagrijana na temperaturi  $\vartheta_2$  napregnuta je naprežanjem  $\sigma_2$  također manjim od granice razvlačenja  $R_e$  za tu temperaturu, što je prouzročilo istezanje  $\epsilon_2$ . Praćenjem istezanja kod druge epruvete utvrđeno je da ono raste u vremenu, te da na kraju dolazi do loma epruvete, kako je prikazano na slici 13. Iz rezultata ispitivanja prikazanih na slici 13. utvrđeno je da je ispitni čelik pri temperaturi  $\vartheta_1$ , otporan na pojavu puzanja za naprežanje  $\sigma_1$ , dok je pri temperaturi  $\vartheta_2$ , uz naprežanje  $\sigma_2$  prisutan proces puzanja. [11]

Puzanje materijala, toplinski je aktiviran, ireverzibilan proces deformacije materijala koji nastaje u uvjetima dugotrajnog djelovanja konstantnog opterećenja pri povišenoj temperaturi. Pojava puzanja ne povezuje se samo uz uvjete povišene temperature. Kod nekih materijala pojava puzanja može nastupiti i pri  $20^\circ\text{C}$ , ali iznosi trajnih naprežanja koji pritom

nastaju su obično malih vrijednosti, pa se u praksi s njima niti ne računa. Temperatura tališta materijala  $T_t$  predstavlja teorijski gornju granicu primjene materijala u konstrukcijske svrhe. S obzirom da je proces puzanja toplinski aktiviran proces u kojemu nastupa difuzija te oporavak, taj proces značajnije nastupa u temperaturnom području [9,11]:

$$T > 0,3 \cdot T_t, \text{ K} \quad (6)$$

što za čelike iznosi oko 700 K, legure oko 350 K, a olovo i polimerni materijali pokazuju pojavu puzanja već pri sobnoj temperaturi. U temperaturnom području od  $1/3$  do  $2/3 \cdot T_t$  brzina puzanja ostaje konstantna duže vrijeme pri umjerenom naprežanju.

Prilikom dimenzioniranja dijelova koji rade u uvjetima visokih temperatura gdje nastupa pojava puzanja važna su sljedeća mehanička svojstva [4,9]:

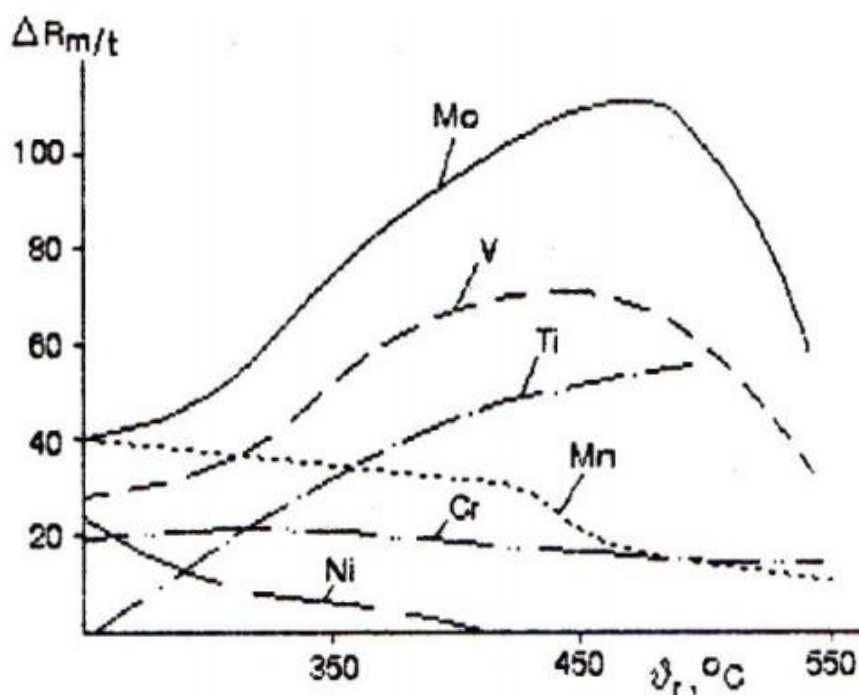
- $R_{pe/t\vartheta}$  – vrijednost granice puzanja pri nekoj radnoj temperaturi za definirano vrijeme ispitivanja 1000, 10000, 100000 sati. To je ono vlačno naprežanje koje nakon određenog trajanja ispitivanja ( $t$ ) pri radnoj temperaturi ( $\vartheta$ ) dovodi do određene trajne deformacije (iznosa najčešće 0,5 ili 1 %),
- $R_{m/t\vartheta}$  – vrijednost statičke izdržljivosti pri definiranoj radnoj temperaturi za određeno vrijeme trajanja opterećenja u iznosu 10000, 100000 ili 200000 sati. To je ono vlačno naprežanje koje nakon definiranog vremena djelovanja ( $t$ ) pri zadanoj temperaturi ( $\vartheta$ ) uzrokuje lom epruvete,
- $R_{DVM/\vartheta}$  – vrijednost granice puzanja prema DVM-u (njem. *Deutscher Verband für Material prüfung*), za definiranu radnu temperaturu. To je ono vlačno naprežanje koje između 25. i 35. sata ispitivanja pri zadanoj temperaturi izaziva brzinu puzanja od  $10 \cdot 10^{-4}$  %/h, a nakon 45. sata djelovanja i rasterećenja trajna deformacija mora biti manja od 0,2%

Veću ili manju otpornost na pojavu puzanja pri nekoj radnoj temperaturi i radnome naprežanju može se postići primjenom različitih legura što ovisi o [9,11]:

- temperaturi tališta materijala,
- kristalnoj rešetci materijala i vrsti atomske veze,
- mikrostrukturnom stanju materijala.

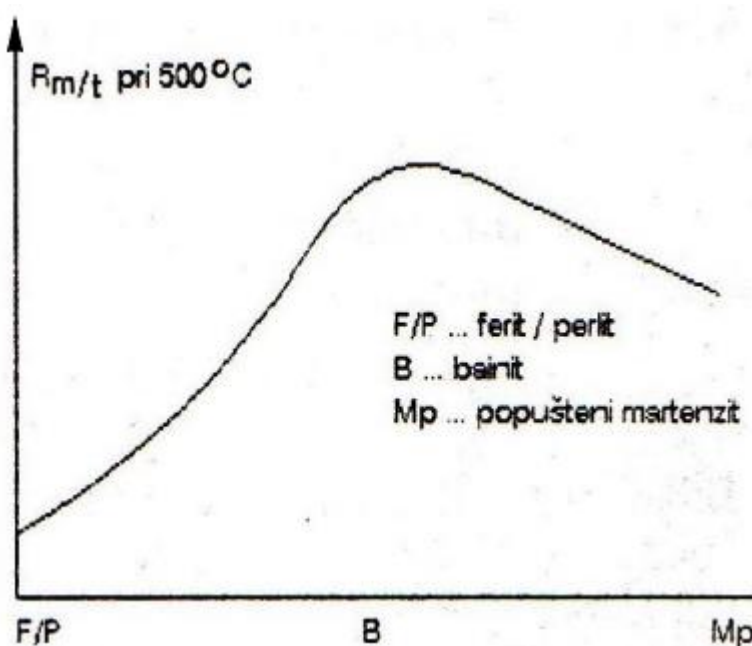
Na otpornost materijala prema puzanju može se utjecati izborom legirnih elemenata i polazne mikrostrukture odabranog materijala. Ključne smjernice za povećanje otpornosti materijala prema pojavi puzanja kod metalnih materijala su [9]:

- izbor legura što viših iznosa temperatura rekristalizacije i tališta,
- očvršnuće kristalima mješancima – poželjno je da čelici sadržavaju u kristalu mješancu legirne elemente koji kočé pokretljivost atoma poput Mo i Co,
- legiranje elementima koji tvore toplinski stabilne spojeve u obliku karbida, nitrida karbonitrida, oksida i intermetalnih faza – očvršnuće precipitacijom i disperzijom faza. Najveći učinak na povećanje otpornosti puzanju ostvaruje se izlučivanjem precipitata tijekom popuštanja ili dozrijevanja. Legirni elementi poput Cr, Mo, W, V, Ti tvore teško topive stabilne spojeve izlučene u obliku sitno disperziranih čestica koje otežavaju gibanje dislokacija i na taj način otežavaju pojavu puzanja. Na slici 14. prikazan je utjecaj legirnih elemenata na promjenu statičke izdržljivosti pri različitim radnim temperaturama.



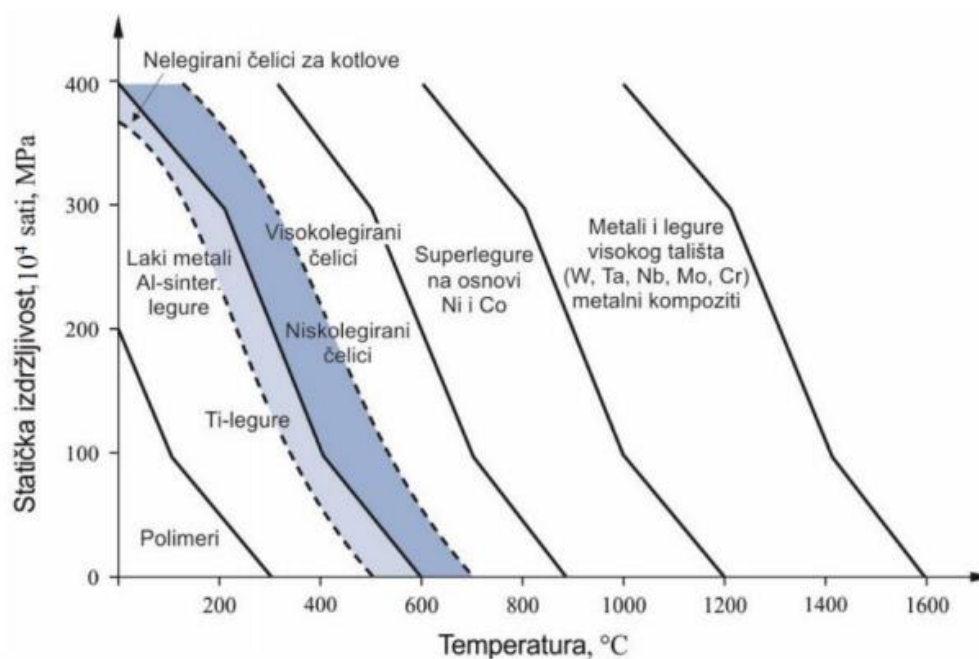
Slika 14. Utjecaj legirnih elemenata na promjenu statičke izdržljivosti pri različitim radnim temperaturama [9]

- izbor legura koje imaju kubičnu plošno centriranu kristalnu rešetku (FCC). Kubično plošno centrirana kristalna rešetka (FCC) ima znatno veću zaposjednutost atoma u odnosu na prostorno centriranu kubičnu rešetku (BCC) pa je manja pokretljivost atoma unutar rešetke – stoga je austenitna mikrostruktura s gusto složenom FCC rešetkom otpornija na pojavu puzanja u odnosu na feritnu mikrostrukturu s BCC rešetkom.
- korištenje materijala grubozrnate ili monokristalne mikrostrukture,
- materijali s bainitnom mikrostrukturom pružaju optimalnu otpornost na puzanje pri temperaturi od oko 500 °C, kako je prikazano na slici 15.



Slika 15. Utjecaj mikrostrukture na statičku izdržljivost pri 500 °C [9]

Na slici 16. prikazana su područja primjene pojedinih skupina materijala prema vrijednostima statičke izdržljivosti nakon 10000 sati.



Slika 16. Ovisnost statičke izdržljivosti o temperaturi [9]

Metalni materijali mogu izdržati veće iznose naprezanja pri višim temperaturama od nemetalnih materijala, poput polimera. To je rezultat visokih temperatura tališta i stabilne mikrostrukture koja ostaje nepromijenjena pri visokom temperaturama. Dok metalni materijali pri porastu temperature do 100 °C ne pokazuju bitniju promjenu mehaničkih svojstava, kod većine polimernih materijala već pri malom povišenju temperature dolazi do puzanja. Maksimalne temperature primjenjivosti aluminijskih legura su do najviše 150 – 200 °C. Pri višim radnim temperaturama koriste se materijali na osnovi titana od kojih neki mogu izdržati temperature do 550 °C. U uvjetima rada pri još višim temperaturama u obzir dolaze legure na osnovi nikla i kobalta (superlegure) koje su zbog vrlo dobre otpornosti puzanju, kemijske postojanosti i otpornosti oksidaciji sposobne izdržati temperature do 1000 °C. [9]

## 4. ČELICI MEHANIČKI OTPORNI PRI POVIŠENIM I VISOKIM TEMPERATURAMA

Promatrajući temperaturno područje primjene čelika, razlikuju se četiri osnovne podskupine čelika otpornih pri povišenim temperaturama [4,9]:

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

### 4.1. Ugljični (nelegirani) čelici

Karakteristike ugljičnih (nelegiranih) čelika mogu se prikazati na primjeru čelika za kotlovske limove. Ova podskupina čelika razlikuje se od općih konstrukcijskih čelika jer tijekom rada moraju izdržati posljedice tlaka pri povišenoj temperaturi i agresivno djelovanje medija pa se na njih postavljaju posebni zahtjevi [9,10]:

- dovoljni iznosi čvrstoće pri povišenim temperaturama uslijed djelovanja tlaka,
- zadovoljavajuća duktilnost (žilavost) kako bi se plastičnom deformacijom razgradila lokalna koncentracija naprezanja ili mogućnost preopterećenja,
- otpornost na dozrijevanje ukoliko je došlo do hladnog očvrnuća tijekom oblikovanja deformiranjem,
- korozijska otpornost prema vodi, vodenoj pari i lužinama,
- otpornost na pojavu interkristalne korozije,
- dobro svojstvo zavarljivosti s obzirom da se dijelovi kotla izvede gotovo samo zavarivanjem.

U tablici 2. dan je prikaz čelika za kotlovske limove s podacima o svojstvima i kemijskim sastavom.

Tablica 2. Kemijski sastav i mehanička svojstva ugljičnih čelika za kotlovske limove prema DIN 17175. [9]

Oznaka čelika		Kemijski sastav, %		$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ min, N/mm <sup>2</sup> pri °C			$R_{DVM}$ , N/mm <sup>2</sup> pri °C		
EN	stara HRN	C, maks.	Mn, min.	/	20	200	400	400	450	475
P235GH	Č1202	0,16	0,4	350 – 450	210	160	100	90	50	(30)
P265GH	Č1204	0,2	0,5	410 – 500	240	180	120	100	60	(40)
/	Č1206	0,22	0,55	440 – 530	260	210	140	120	80	(50)

Ugljični (nelegirani) čelici zajamčenog su kemijskog sastava i mehaničkih svojstava za koje se prema normama postavljaju sljedeći zahtjevi i karakteristike [9]:

- kemijski sastav: niski %C (< 0,2%) u svrhu postizanja dobre zavarljivosti, > 0,40 (0,55) %Mn za postizanje postojanosti na dozrijevanje, > 0,02 %Al za dezoksidaciju taljevine, < 0,30 %Cr,
- vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) pri sobnoj temperaturi,
- konvencionalna granica razvlačenja ( $R_{p0,2}$ ) pri sobnoj i povišenim temperaturama do 400 °C,
- iznos granice puzanja ( $R_{DVM}$ ) pri temperaturama od 400 °C do 475 °C,
- minimalna istežljivost  $A_{min} = 9810/R_m$  %,
- udarni rad loma  $KU = 58$  J nakon dozrijevanja pri 250 °C/1...2 sata,
- statička izdržljivost: pri  $\vartheta = 400$  °C;  $R_{m/100000/400} = 130$  N/mm<sup>2</sup>, pri  $\vartheta = 450$  °C;  $R_{m/100000/450} = 70$  N/mm<sup>2</sup>, pri  $\vartheta = 500$  °C;  $R_{m/100000/500} = 30$  N/mm<sup>2</sup>.

Za radne temperature do 400 °C za proračun dijelova uzimaju se vrijednosti granice razvlačenja, a za radne temperature iznad 400°C mjerodavna je iznos granice puzanja prema DVM – u. Nelegirani kotlovski čelici isporučuju se u obliku limova (ploča) za izradu parnih kotlova, te za cijevi i spremnike većih promjera izloženih okolišnoj temperaturi. [9,10]



## 4.2. Niskolegirani Mo– ili Mo–Cr čelici

U svrhu postizanja svojstva dobre zavarljivosti niskolegirani Mo– i Mo–Cr čelici, baš poput ugljičnih čelika imaju nizak udio ugljika ( $< 0,25\ \%C$ ). Uslijed dugotrajne izloženosti temperaturama iznad  $450\ ^\circ C$  kod niskolegiranih kotlovskih čelika dolazi do rekristalizacije matrice i koagulacije cementita. U niskolegiranim čelicima pri povišenim temperaturama te se pojave sprečavaju legiranjem karbidotvorcima Mo, Cr i V. Navedeni karbidotvorci stvaraju kvalitetnije karbide poput  $Cr_7C_3$ ,  $Mo_2C$ ,  $V_4C_3$  koji koče gibanje dislokacija i usporavaju pojavu puzanja, povećavaju prokaljivost i otpornost na popuštanje. Mo dodatno povisuje temperaturu rekristalizacije i sprečava pojavu krhkosti popuštanja. Temperaturno područje primjene niskolegiranih Mo– i Mo–Cr čelika je do  $550\ ^\circ C$ . Pri višim temperaturama od  $550\ ^\circ C$   $Mo_2C$  karbidi postupno prelaze u  $Mo_6C_2$  te koaguliraju, metalna matrica osiromašuje na Mo čime se snižava rekristalizacijska temperatura, a time i temperaturno područje primjene. Niskolegirani Mo– i Mo–Cr čelici imaju vrlo raširenu primjenu u termoenergetskim postrojenjima kod [9]:

- dijelova parnih kotlova (oplate, kotlovske cijevi, cijevi pregrijača, kolektori pare)
- velikih otkivaka,
- vijaka, matica, svornjaka, pribubnica.

U tablici 3. prikazani su najčešće korišteni niskolegirani čelici za rad pri povišenim temperaturama do  $580\ ^\circ C$  s pripadajućim mehaničkim svojstvima.

Tablica 3. Mehanička svojstva nelegiranih toplinski postojanih čelika za rad pri radnim temperaturama nižim od  $580\ ^\circ C$ . [9]

Oznaka čelika EN	Mehanička svojstva										
	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup> , pri $20\ ^\circ C$	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri $^\circ C$				$R_{p1/1000}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri $^\circ C$				$A_5$ , %, min.	KV, J, min.
		20	200	400	500	450	500	530	580		
C35E	500 – 650	280	216	147	/	59	5	/	/	21	/
15Mo3	440 – 570	260	255	177	147	216	147	85	/	26	48
13CrMo4–4	440 – 590	290	275	206	177	/	186	78	/	18	41
22CrMo4–4	640 – 790	490	/	343	/	255	172	74	/	18	41
10CrMoV8–10	440 – 590	260	245	206	186	/	157	83	47	20	55

24CrMoV5–5	690 – 830	540	412	304	235	324	206	98	/	17	57
------------	-----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----	---	----	----

### 4.3. Visokolegirani martenzitni super 12 %Cr čelici

Visokolegirani martenzitni čelici razvijeni su iz čelika X20Cr13 modificiranjem kemijskog sastava u cilju postizanja veće mehaničke otpornosti pri povišenim temperaturama do oko 600 °C uz istovremeno zadržavanje velike postojanosti na opću koroziju. Za ostvarivanje svojstava mehaničke otpornosti pri povišenim temperaturama i otpornosti na opću koroziju ova skupina čelika mora sadržavati oko 1 %Mo i do 12 %Cr čime se uz pravilno izvedeno kaljenje postiže martenzitna mikrostruktura s malim udjelom  $\delta$  – ferita. Martenzitna mikrostruktura postiže se gašenjem čelika s temperature od 1020 °C do 1080 °C, a uz martenzit mikrostruktura sadrži i nešto manje od 5 % ferita. Nadalje, provodi se toplinska obrada popuštanja pri temperaturama od 550 °C do 750 °C radi izlučivanja sljedećih faza [4,9]:

- specijalnih karbida popuštanja ( $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{V}_4\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ),
- intermetalnih faza ( $\text{Fe}_2\text{Mo}$ ,  $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$  i eventualno  $\text{FeCr}$ )

Popuštanjem dolazi do istovremenog procesa popuštanja kaljenog čelika i dozrijevanja precipitacijski očvrstljive legure što doprinosi povećanju otpornosti na puzanje. Dugotrajno izlaganje temperaturama iznad 620 °C uzrokuje umnožavanje i koagulaciju karbida i intermetalnih spojeva čime se dodatno snižava udio Cr u martenzitnoj matrici i time smanjuje korozijska postojanost, ali i manje učinkovito koči gibanje dislokacija što pogoduje pojavi puzanja. Uz prisutnost karbida Mo, V i Cr, ovi čelici pokazuju otpornost na djelovanje vodika i na sulfidnu napetosnu koroziju (SSC), ako su popušteni na tvrdoću manju od 24 HRC tj. vrijednosti granice razvlačenja  $R_m$  oko 850 N/mm<sup>2</sup>. Najveću primjenu ova vrsta martenzitnih čelika ima za dugotrajni rad pri temperaturama od 550 °C do 600 °C za dijelove poput [4,9]:

- turbinskih lopatica parnih turbina,
- rotora parnih turbina,
- brodskih propelera,
- kućišta turbina,
- dijelova izloženih visokim temperaturama u okolišu morske vode, pare, slabih organskih kiselina,

- cijevi pregrijača pare,
- dijelova uređaja u industriji papira, umjetnih vlakana, celuloze, nafte i plina.

U tablici 4. prikazani su najčešće korišteni visokolegirani martenzitni čelici za dugotrajni rad pri temperaturama do 600 °C s pripadajućim mehaničkim svojstvima.

Tablica 4. Mehanička svojstva visokolegiranih martenzitnih čelika za dugotrajni rad pri temperaturama do 600 °C. [9]

Oznaka čelika	Temperatura popuštanja, $\vartheta_p$ , °C	Mehanička svojstva				Kratkotrajno vlačno ispitivanje				Dugotrajno vlačno ispitivanje		
		$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> min.	$A_5$ , % min.	$KV$ , J min.	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri $\vartheta$ , °C				$R_{p1/10^4}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri $\vartheta$ , °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	758	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	680 – 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 Cr–Ni čelici

Čvrstoća austenitnih čelika pri 20 °C niža je u usporedbi s čvrstoćom martenzitnih čelika pri istoj temperaturi, međutim kod austenitnih čelika čvrstoća sporo pada povećanjem temperature stoga je ova vrsta čelika pogodna za primjenu u radu pri visokim temperaturama od 600 °C do 750 °C. Primjenu za rad pri visokim temperaturama omogućila je visoka vrijednost temperature rekristalizacije koja postiže vrijednosti iznad 900 °C, pa čak i 1000 °C i dobra mehanička svojstva koja su ostvarena kao rezultat [4,9]:

- austenitne mikrostrukture koja ima plošno centriranu kristalnu rešetku (FCC). S obzirom da je koeficijent difuzije kod FCC rešetke oko 100 puta manji u odnosu na BCC rešetku, austenitni čelici pogodni su za eksploataciju na visokim temperaturama,

- dodatnog legiranja elementima Mo, W, V, Ti, Nb koji omogućavaju izlučivanje karbida i precipitiranje toplinski postojanih intermetalnih faza čime se dodatno povećava mehanička otpornost.

Visokolegrani austenitni čelici mogu se podijeliti u četiri skupine kako je prikazano u tablici 5. Visokolegirani austenitni čelici I skupine primjenjuju se u rastopno žarenom i gašenom (ne kaljenom!) stanju. Čelici II skupine nakon homogenizacije podvrgavaju se dozrijevanju na temperaturama 50 °C višim od radnih temperatura i na taj način precipitacijski očvršćuju, uz postizanje više granice razvlačenja u odnosu na one rastopno žarene i gašene. Čelici III skupine očvršćuju kombinacijom postupaka „toplo – hladnog“ valjanja i dozrijevanja, a čelici IV skupine posebno su višestruko legirani i očvršćeni starenjem. [9,10]

U tablici 5. prikazani su najčešće korišteni austenitni čelici za primjenu u radu pri visokim temperaturama od 600 °C do 750 °C s pripadajućim mehaničkim svojstvima.

Tablica 5. Mehanička svojstva austenitnih čelika za primjenu u radu pri visokim temperaturama od 600 °C do 750 °C [9]

Skupina čelika	Oznaka čelika	Mehanička svojstva pri 20 °C				$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri $\vartheta$ , °C			$R_{p1/10000}$ , N/mm <sup>2</sup> , pri $\vartheta$ , °C				
		$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup> , min.	$A_5$ , % min.	$KU$ , J min.	400	600	700	550	650	700	750	800
I	X6CrNi18–11	490 – 690	185	45	85	98	78	69	180	80	49	34	/
	X8CrNiMoNb16–16	530 – 690	215	35	85	174	132	/	324	226	137	83	54
	X8CrNiMoVNb16–13	540 – 740	255	30	69	167	147	/	353	157	88	/	/
II	X40CrNiCoNb13–13	640 – 830	345	16	34	245	196	/	/	186	127	78	49
	X40CoCrNi20–20–20	780 – 980	390	20	27	314	245	206	294	216	147	98	64
III	X12CrNiWTi16–13	640 – 750	450	30	80	420	400	300	335	216	157	103	64
	X8CrNiMoBNb16–16	650 – 850	500	16	48	353	255	/	445	245	145	/	/
IV	X50CoCrNi20–20–20	min. 980	540	10	27	539	500	412	290	175	118	93	74
	X5NiCrTi26–15	930 – 1180	635	12	27	520	451	314	451	304	206	118	54
	X6NiCrMoTi28–15	900 – 1150	600	15	27	520	450	310	450	300	205	120	50

Visokolegirani austenitni Cr–Ni čelici za rad pri visokim temperaturama od 600 °C do 750 °C primjenjuju se u izradi [9]:

- dijelova parnih i plinskih turbina: lopatica, prirubnica, ventila, sapnica, svornjaka,
- komora izgaranja,
- plamenika, dijelova uređaja reaktorske tehnike, dijelova u kemijskoj i petrokemijskoj industriji
- pogonskih sustava mlaznih motora i raketa.

## 5. VISOKOLEGIRANI MARTENZITNI ČELIK P91 ZA RAD PRI VISOKIM TEMPERATURAMA

Danas se niti jednu ljudsku aktivnost ne može zamisliti bez potrošnje električne energije. Potrošnja energije u stalnome je porastu pa se osim istraživanja novih izvora energije radi na povećanju iskorištenja postojećih i poznatih izvora energije. Proizvodnja energije izgaranjem fosilnih goriva u termoelektranama još uvijek predstavlja najznačajniji izvor energije, međutim pojavljuju se problemi onečišćenja okoliša, uz činjenicu da su količine fosilnih goriva limitirane. Utjecaji koji pridonose klimatskim promjenama, oštećuju prirodne ekosustave i okoliš te nepovoljno djeluju na zdravlje čovjeka mogu se umanjiti radom termoenergetskih postrojenja sa što većim stupnjem iskorištenja uz što manju potrošnju goriva. Takav rad zahtijeva primjenu što viših radnih parametara poput temperature i tlaka pa važan čimbenik na mogućnost rada u takvim uvjetima ima materijal. [12]

Već više od 50 godina sadržaj legirnih elemenata u iznosu od 2,25 %Cr i 1 %Mo u čeličnim legurama koje se koriste u izgradnji elektrana visokog kapaciteta standardiziran je u svim nacionalnim normama. Potreba za većim radnim parametrima i dimenzijama dijelova i postrojenja rezultirala je razvojem čelika visoke čvrstoće. U Europi su razvijene dvije vrste čelika s povećanom granicom puzanja šezdesetih godina 20. stoljeća [13]:

- EM12 u Francuskoj i Belgiji sa 9 %Cr i 2 %Mo i dodatkom V i Nb koji se koristi za izradu cijevi,
- X20CrMoV12–1 u Njemačkoj sa 12 %Cr i 1 %Mo s dodatkom V koji se koristi za izradu cijevi.

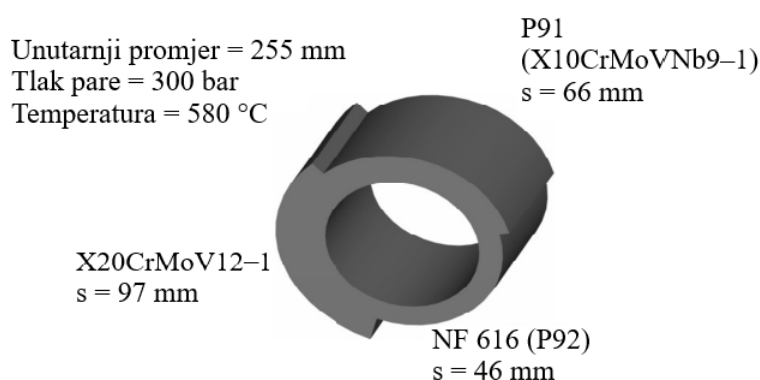
Sljedeći korak u razvoju čeličnih legura za primjenu u termoelektranama bio je razvoj modificiranog čelika sa 9 %Cr u SAD-u, koji se ubrzo pojavio i u Europi i Japanu i mnogim drugim zemljama. Nazvan je T/P91 i od osamdesetih godina 20. stoljeća uspješno je primjenjivan u zemljama diljem svijeta. U današnje vrijeme, obje vrste čelika EM12 i X20CrMoV12-1 razvijeni šezdesetih godina 20. stoljeća često se zamjenjuju čelikom T/P91. Čelik T/P91 prvi je puta odobren u SAD-u 1983. godine od strane američkog standarda ASTM/ASME, a u Europi je poznat prema oznaci X10CrMoVNb9-1 u skladu s europskim standardom EN 10216-2. Nacionalni i međunarodni standardi navode dozvoljene iznose granica puzanja ili maksimalnog dozvoljenog iznosa naprezanja materijala koji se koriste u izradi kotlova i cjevovoda. U današnjim postrojenjima koji su pokretani izgaranjem fosilnih goriva gradacija čelika T/P91 dopušta rad pri višim vrijednostima radnih parametara poput tlaka i temperatura čime se postiže veća učinkovitost postrojenja. Prema podacima i iskustvima korištenja u Europi, P91 je prikladan za korištenje u izradi dijelova parnih kotlova; za pregrijače i međupregrijače pare temperatura do 560 °C uz maksimalnu temperaturu materijala do 600 °C. Izvan parnih kotlova, čelik P91 može se koristiti na temperaturama pare do oko 610 °C. U budućnosti, termoelektrane koje koriste konvencionalne iznose radnih parametara pare pokazivat će veću fleksibilnost i uštede korištenjem čelika T/P91, umjesto dosadašnje primjene čelika T/P22 uz smanjenje debljine stijenke konstrukcije zahvaljujući većim iznosima granice puzanja i otpornosti na visokotemperaturnu koroziju tj. oksidaciju. [13]

### 5.1. Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika P91

Kao osnova za razvoj visokolegiranog martenzitnog čelika P91 bio je čelik T/P9 (X11CrMo9-1). Dodatkom V, Nb i N povećani su iznosi granice puzanja čelika P91 pri čemu su postignute radne temperature u iznosu od 585 °C do 625 °C. [14]

Iako čelik P91 pokazuje nižu otpornost na koroziju u odnosu na konvencionalni martenzitni čelik X20CrMoV12-1 koji je namijenjen za izradu komponenti parnih kotlova, važnost primjene suvremenog čelika P91 očituje se u činjenici da u odnosu na konvencionalni martenzitni čelik X20CrMoV12-1, čelik P91 omogućava smanjenje potrebne debljine stijenke cijevi parovoda zahvaljujući višim iznosima granice puzanja. Smanjena debljina stijenke cijevi utječe na smanjenje temperaturnog gradijenta tijekom pokretanja i zaustavljanja rada postrojenja, čime se sprječava pojava pukotina uslijed zamora materijala. [13,14]

Na slici 17. prikazano je smanjenje potrebne debljine stijenke cijevi primjenom različitih materijala.



Slika 17. Smanjenje potrebne debljine stijenke cijevi parovoda primjenom različitih materijala

[14]

Kemijski sastav čelika gradacije P91 određen je američkim standardom ASTM. U tablici 6. prikazani su dopušteni udjeli pojedinih kemijskih elemenata čelika P91. [13]

Tablica 6. Kemijski sastav čelika P91 [13]

Oznaka čelika	Sadržaj kemijskih elemenata, %												
		C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Nb	N	Al	Ni	P	S
P91	min.	0,08	0,30	0,20	8,00	0,85	0,18	0,06	0,03	-	-	-	-
	maks.	0,12	0,60	0,50	9,50	1,05	0,25	0,10	0,07	0,04	0,40	0,02	0,01

Iz tablice 6. vidljiv je najveći udio legirnih elemenata kroma, mangana, silicija, nikla, molibdena, vanadija i niobija. Najveći udio u kemijskom sastavu od svih legirnih elemenata ima krom. Krom u čeliku P91 povećava otpornost na koroziju i omogućava rad na visokim temperaturama. Legiranje kromom posebice je važno u onim slučajevima kada se traži visoka čvrstoća i antikoroziivnost na visokim temperaturama kao što je slučaj kod martenzitnih čelika. Povećana čvrstoća pri visokim temperaturama postiže se sastavom strukturnih faza i raspršenim sitnim česticama karbida Cr, Mo i V. Krom kao legirni element povećava prokaljivost čelika, što omogućava da se čelici legirani kromom mogu nakon austenitiziranja hladiti u ulju ili čak i na zraku. Povećanje udjela kroma utječe na sklonost krhkosti nakon popuštanja, što se može

izbjeći legiranjem molibdenom, a također djeluje na smanjenje toplinske vodljivosti i toplinske rastezljivosti. Mangan proširuje područje austenita čime se snižavaju temperature  $A_{c3}$  i  $A_{c1}$  u odnosu na ugljične čelike. Legiranje manganom povećava prokaljivost čelika, a u nezakaljenim čelicima poboljšava čvrstoću i žilavost. Silicij kao legirani element povećava iznos čvrstoće, otpornosti na trošenje i granicu razvlačenja, a utječe i na blagi porast prokaljivosti čelika. Povećava otpornost prema djelovanju topline pa je neizbježan legirni element vatrootpornih čelika. Nikal kao legirni element proširuje područje austenita, te zbog vrlo slabog afiniteta prema ugljiku ne stvara karbide. Povećava žilavost i smanjuje toplinsku vodljivost i toplinsku rastezljivost čelika. Koristi se kod čelika posebnih svojstava pa tako i kod zahtjeva za primjenom čelika pri visokim temperaturama, a zbog visoke cijene gotovo se uvijek legira u kombinaciji s drugim elementima. Legiranje molibdenom, najčešće u kombinaciji s ostalim legirnim elementima povećava prokaljivost i čvrstoću čelika, a sprječava pojavu visokotemperaturne krhkosti nakon popuštanja. Molibden kao karbidotvorac utječe na sitnozrnatost mikrostrukture čelika i otpornost na trošenje. Vanadij i niobij jaki su karbidotvorci koji se kao legirni elementi dodaju u zavarljive sitnozrnate čelike povišene granice razvlačenja i čvrstoće. [4,15,16]

U tablici 7. prikazana su glavna fizikalna svojstva čelika P91 potrebna u procesu konstruiranja dijelova.

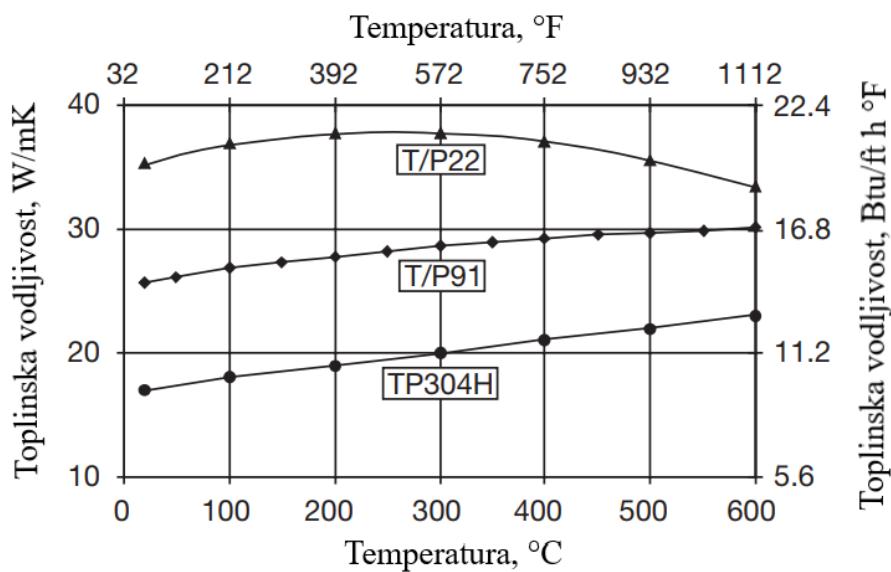
Tablica 7. Glavna fizikalna svojstva čelika P91 [13]

Temperatura, °C	20	50	100	200	300	400	500	550	600	650
Modul elastičnosti, GPa	218	216	213	207	199	190	181	175	168	162
Toplinska vodljivost, W/mK	26	26	27	28	28	29	30	30	30	30

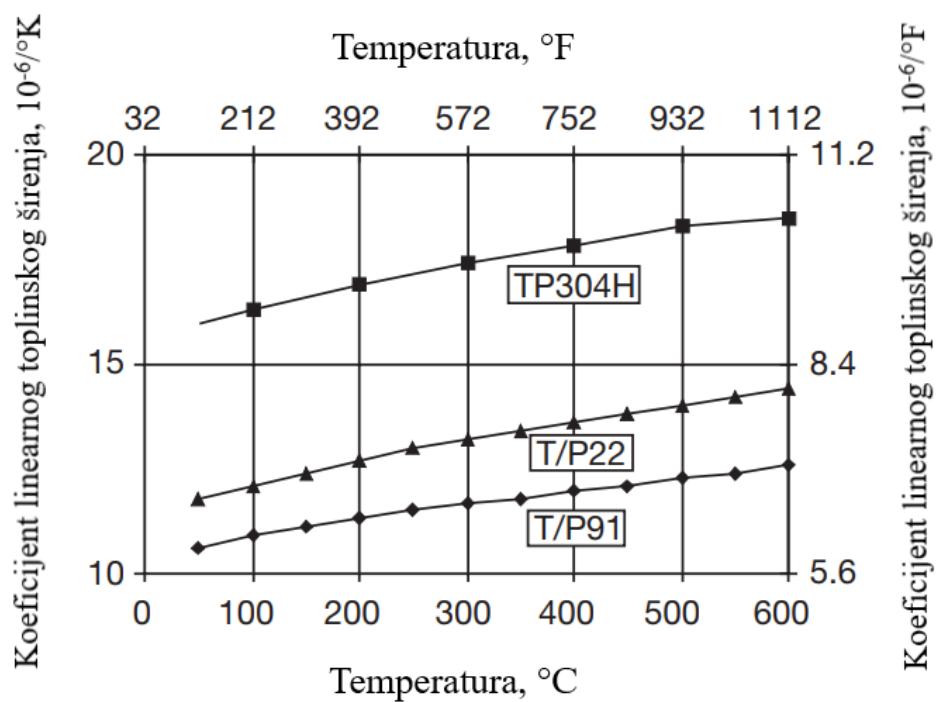


Koeficijent linearnog toplinskog širenja, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	0	10,6	10,9	11,3	11,7	12	12,3	12,4	12,6	12,7
Specifični toplinski kapacitet, J/kgK	440	460	480	510	550	600	660	710	770	860
Masa po volumenu, $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	7,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Uspješna primjena čelika P91 u usporedbi s nehrđajućim čelicima temelji se na boljem svojstvu toplinske vodljivosti i manjoj vrijednosti koeficijenta linearnog toplinskog širenja, kako je prikazano na slikama 18 i 19. [13]

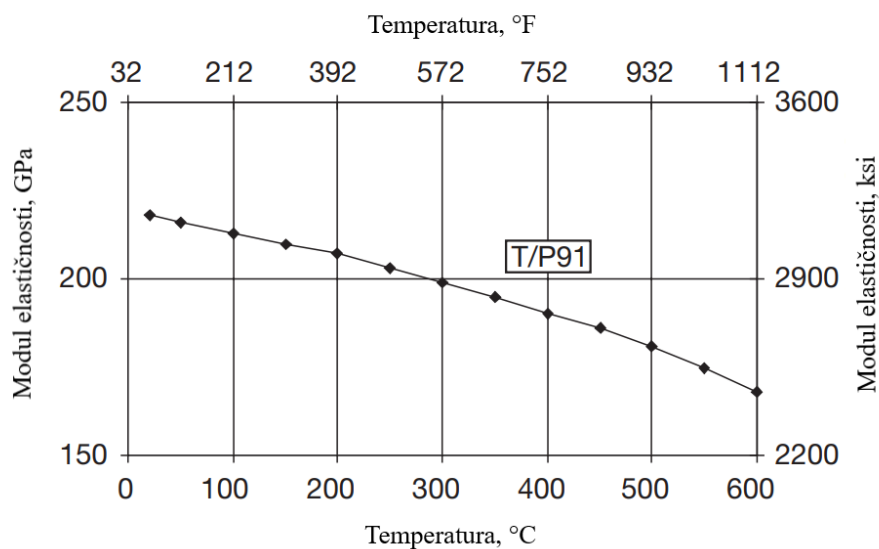


Slika 18. Usporedba toplinske vodljivost čelika P91 i nehrđajućeg čelika TP304H [13]



Slika 19. Usporedba koeficijenta linearnog toplinskog širenja čelika P91 i TP304H [13]

Na slici 20. prikazana je ovisnost modula elastičnosti čelika P91 i temperature.



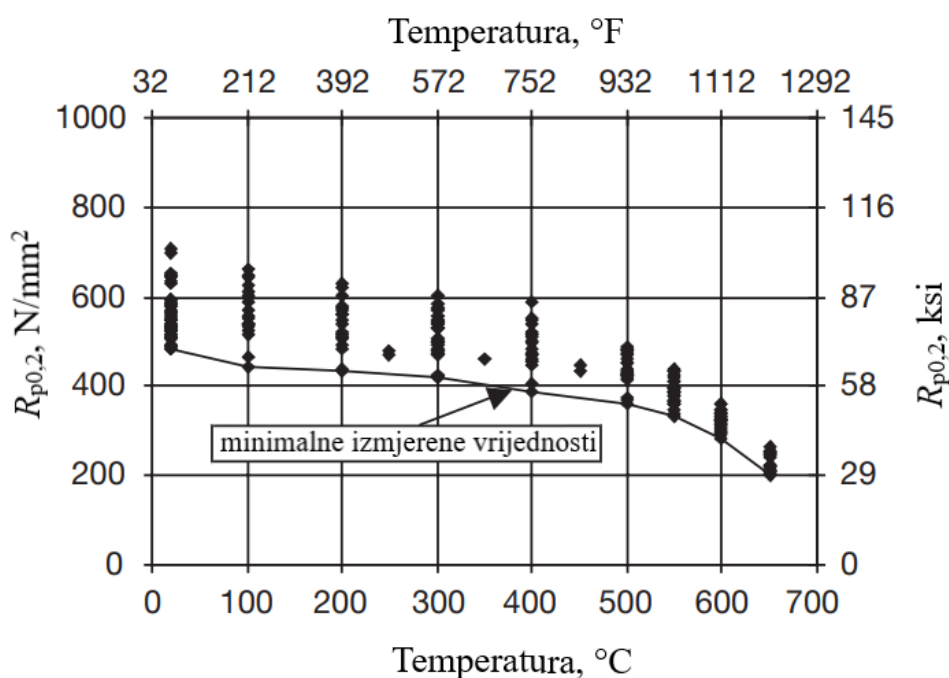
Slika 20. Ovisnost modula elastičnosti čelika P91 i temperature [13]

Vrijednosti mehaničkih svojstava čelika P91 određenih pri sobnoj temperaturi prikazane su u tablici 8.

Tablica 8. Vrijednosti mehaničkih svojstava čelika P91 [13]

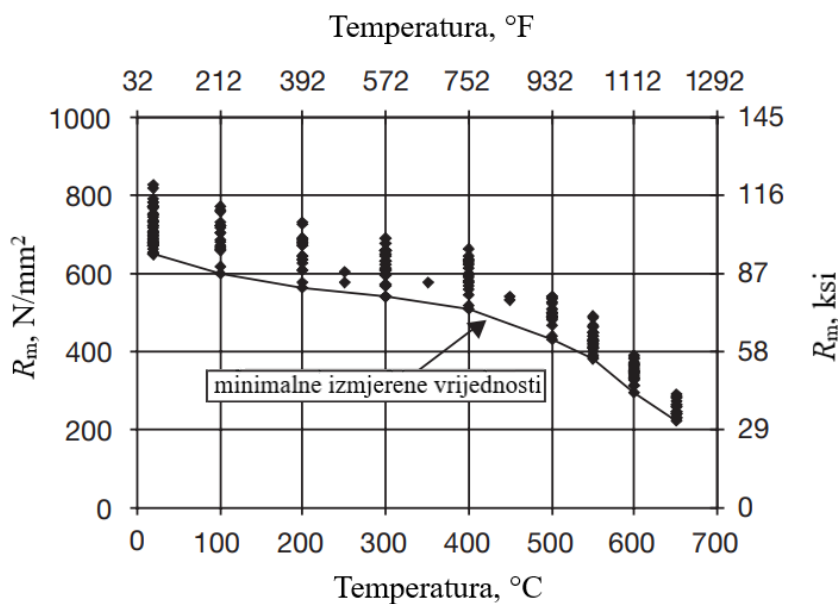
Standard	Oznaka čelika	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća $R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	Istezljivost $A_5$ , %	Tvrdoća, HB
A213 - A335	P91	min. 415	min. 585	maks. 20	250

Vrijednosti vlačnih svojstava čelika P91 određene su pri radnim temperaturama, između 20 °C i 650 °C. Na slici 21. prikazana je ovisnost konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$  čelika P91 i temperature. [13]



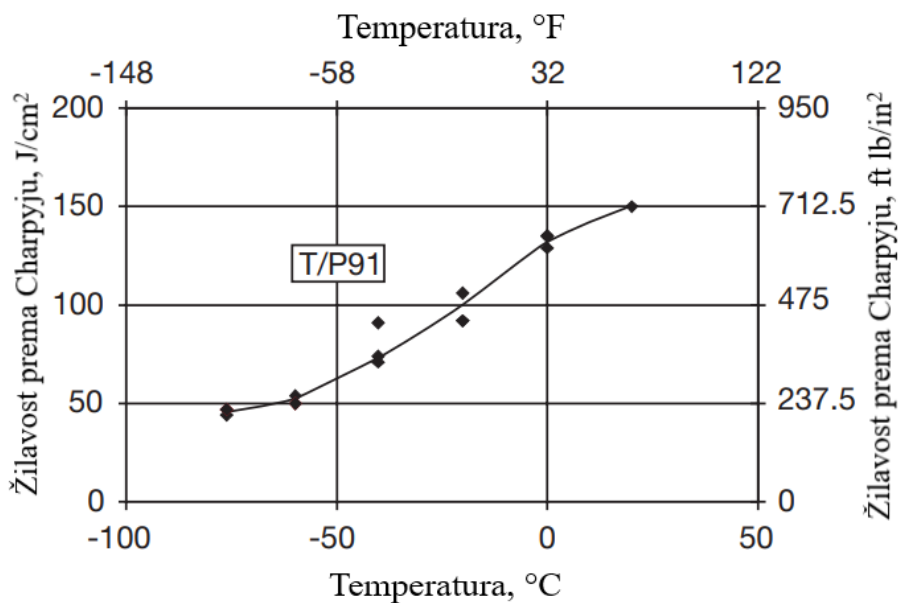
Slika 21. Ovisnost konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$  čelika P91 i temperature [13]

Na slici 22. prikazana je ovisnost vlačne čvrstoće  $R_m$  čelika P91 i temperature.



Slika 22. Ovisnost vlačne čvrstoće čelika P91 i temperature [13]

Dodatno se uz ispitivanje vlačnih svojstava provodi ispitivanje udarnog rada loma za utvrđivanje žilavosti materijala. Ispitivanje udarnog rada loma provodi se na ispitnom uređaju koji se zove Charpyjev bat, na pripremljenim uzorcima s V zarezom. Na slici 23. prikazana je ovisnost udarnog rada loma čelika P91 i temperature. [13]

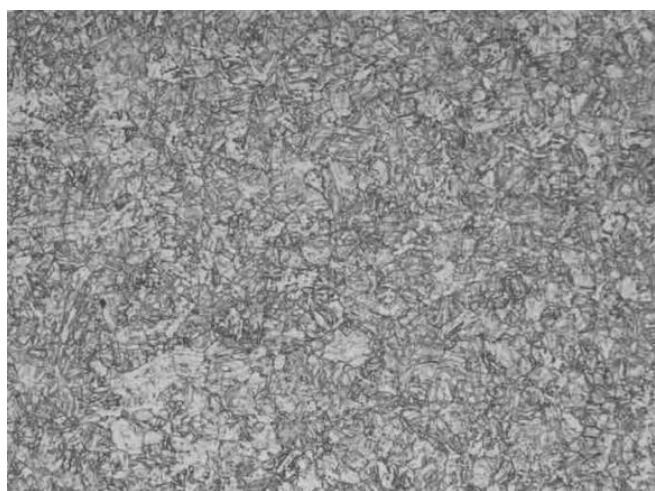


Slika 23. Ovisnost žilavosti čelika P91 i temperature [13]

## 5.2. Mikrostruktura čelika P91

Uz poštivanje propisanih uvjeta provođenja toplinske obrade čelika P91 postiže se struktura popuštenog martenzita s precipitacijom  $M_{23}C_6$  karbida koji uglavnom stabiliziraju martenzitnu strukturu i karbonitrida bogatih vanadijem i niobijem tipa MX (M = V ili Nb i X = C ili N). Prisutnost tih precipitata povećava iznos granice puzanja precipitacijskim očvrnućem. [13]

Na slici 24. prikazana je mikrostruktura čelika P91 nakon normalizacije i popuštanja.

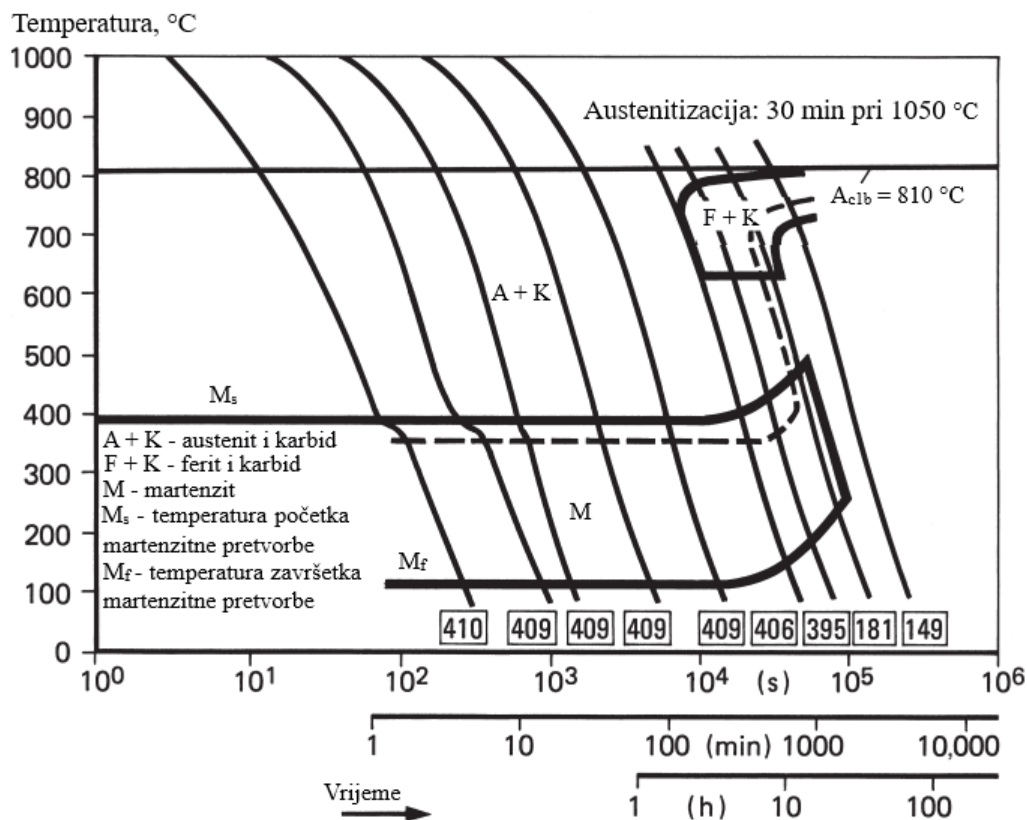


Slika 24. Mikrostruktura čelika P91 nakon normalizacije i popuštanja [13]

## 5.3. Transformacijske promjene čelika P91

Temperature transformacije određuju se korištenjem diferencijalne dilatometrijske metode. Ovisno o kemijskom sastavu, temperatura eutektoidne pretvorbe  $A_{c1}$  nalazi se u temperaturnom rasponu od 800 °C do 830 °C, dok se temperatura pretvorbe austenita  $A_{c3}$  nalazi u rasponu od 890 °C do 940 °C. [13]

Na slici 25. prikazan je dijagram kontinuiranog hlađenja (CCT dijagram) čelika P91.

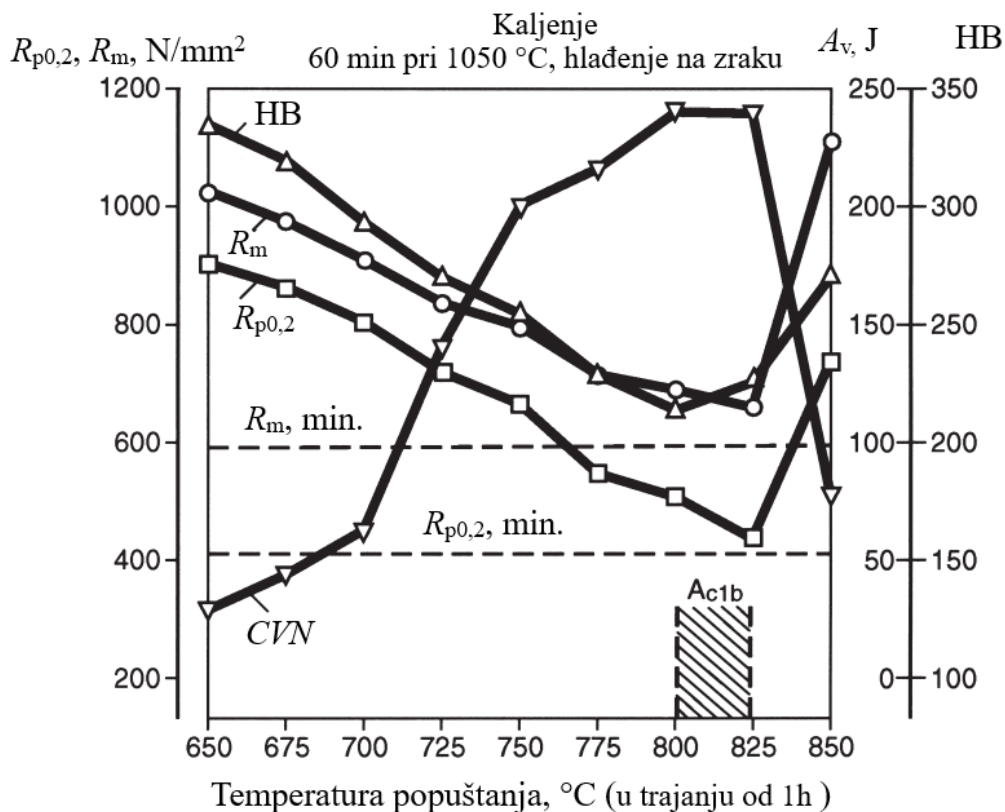


Slika 25. Dijagram kontinuiranog hlađenja (CCT dijagram) čelika P91 [13]

Čelik P91 koristi se u normaliziranom i popuštenom stanju. Hlađenjem s temperature austenitizacije na sobnu temperaturu postiže se martenzitna mikrostruktura. Maksimalan iznos tvrdoće nastale martenzitne mikrostrukture treba biti manji od 450 HV. Temperatura početka martenzitne pretvorbe  $M_s$  prilično je visokog iznosa, oko 400 °C, a temperatura završetka martenzitne pretvorbe  $M_f$  nešto je viša od 100 °C i ovisi o veličini austenitnog zrna. [13]

Toplinska obrada u proizvodnji čelika P91 koristi se u svrhu postizanja optimalnih svojstava granice puzanja, tvrdoće i žilavosti. Prvo se provodi postupak normalizacijskog žarenja pri čemu se materijal zagrijava na temperaturu od 1040 °C do 1080 °C i hladi, najčešće na zraku, uslijed čega dolazi do otapanja većine karbida. Normalizacijskim žarenjem postiže se sitnozrnata mikrostruktura povećane žilavosti. Nadalje, popuštanje pri temperaturama od 750 °C do 780 °C omogućava karbidima homogenu precipitaciju unutar martenzitne mikrostrukture što doprinosi povećanju granice puzanja. [13,17]

Na slici 26. prikazan je utjecaj popuštanja pri temperaturama od 650 °C do 850 °C tijekom trajanja od jednog sata na mehanička svojstva čelika P91: vlačnu čvrstoću  $R_m$ , konvencionalnu granicu razvlačenja  $R_{p0,2}$ , tvrdoću prema Brinellu HB, i žilavost prema Charpyju CVN.



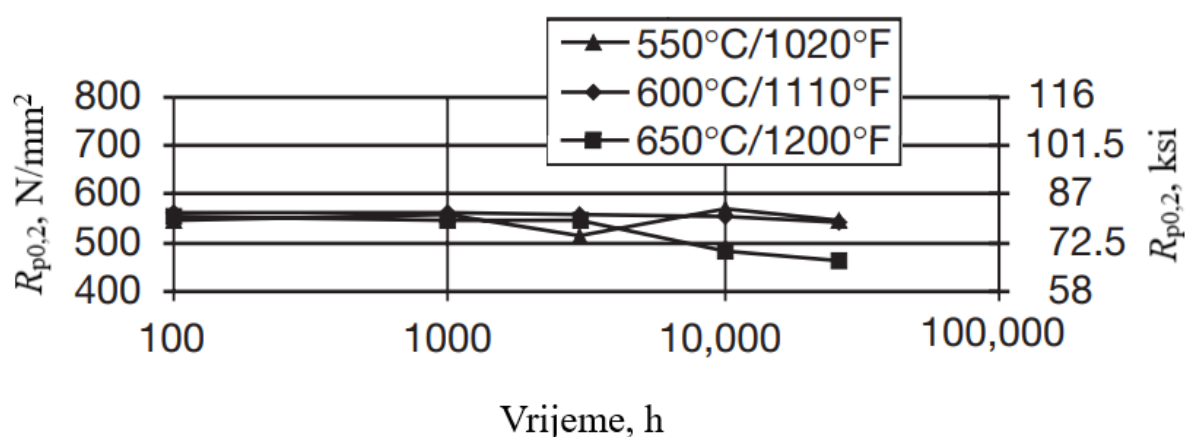
Slika 26. Utjecaj postupka popuštanja na mehanička svojstva čelika P91 [13]

Povećanjem temperature popuštanja do iznosa  $A_{c1}$  dolazi do smanjenja iznosa konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$ , vlačne čvrstoće  $R_m$  i tvrdoće, dok se povećava žilavost. Pri temperaturama iznad  $A_{c1}$  iznosi vlačnih svojstava se povećavaju, a žilavost se smanjuje. Također, popuštanjem pri temperaturi iznad  $A_{c1}$  (na 800 °C) postiže se bolja otpornost čelika P91 na puzanje. [13]

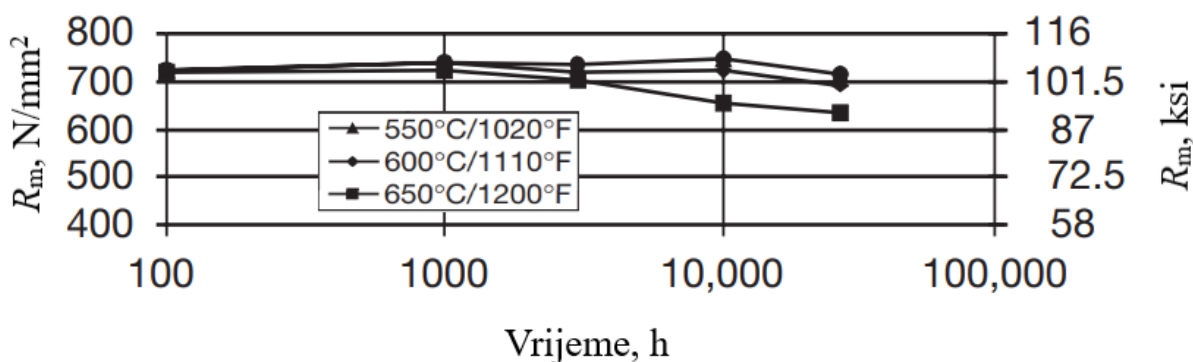
#### 5.4. Svojstva nakon precipitacijskog očvršćivanja

Precipitacijskim očvršćivanjem (dozrijevanjem ili starenjem) kod nekih je legura moguće poboljšati mehanička svojstva. Primjer takvih materijala je i čelik P91 kod kojega se mehanička svojstva određuju nakon provedenog postupka umjetnog dozrijevanja (starenja). Ispitni uzorci iz čelika P91 umjetno su dozrijevani pri temperaturama od 550 °C, 600 °C, i 650 °C u trajanju od 100 sati do 30000 sati. [13,17]

Rezultati provedenog ispitivanja mehaničkih svojstava konvencionalne granice razvlačenja, vlačne čvrstoće, istezljivosti i žilavosti u vremenu prikazani su na slikama 27., 28., 29. i 30.

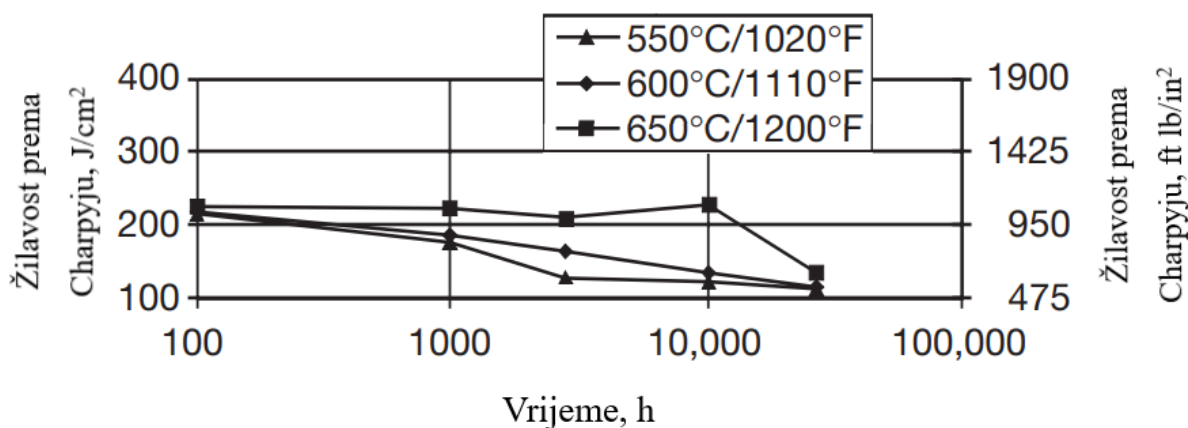


Slika 27. Konvencionalna granica razvlačenja čelika P91 nakon dozrijevanja [13]

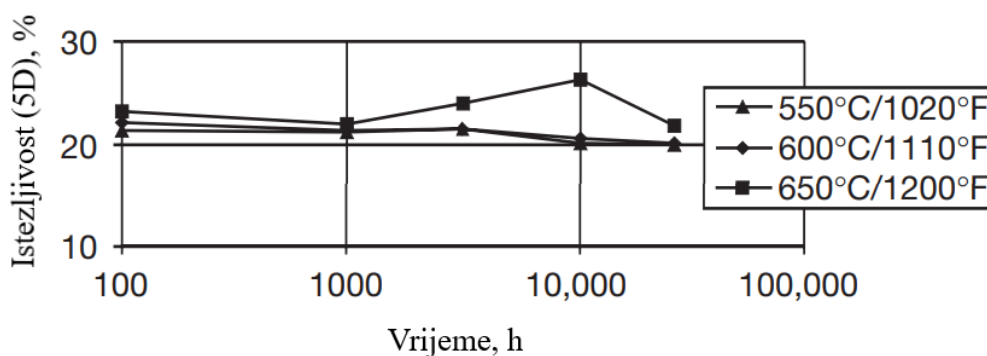


Slika 28. Vlačna čvrstoća čelika P91 nakon dozrijevanja [13]





Slika 29. Žilavost čelika P91 nakon dozrijevanja [13]

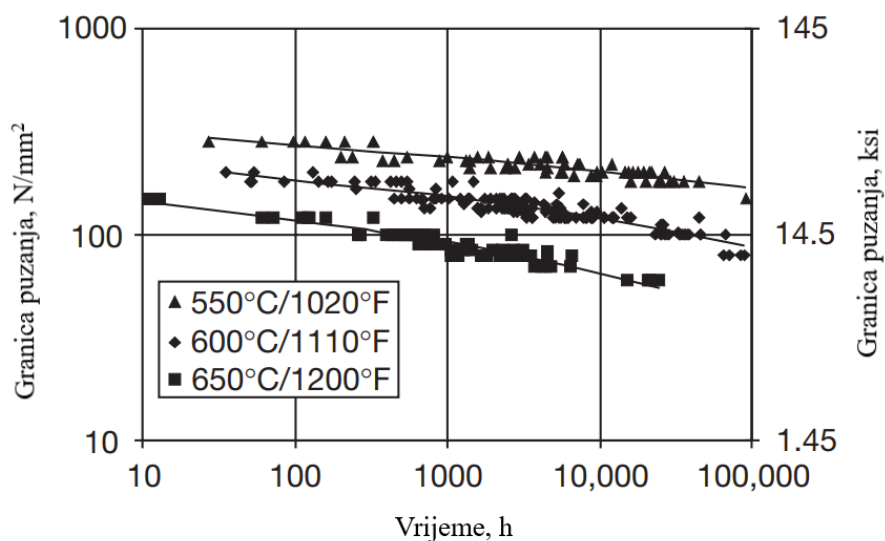


Slika 30. Istezljivost čelika P91 nakon dozrijevanja [13]

### 5.5. Puzanje čelika P91

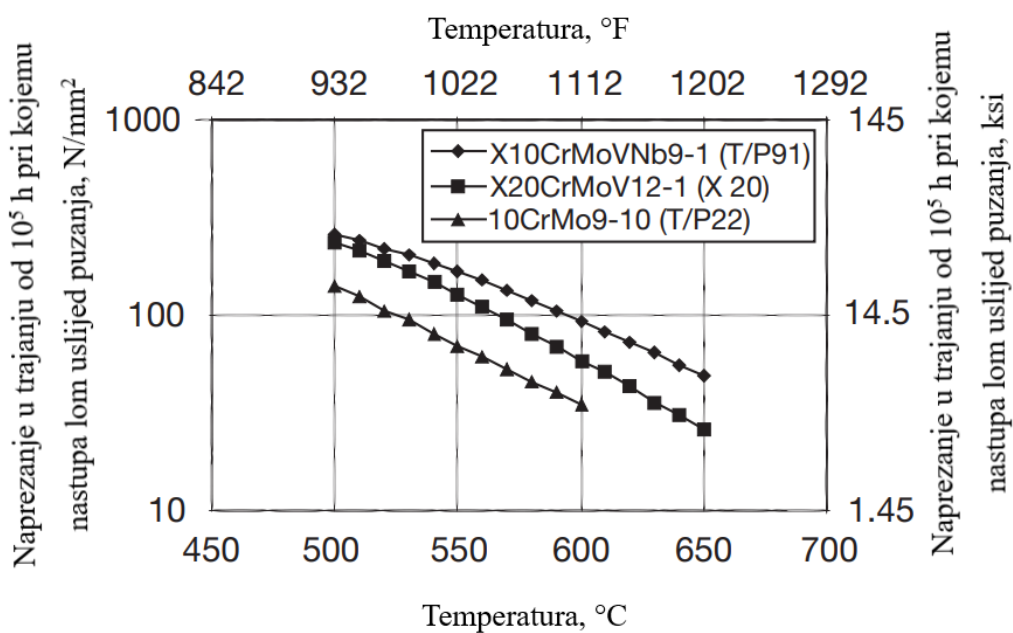
Uslijed izlaganja čelika P91 visokim radnim temperaturama, potrebno je ispitati otpornost na pojavu puzanja. Ispitivanje otpornosti čelika P91 na puzanje provodi se na cijevima različitih dimenzija u uvjetima različitih iznosa temperatura i napreznja. [13]

Na slici 31. prikazana je ovisnost iznosa granice puzanja i vremena rada pri temperaturama od 550 °C, 600 °C, i 650 °C.



Slika 31. Ovisnost granice puzanja čelika P91 pri različitim radnim temperaturama [13]

Na slici 32. prikazana je ovisnost napreznja pri kojemu nastupa lom uslijed puzanja i temperature u vremenu od  $10^5$  sati za čelike P91, X20 i P22.



Slika 32. Ovisnost napreznja i temperature na pojavu loma uslijed puzanja čelika P91, X20 i P22 [13]

## 6. ZAVARIVANJE ČELIKA P91

Prva istraživanja zavarljivosti modificiranih 9Cr–1Mo čelika (T/P91) započela su 1978. godine u laboratoriju ORNL (eng. *Oak Ridge National Laboratory*) i nastavljena u nadolazećim godinama u brojnim istraživačkim skupinama u SAD–u, Japanu i Europi. U godinama istraživanja zavarljivosti pa sve do danas, čelik P91 uspješno je zavaren najčešće korištenim postupcima zavarivanja poput TIG–a, REL–a, EPP–a i MIG/MAG postupka, pokrivajući pritom širok raspon debljina stijenki materijala. [13]

Martenzitni čelici ubrajaju se u „teže“ zavarljive čelike pri čemu se pojam „teže“ odnosi na uvjete koje je potrebno osigurati prije, tijekom i nakon postupka zavarivanja. Uvjeti koje je potrebno osigurati su [5,12]:

- provođenje odgovarajućeg predgrijavanja komponenti koje se zavaruju. Deblje komponente potrebno je predgrijavati primjenom električnog načina zagrijavanja: induktivno ili elektrootporno predgrijavanje. Temperatura predgrijavanja čelika P91 je iznosa od 200 °C do 250 °C,
- osiguravanje maksimalne međuprolazne temperature između svakoga sljedećega prolaza u iznosu do 300 °C,
- korištenje ispravne, provjerene i umjerene opreme za predgrijavanje,
- rukovanje dodatnim materijalom za zavarivanje u skladu sa zahtjevom proizvođača, posebno sušenje, rukovanje i držanje nakon sušenja. Ovo se posebno odnosi na elektrode i praškove koji se koriste u postupku zavarivanja koji mogu na sebe vezati vlagu,
- zaštitni plin za zavarivanje i zaštitu korijena korišten u postupku zavarivanja je argon, minimalne čistoće Argon 4,8. U postupku zavarivanja obavezno je korištenje zaštitnog plina, a količina zaštitnog plina i način distribucije plina važne su varijable postupka zavarivanja,
- pripajanje je potrebno provesti u predgrijanom stanju. Veličina pripoja definirana je ovisno o debljini komponente. Kod komponenti debljeg presjeka postavljaju se šipke–valjčići koji se zavaruju umjesto pripoja. Šipke–valjčići trebaju biti iste kvalitete kao i osnovni materijal. Pripoje je potrebno provjeravati jer su skloni pukotinama, a nakon pripajanja temperaturu predgrijavanja potrebno je održavati sve do kraja zavarivanja,

- zavarivanje komponenti provodi se postupcima TIG, REL i EPP. Za promjere do 88,9 mm zavarivanje se provod TIG postupkom, a veći promjeri zavaruju se kombinacijom TIG i REL postupka. EPP zavarivanje se primjenjuje za popunu sučeljenih spojeva i spojeva priključak–komora. Uz navedene postupke zavarivanja, čelik P91 zavarljiv je i MIG/MAG postupkom za koji su danas razvijeni prikladni dodatni materijali, međutim rjeđe se koristi zbog povećane opasnosti od pojave nedovoljnog protaljivanja tj. naljepljivanja, kako je prikazano na slici 33. Ova vrsta pogreške u zavarenim spojevima predstavlja poseban problem kod dinamički opterećenih konstrukcija i konstrukcija izloženih visokim temperaturama uslijed kojih zbog dilatacije materijala, pogreška može propagirati u pukotinu i uzrokovati lom u eksploatacijskim uvjetima,



Slika 33. Nedovoljno protaljivanje [5]

- tijekom zavarivanja korijena završetke u korijenu i mjesta spajanja potrebno je brusiti da bi se izbjegle greške vezivanja. Nakon svakog prekidanja zavarivanja kod REL i EPP zavarivanja preporučuje se brušenje završetaka, kao i čišćenje svakog sloja brušenjem nakon završetka njegovog zavarivanja,
- s obzirom da se radi o opterećenim komponentama koje rade u području puzanja, zavareni spojevi moraju imati blagi, gladak prijelaz na osnovni materijal, bez zajeda. To se postiže brušenjem zavara ili TIG zavarivanjem prolaza na prijelazima zavara na osnovni materijal,
- nakon zavarivanja, zavareni spojevi se kontrolirano hlade ili se dogrijavaju na temperaturu  $300 \pm 20$  °C. Dogrijavaње se provodi kod debljina zavarenih spojeva u iznosu od 30 mm i većih presjeka zavara, te kod spojeva zavarenih REL i EPP postupkom gdje je moguća prisutnost vodika iz dodatnog materijala. Dogrijavaње za uklanjanje vodika provodi se i u slučaju kada se zavareni spoj hladi na sobnu temperaturu, a toplinsku obradu potrebno je provesti tek 48 sati nakon postupka

zavarivanja. Prije toplinske obrade zavareni spoj se treba ohladiti ispod 80 °C i držati u trajanju od minimalno dva sata u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture,

- toplinska obrada se provodi pri temperaturama 760±10 °C u trajanju od dva do četiri sata, pri čemu je potrebno voditi pažnju oko postupnog podizanja temperature u peći u cilju što ravnomjernijeg progrijavanja radnog komada po presjeku.

### 6.1. Zavarivanje čelika P91 s nelegiranim i niskolegiranim čelicima

Martenzitna mikrostruktura može nastati jedino iz austenita pri čemu je važan uvjet postojanje transformacije ferita u austenit ( $F \rightarrow A \rightarrow M$ ). Opće pravilo koje se postavlja u postupku zavarivanja feritnih čelika različitih kemijskih sastava i svojstava je upotreba dodatnog materijala čiji kemijski sastav odgovara kemijskom sastavu feritnog čelika s manjim udjelom legiranih elemenata. Usprkos tome, korištenje dodatnog materijala prikladnog za zavarivanje feritnog čelika s većim udjelom legiranih elemenata u paru doprinosi povećanju svojstava žilavosti i poboljšava njihovu zavarljivost. Najveći izazov u postupku zavarivanja čelika P91 i niskolegiranih čelika su razlike u temperaturama naknadne toplinske obrade nakon postupka zavarivanja. Ovisno o propisanome standardu i debljini stijenke konstrukcije obavezno je provođenje naknadne toplinske obrade. Standard ASME za parne kotlove i tlačne spremnike propisuje minimalnu temperaturu naknadne toplinske obrade u iznosu od 705 °C za postupak zavarivanja različitih materijala s udjelom kroma u dodatnom materijalu u iznosu od 3%. Međutim, propisana temperatura od 705 °C je vrijednost iznad maksimalne temperature na kojoj se provodi naknadna toplinska obrada nelegiranih i većine niskolegiranih čelika uslijed koje dolazi do značajnog smanjenja čvrstoće nelegiranih i većine niskolegiranih čelika. Nadalje, difuzija ugljika iz niskolegiranog u visokolegirani čelik može uzrokovati razugljičenje niskolegiranog čelika i pougljičenje visokolegiranog čelika. Ova se pojava ne može izbjeći osim usklađenim postupcima naknadnih toplinskih obrada. U praksi je čest primjer zavarivanja visokolegiranog čelika P91 i niskolegiranog čelika P22 s maksimalnim udjelom 2,60 %Cr. Postupak zavarivanja moguće je provesti koristeći dodatni materijal prikladan za zavarivanje čelika P22, pri čemu se dobiva povoljnija žilavost, a temperatura naknadne toplinske obrade iznosi od 710 °C do 730 °C. Također povoljna svojstva žilavosti postižu se uz primjenu dodatnog materijala za zavarivanje čelika P91, uz provođenje naknadne toplinske obrade pri temperaturama od 730 °C do 750 °C. Obje vrste dodatnih materijala za zavarivanje čelika P22

i P91 pokazuju neznatna odstupanja iznosa granice puzanja na vijek trajanja konstrukcije. [13,17,18]

## 6.2. Zavarivanje čelika P91 i martenzitnih 9–12 %Cr čelika

Tijekom razvoja optimalnih dodatnih materijala poput žice za zavarivanje, obloženih elektroda i praškom punjene žice, različiti proizvođači dodatnih materijala na različite su načine pokušali optimizirati kemijski sastav dodatnog materijala želeći dobiti optimalna mehanička svojstva. Pored zahtjeva za granicom razvlačenja i vlačnom čvrstoćom pri sobnoj temperaturi, metal zavara mora zadovoljavati određene zahtjeve za žilavošću i traženom čvrstoćom pri visokim radnim temperaturama tj. granicu puzanja. Već na početku istraživanja dodatnih materijala za zavarivanje čelika P91 postalo je jasno da nije moguće postići minimalne zahtjeve za čvrstoćom koristeći isti raspon pojedinih kemijskih elemenata kao što je osnovni materijal. Stoga je bilo potrebno sagledati utjecaj pojedinih kemijskih elemenata i njihov međusobni utjecaj uvažavajući pritom potrebni iznos žilavosti i uvažavajući potrebne iznose drugih svojstva. Stvarajući karbonitride, dušik utječe na povećanje granice puzanja, granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, uzrokujući pritom smanjenje duktilnosti i žilavosti. Mangan i nikal imaju manji utjecaj na promjenu čvrstoće, ipak njihova prisutnost u iznosima gornjih granica specifikacija osnovnog materijala značajno utječe na povećanje žilavosti. Iz tog razloga zbroj udjela mangana i nikla ograničen je na 1,5 %, dok udio dušika iznosi oko 0,04 %. Niobij ima negativan utjecaj na žilavost, međutim zbog povoljnog utjecaja na povećavanje granice puzanja, udio niobija se ograničava na 0,04 % što je donja granica specifikacija osnovnog materijala. [13]

U tablici 9. prikazani su najčešći udjeli pojedinih kemijskih elemenata u metalu zavara za različite postupke zavarivanja.

Tablica 9. Tipične vrijednosti udjela kemijskih elemenata metala zavara za različite postupke zavarivanja [13]

Postupak	Sadržaj kemijskih elemenata, %								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb	V	N
TIG žica	0,10	0,20	0,50	9,0	1,0	0,8	0,05	0,20	0,04
Obložene elektrode	0,09	0,20	0,65	9,0	1,10	0,8	0,05	0,20	0,04

EPP									
Žica	0,11	0,30	0,50	9,0	1,0	0,8	0,06	0,20	0,04
Metal zavara	0,11	0,30	0,50	8,5	0,95	0,75	0,05	0,20	0,04

Postupak zavarivanja čelika P91 tipičan je za 9–12 %Cr čelike. Iz toga se razloga tehnologija zavarivanja koja se primjenjuje za zavarivanje čelika X20 može izravno primijeniti u postupku zavarivanja čelika P91. Zavarljivost čelika P91 bit će nešto bolja od zavarljivosti čelika X20 zbog manjeg udjela ugljika, a samim time i smanjenoj mogućnosti zakaljenja uslijed hlađenja, te smanjenoj mogućnosti pojave hladnih pukotina i napetosne korozije. Kod zavarivanja čelika P91 s drugim 9–12 %Cr čelicima različitog kemijskog sastava u odnosu na P91, zavarljivost se neće promijeniti zbog njihovih sličnih metalurških svojstava i zahtjeva za naknadnom toplinskom obradom. Stoga se čelik P91 može uspješno zavarivati s čelicima P92, X20, TP122 ili VM12–SHC, uz primjenu dodatnog materijala za zavarivanje čelika P91. [13,18]

### 6.3. Zavarivanje čelika P91 s austenitnim čelicima i niklovim legurama

U postupku zavarivanja raznorodnih materijala poput čelika P91 i austenitnih čelika ili niklovih legura obavezno je korištenje dodatnog materijala na bazi nikla. Zbog pojave krhkosti tijekom naknadne toplinske obrade nakon postupka zavarivanja ili tijekom rada pri povišenim temperaturama iznad 300 °C, ne preporuča se korištenje austenitnog dodatnog materijala poput serije 300 (npr. tip 309), koji se često koristi u postupku zavarivanja raznorodnih materijala, feritnih i austenitnih čelika za primjenu u uvjetima temperature okoline. Dodatni materijali na bazi nikla pokazuju sklonost pojavi toplih pukotina, stoga je postupak zavarivanja potrebno provesti uz kontrolu iznosa unosa topline pri što manjim vrijednostima. Međutim, čelik P91 zahtijeva predgrijavanje na temperaturama iznad 150 °C (od 200 °C do 250 °C). U tom slučaju česta je praksa provođenja predgrijavanja samo čelika P91. Na komponente koje čine debele stijenke, preporuča se navarivanje dodatnog materijala na bazi nikla na čelik P91 nakon čega slijedi toplinska obrada. Na taj način mijenjaju se svojstva i kemijski sastav na površini čelika P91 čime se postižu povoljnija metalurška svojstva za daljnji postupak zavarivanja. Nakon toplinske obrade, postupak zavarivanja na austenitni čelik ili niklovu leguru provodi se koristeći isti dodatni materijal na bazi nikla koji se navarivao na čelik P91. Komponente koje se sastoje

od tankih stijenki čelika P91 i austenitnog čelika ili niklovihi legura moguće je izravno zavariti i postići kvalitetan zavareni spoj sve dok naknadna toplinska obrada nema negativnih utjecaja na austenitni čelik. Mjere opreza u postupku zavarivanja potrebno je poduzeti kako bi se ograničio unos topline na vrijednosti manje od 1,2 kJ/mm. [18]

#### **6.4. Ciklus toplinske obrade u postupku zavarivanja čelika P91**

Čelici s povećanom otpornošću na pojavu puzanja poput čelika P91 namijenjeni su radu u uvjetima visokih temperatura pri čemu se kao jedan od najvećih izazova u postupku zavarivanja javlja osjetljivost na promjenu iznosa topline. Vrlo je važno na pravilan način kontrolirati iznos unosa topline prije, tijekom i nakon postupka zavarivanja provodeći predgrijavanje, održavanje međuprolazne temperature i naknadnu toplinsku obradu. Preveliki ili premali unos topline može dovesti do pojave pukotina u zoni utjecaja topline (ZUT) i prijevremeni kvar ili pojavu loma konstrukcije. Zona utjecaja topline predstavlja područje najveće opasnosti u zavarenom spoju i jedan je od najvažnijih čimbenika kvalitete i vijeka trajanja zavarenog spoja. Brzina hlađenja materijala i solidifikacija metala zavara važni su čimbenici koji utječu na konačnu mikrostrukturu materijala. [19]

##### **6.4.1. Predgrijavanje**

Predgrijavanje materijala predstavlja zagrijavanje metala koji se zavaruje do određene temperature iznad temperature okoline, prije početka postupka zavarivanja i održavanje te temperature tijekom zavarivanja. Predgrijavanje zavarivanog metala provodi se s ciljem smanjenja brzine hlađenja metala zavara i zone utjecaja topline omogućavajući postupno hlađenje i stezanje metala, a time i smanjenje unutarnjih napreznja zavarenog spoja tj. zaostalih napreznja. Predgrijavanjem se omogućava lakši izlazak otopljenih plinova, posebice vodika, a osobit doprinos predgrijavanja očituje se u smanjenju sklonosti otvrdnjavanju i pojavi pukotina u zoni utjecaja topline pojedinih vrsta čelika, posebice onih s povišenim sadržajem ugljika i drugih legiranih elemenata. [5]

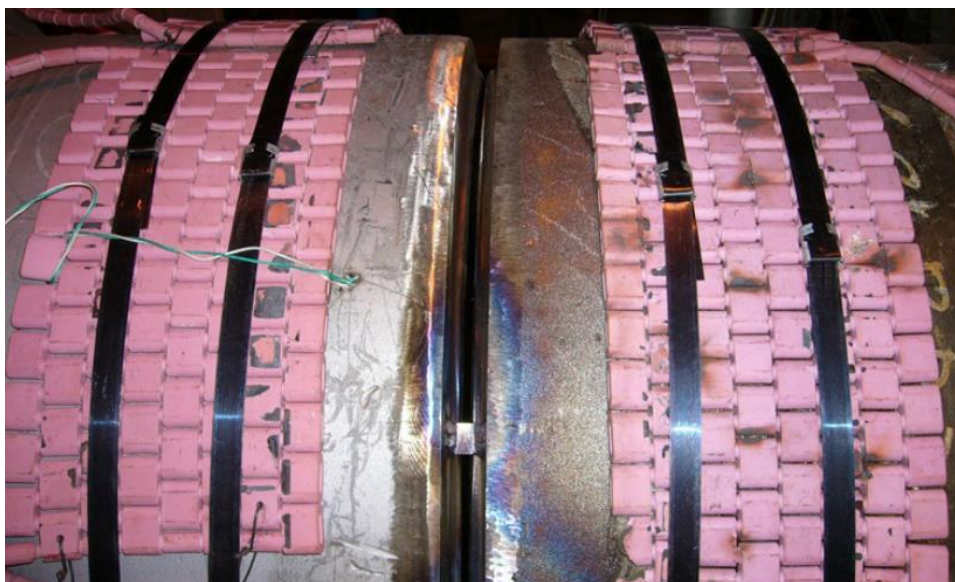
U svrhu postizanja optimalne brzine hlađenja čelik P91 se predgrijava na temperaturama od 200 °C do 250 °C. Uz postizanje optimalne brzine hlađenja, pri temperaturama iznad 150 °C značajno se povećava pokretljivost vodika čime se omogućava difuzija vodika izvan



područja zavarivanja, a samim time smanjena je mogućnost pojave hladnih (vodikovih) pukotina. [12,18]

Martenzitni i martenzitno–feritni čelici pokazuju izraženo svojstvo prokaljivosti, pa će i pri sporom hlađenju zona taljenja i zona utjecaja topline koje su bile austenitne transformirati u martenzit. Unos topline predgrijavanjem smanjit će brzinu hlađenja, međutim ta brzina hlađenja još će uvijek biti dovoljna da se zona taljenja i zona utjecaja topline potpuno transformiraju u martenzit i pri usporenom hlađenju, jer su ove zone samozakaljive na zraku. Dakle, predgrijavanje i održavanje međuprolazne temperature nemaju svrhu izbjeći martenzitnu mikrostrukturu nakon završetka postupka zavarivanja, već smanjiti nepovoljni učinak temperaturnih naprezanja pri stezanju, smanjenjem razlika temperatura zavara i osnovnog materijala. [15]

Na slici 34. prikazano je elektrootporno predgrijavanje cijevi čelika P91.



Slika 34. Elektrootporno predgrijavanje cijevi čelika P91 [18]

#### **6.4.2. Međuprolazna temperatura**

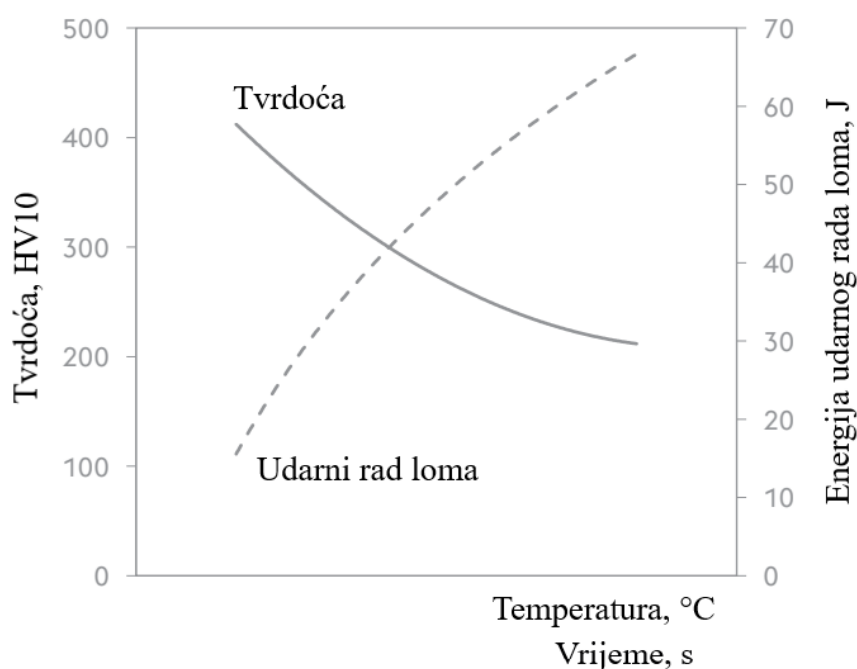
Pored zahtjeva za određivanjem potrebne temperature predgrijavanja, često se postavlja ograničenje za najvišu dostignutu temperaturu zavarivanog metala između dva prolaza električnim lukom ili drugim izvorom topline. Taj iznos temperature zapravo je najviša dopustiva temperatura predgrijavanja ili tzv. međuprolazna temperatura čiji se iznos kontrolira prije formiranja svakog sljedećeg zavara. Maksimalan iznos temperature međuprolaza u

postupku zavarivanja čelika P91 iznosi 300 °C. Ograničavanje međuprolazne temperature ispod temperature početka martenzitne pretvorbe ( $M_s \approx 400$  °C) temelji se na ideji da se kod postupka zavarivanja s višestrukim prolazima dopusti djelomična pretvorba martenzitne mikrostrukture u svakom formiranom zavaru. Na taj način formiranjem svakog sljedećeg prolaza zavarenog spoja, metal zavara kao i zona utjecaja topline popuštaju se koristeći energiju koja se unosi toplinom tijekom postupka zavarivanja. Time se postiže smanjeni iznos tvrdoće i poboljšana žilavost metala zavara. Još jedan od razloga ograničenja međuprolazne temperature je mogućnost pojave toplih pukotina ukoliko se prijeđe iznos međuprolazne temperature, posebno kod postupaka zavarivanja koje karakteriziraju visoki iznosi unesene topline poput elektrodučnog zavarivanja pod zaštitom praška (EPP). [12,18]

#### **6.4.3. Naknadna toplinska obrada**

Nakon završetka postupka zavarivanja metal zavara se mora polako hladiti ispod iznosa temperature završetka martenzitne pretvorbe da bi se postigla stopostotna mikrostruktura martenzita prije naknadne toplinske obrade. U praksi se pokazalo da se držanjem oplata debelih stijenki u trajanju od dva sata na temperaturi između 80 °C i 100 °C osigurava postignuta mikrostruktura martenzita po cijelom poprečnom presjeku stijenke. Kod kompleksnije građenih konstrukcija kod kojih je moguća pojava zaostalih naprezanja, preporuča se zaustaviti hlađenje na temperaturi od 80 °C i držati na toj temperaturi do primjene dogrijavanja u svrhu uklanjanja vodika ili do provođenja naknadne toplinske obrade. Svi martenzitni čelici u popuštenom stanju nakon postupka zavarivanja zahtijevaju naknadnu toplinsku obradu zbog osjetljivosti martenzitne mikrostrukture na pojavu napetosne korozije i zbog smanjenja tvrdoće martenzitne mikrostrukture te povećanja žilavosti. [18]

Na slici 35. prikazani su iznosi tvrdoće i žilavosti nakon postupka zavarivanja i nakon provedene toplinske obrade.



Slika 35. Iznos tvrdoće i žilavosti čelika P91 nakon postupka naknadne toplinske obrade [18]

Nadalje, povoljna svojstva u radu pri visokim temperaturama poput visoke granice puzanja nastaju kao posljedica mikrostrukture čelika P91 koja se uspostavlja popuštanjem čelika korištenjem unesene topline za vrijeme postupka zavarivanja. Tijekom postupka naknadne toplinske obrade dolazi do preraspodjele dislokacija čime se smanjuje njihova gustoća u ovisnosti o temperaturi i trajanju toplinske obrade, što za posljedicu ima smanjenje tvrdoće i povećanje iznosa žilavosti. Također, precipitacijom karbonitrida bogatih vanadijem i niobijem unutar martenzitne mikrostrukture i precipitacijom kromovih karbida duž granice austenitnih i martenzitnih zrna postiže se željeno svojstvo granice puzanja. [18]

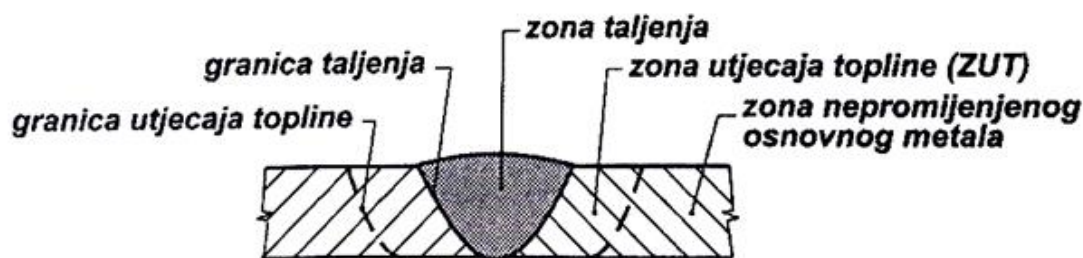
Gornji iznos temperature toplinske obrade ograničen je temperaturom transformacije ferita u austenit  $A_{c1}$ , koja je funkcija kemijskog sastava. Prekoračenje iznosa temperature  $A_{c1}$  osnovnog materijala ili metala zavara tijekom toplinske obrade može uzrokovati promjenu mikrostrukture, pa je te iznose temperatura potrebno izbjeći. Proizvođači čelika P91 i različiti standardi propisuju provođenje postupka naknadne toplinske obrade nakon postupka zavarivanja pri temperaturama od 730 °C do 770 °C. Kako bi se postigla optimalna svojstva žilavosti i čvrstoće preporuka je provođenje naknadne toplinske obrade u temperaturnom rasponu od  $760 \pm 10$  °C. Vrijeme držanja ovisi o debljini materijala i vrsti postupka zavarivanja. Naknadnu toplinsku obradu potrebno je provesti u peći za toplinsku obradu ili koristeći

induktivno te elektrootporno ugrijavanje uz praćenje i kontrolu postupka ugrijavanja. Kako bi se smanjile mogućnosti pojave toplinskog naprezanja i osiguralo ravnomjerno progrijavanje po poprečnom presjeku stijenke, brzina ugrijavanja iznosi od 80 °C/h do 120 °C/h, a brzina hlađenja od 100 °C/h do 150 °C/h. [18]

## 6.5. Struktura zavarenog spoja

U strukturi zavarenog spoja, kako je prikazano na slici 36., uobičajeno se mogu razlikovati tri karakteristične zone [5]:

- zona taljenja,
- zona utjecaja topline (ZUT),
- zona nepromijenjenog osnovnog metala.



Slika 36. Osnovna strukturalna podjela zavarenog spoja [5]

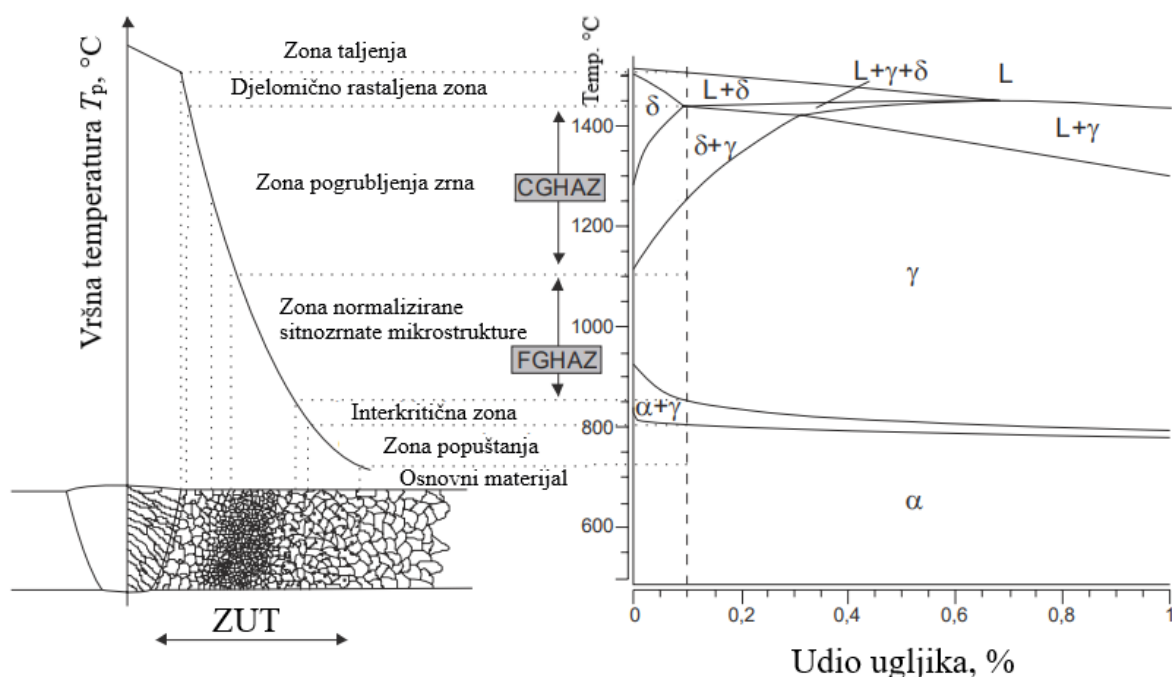
Zona taljenja dio je zavarenog spoja određen granicama taljenja unutar kojih se osnovni materijal potpuno rastalio, uz udio rastaljenog dodatnog metala. Količina dodatnog metala u zoni taljenja može varirati u širokom rasponu, što prije svega ovisi o postupku zavarivanja i korištenim parametrima zavarivanja. U zoni taljenja postižu se vrlo visoke temperature, hlađenje metala traje najduže, a nastala metalurška struktura najviše ovisi o načinu izvođenja postupka zavarivanja. Najniža temperatura u zoni taljenja mora biti iznad temperature tališta metala, a to je kod zavarivanja čelika iznad 1523 °C. Mikrostrukturu u zoni taljenja čine najčešće krupna zrna, a u slučaju višeslojnog zavarivanja nastaje normalizirana sitnozrnata struktura. [5]

Zona utjecaja topline (ZUT) predstavlja područje izvan granica taljenja u rubnim dijelovima osnovnog metala u kojem je zbog utjecaja povišenih temperatura došlo do značajnih strukturalnih promjena osnovnog metala, a s time i do promjena mehaničkih i drugih svojstava

zavarenog spoja. Strukturne promjene osnovnog metala u zoni utjecaja topline najviše ovise o postignutim temperaturama za vrijeme postupka zavarivanja kao i o brzini hlađenja, dok širina te zone ovisi o debljini zavarenih dijelova, jakosti korištene struje zavarivanja, brzini i načinu vođenja električnog luka, broju prolaza, načinu odvođenja topline i dr. U postupku zavarivanja čelika, posebno kod sporijeg odvijanja procesa i uobičajenog intenziteta izvora topline, područje temperatura kod kojih dolazi do izraženijih strukturnih promjena, tj. zona utjecaja topline, uzima se u rasponu od 723 °C do 1523 °C. Unutar čitave zone utjecaja topline dolazi do različitih metalurških primjena koje se sukladno njihovim karakteristikama mogu svrstati u sljedeća karakteristična područja [5,20]:

- djelomično rastaljena zona (zona nepotpunog taljenja),
- zona pogrubljenja zrna (zona pregrijavanja),
- zona normalizirane sitnozrnate strukture (zona normalizacije),
- interkritična zona (zona nepotpune prekrystalizacije),
- zona popuštanja (zona rekristalizacije).

Na slici 37. prikazane su metalurške strukture zavarenog spoja čelika P91.



Slika 37. Metalurške promjene strukture zavarenog spoja čelika P91 [21]

U djelomično rastaljenoj zoni (zoni nepotpunog taljenja) osnovni je materijal zagrijan na temperaturu između likvidus i solidus linije, pa dolazi do djelomičnog taljenja osnovnog materijala. Neujednačenost kemijskog sastava najviše je izražena u djelomično rastaljenoj zoni, jer se u rastaljenom metalu, zbog razlike u topivosti u krutom i tekućem stanju povećava koncentracija primjesa. U nerastaljenom dijelu osnovnog materijala ove zone dolazi do jakog porasta zrna zbog postizanja visokih temperatura. [20]

Zona pogrubljenja zrna (zona pregrijavanja) nalazi se neposredno uz granicu taljenja zavarenog spoja. Temperature koje osnovni materijal postiže u zoni pogrubljenja zrna iznosa su iznad temperature pretvorbe  $A_{c3}$ . Precipitati koji onemogućavaju rast austenitnog zrna pri nižim temperaturama, otapaju se pri temperaturama u zoni pogrubljenja zrna što kao posljedicu ima pojavu povećanja zrna austenita. U 9–12 %Cr čelicima, zrna  $\delta$ -ferita mogu nukleirati pri najvišim iznosima vršne temperature ( $T_p > 1250$  °C) uzrokujući porast zrna. Hlađenjem, 9–12 %Cr čelici tvore martenzitnu mikrostrukturu. U zoni pogrubljenja zrna maksimalni su iznosi tvrdoće i sukladno tome mali iznosi žilavosti metala. [20,21]

U zoni normalizirane sitnozrnate mikrostrukture (zone normalizacije) niži iznosi vršne temperature iznad 1100 °C, tj. malo iznad temperature transformacije  $A_{c3}$ , doprinose stvaranju sitnozrnatog austenita. U ovom slučaju iznos vršne temperature  $T_p$  nije dovoljno visok da se precipitati u potpunosti otope čime se ograničava rast austenitnih zrna. Ovo područje sitnozrnate mikrostrukture zone utjecaja topline ima najniže vrijednosti otpornosti na pužanje uslijed čega se pri duljem periodu rada čak i pri manjim iznosim naprežanja javljaju pukotine u materijalu. [21]

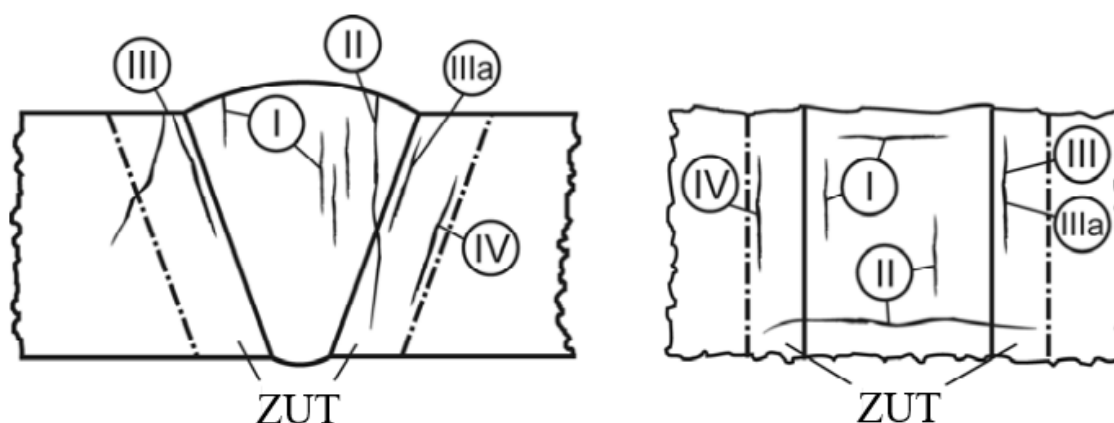
Vršna temperatura  $T_p$  interkritične zone (zone nepotpune prekrystalizacije) nalazi se između temperatura transformacije  $A_{c1}$  i  $A_{c3}$  što rezultira djelomičnom transformacijom  $\alpha$ -Fe (ferita) u  $\gamma$ -Fe (austenit) povećanjem temperature. Dok nova zrna austenita nastaju na granicama prethodnih austenitnih zrna i na granicama zrna martenzita oblika letvica, martenzitna mikrostruktura popušta se korištenjem toplinskog ciklusa postupka zavarivanja. Zbog djelomične topljivosti precipitata, otopljeni precipitati mogu uzrokovati pojavu krupnog zrna što je česta pojava tijekom naknadne toplinske obrade. Nakon hlađenja, mikrostruktura se sastoji od novonastalog martenzita i postojećeg popuštenog martenzita. Interkritičnu zonu karakterizira sitnozrnata mikrostruktura, a time i najniže vrijednosti tvrdoće. Poput zone normalizirane sitnozrnate mikrostrukture, interkritična zona je podložna pojavi pukotina. [21]

Vršne temperature  $T_p$  osnovnog materijala u zoni popuštanja (zoni rekristalizacije) iznosa su ispod temperature eutektoidne pretvorbe  $A_{c1}$ , stoga mikrostruktura ne prolazi kroz nikakve fazne transformacije, ali je lokalno popuštena pri višim temperaturama u odnosu na temperature pri kojoj se provodi toplinska obrada. Viši iznosi temperature popuštanja u odnosu na temperaturu toplinske obrade u zoni popuštanja može imati za posljedicu okrupnjavanje precipitata, dodatno potaknuto višim iznosom koeficijenta difuzije pri višim temperaturama. [20,21]

Zona nepromijenjenog osnovnog materijala, kod zavarivanja čelika, predstavlja područje u kojemu dostignute temperature ne prelaze  $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pri čemu ne dolazi do vidljivih promjena u mikrostrukturi i kemijskom sastavu osnovnog materijala. [5,21]

## 6.6. Mehanizmi nastanka pukotina

1974. godine, pukotine koje se javljaju u zavarenim spojevima čelika za rad pri visokim temperaturama prvi su puta kategorizirane u skupine prema shemi kako je prikazano na slici 38. Pukotine su kategorizirane ovisno o njihovoj lokaciji i orijentaciji unutar zavarenog spoja. Pukotine koje se javljaju u metalu zavara odgovaraju Tipu I i Tipu II. Ove vrste pukotina nastaju u metalu zavara u longitudinalnom ili transverzalnom smjeru. Dok pukotine Tipa I nemaju tendenciju propagacije iz područja metala zavara, pukotine Tipa II mogu propagirati u zonu utjecaja topline ili čak i u osnovni materijal. Preostale dvije vrste pukotina nastaju unutar zone utjecaja topline zavarenog spoja. Pukotine Tipa III nastaju u grubozrnatom području zone utjecaja topline u blizini granice taljenja i mogu propagirati duž područja krupnog zrna kao i u osnovni materijal. Pukotine Tipa IV javljaju se u zoni normalizirane sitnozrnate mikrostrukture i interkritičnoj zoni u blizini osnovnog materijala. Uz četiri navedene vrste pukotina (Tip I, II, III i IV), dodatno se koristi naziv za pukotine Tipa IIIa koje nastaju u blizini granice taljenja (Tip III), ali u potpuno sitnozrnatoj mikrostrukturi zone utjecaja topline koju karakteriziraju visoki iznosi otpornosti na pojavu loma uslijed naprezanja. [21]



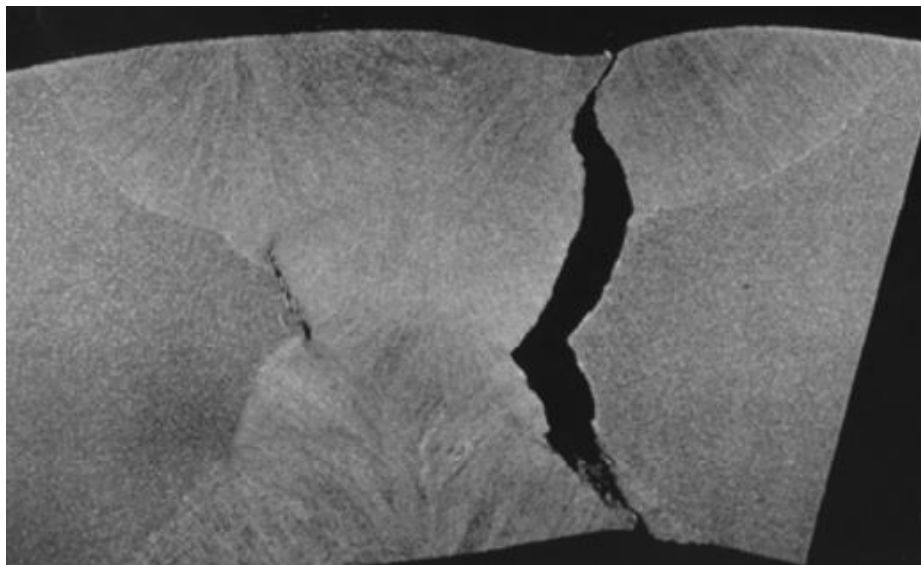
Slika 38. Klasifikacija pukotina u zavarenim spojevima čelika za rad pri visokim temperaturama [21]

### 6.6.1. Pukotine Tip I i Tip II

Pogreške u metalu zavara najčešće su povezane sa samim procesom zavarivanja ili naknadnom toplinskom obradom za redukciju zaostalih naprežanja. U manjoj mjeri pukotine su u metalu zavara povezane s pojavom puzanja uslijed rada pri visokim temperaturama. Smjer pružanja pukotina u metalu zavara najčešće je transverzalan, poprečan na smjer pružanja zavarenog spoja, iako je prisutno i longitudinalno pružanje pukotina, uzduž zavarenog spoja poput toplih pukotina koje se javljaju tijekom solidifikacije metala zavara. Razvojem tehnologije zavarivanja značajni su napreci ostvareni u postizanju homogenosti zavarenog spoja bez pojave uključaka, čime je smanjena mogućnost pojave toplih pukotina kod feritnih čelika, dok austenitni čelici i niklove legure pokazuju sklonost pojavi toplih pukotina. Kako je prethodno navedeno, kod postupka zavarivanja s višestrukim prolazima održavanjem međuprolazne temperature dopušta se djelomična pretvorba martenzitne mikrostrukture u svakom prolazu metala zavara zavarenog spoja, a svakim sljedećim prolazom, unesena energija koristi se za popuštanje postignute mikrostrukture. Kao rezultat postupka zavarivanja s višestrukim prolazima ne postiže se jednolična mikrostruktura metala zavara već se javljaju zone slične kao kod zone utjecaja topline. Ta područja unutar metala zavara mogu pokazivati sklonost pojavi pukotina uslijed procesa puzanja. [21]

Na slici 39. prikazana je pukotina Tipa I i Tipa II koja je uzrokovala lom čelika 1,25Cr–0,5Mo na temperaturi rada 540 °C nakon 87000 sati rada.





Slika 39. Pukotina Tipa I i Tipa II čelika 1,25Cr–0,5Mo [21]

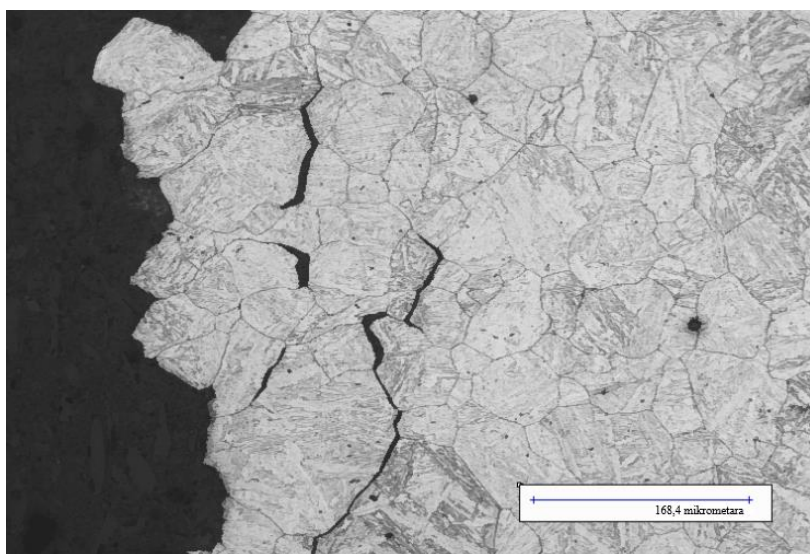
### 6.6.2. Pukotine Tipa III

Pukotine Tipa III definiraju se kao interkristalne pukotine, čiji je smjer pružanja duž granica zrna u zoni utjecaja topline ili metalu zavara, a javljaju se uslijed izlaganja zavarenog spoja povećanim temperaturama tijekom naknadne toplinske obrade, posebice žarenja za redukciju zaostalih naprežanja ili visokim temperaturama u uvjetima rada do oko 20000 sati. Pukotine Tipa III značajniju su pažnju privukle pedesetih godina 20. stoljeća kada je njihova prisutnost uočena u zavarenim spojevima precipitatima ojačanih legura s povećanom otpornošću na puzanje. Ovo se ponajviše odnosi na utvrđivanje prisutnosti pukotina kod cijevi parovoda izrađenih od austenitnog čelika. Prisutnost pukotina Tipa III utvrđena je i kod legura na bazi nikla dok legure 9–12 %Cr ne pokazuju sklonost pojavi ovoj vrsti pukotina. [21]

Mehanizam nastanka pukotina Tipa III povezan je s relaksacijom tj. opuštanjem naprežanja koje se javlja kod toplinske obrade žarenja za smanjenje zaostalih naprežanja ili pri visokim temperaturama u uvjetima rada, pri čemu je prijeđena vrijednost iznosa duktilnosti materijala. Faktori koji utječu na mogućnost pojave pukotina zavarenih spojeva uslijed postupka žarenja za smanjenje zaostalih naprežanja povezani su s kemijskim sastavom, postignutom mikrostrukturom nakon postupka zavarivanja i naprežanjem. Značajan utjecaj na pojavu pukotina imaju legirni elementi poput: Al, B i Mn, ali i nečistoće poput P, S, As, Sb i Sn. U grubozrnatom području zone utjecaja topline svi precipitati koji onemogućavaju rast zrna austenita otopljeni su tijekom toplinskog ciklusa postupka zavarivanja. Tijekom naknadne

toplinske obrade ili u uvjetima rada pri visokim temperaturama dolazi do smanjenja količine otopljenih precipitata u otopini osnovnog materijala, a precipitati se smještaju duž granica zrna i unutar samog zrna. Unutrašnjost zrna ojačana je fino disperziranim precipitatima, uglavnom karbonitridima, a kao rezultat takvih mikrostrukturnih promjena javljaju se područja ojačane unutrašnjosti zrna i oslabljene granice zrna. Zbog oslabljenog područja granice zrna, pukotine Tipa III javljaju se interkristalno tj. duž granica austenitnog zrna. [21]

Na slici 40. prikazana je interkristalna pukotina Tipa III u grubozrnatost zoni utjecaja topline čelika P23.



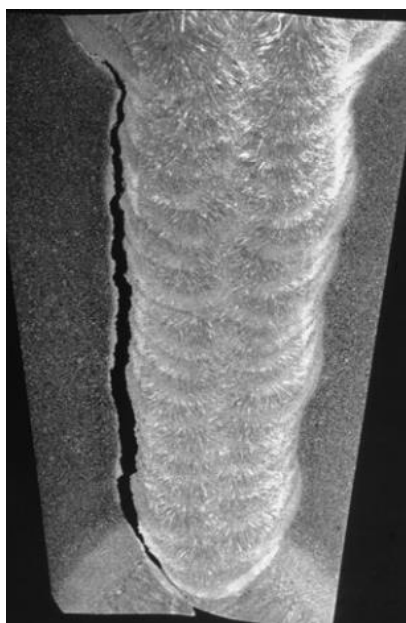
Slika 40. Interkristalna pukotina u grubozrnatost zoni utjecaja topline čelika P23 [21]

### 6.6.3. Pukotine Tipa IV

Pukotine Tipa IV definiraju se kao nastanak i propagacija pukotina u sitnozrnatom i interkritičnom području zone utjecaja topline. Stroga granica između sitnozrnatost i interkritične zone utjecaja topline nije uočljiva zbog njihovih sličnih mikrostrukturnih karakteristika. Pojava pukotina Tipa IV često se smatra mehanizmom nastanka pukotina koji uzrokuje završetak životnog vijeka trajanja zavarenih konstrukcija iz feritnih čelika otpornih na puzanje koje se koriste u industriji proizvodnje energije, stoga je ovaj mehanizam nastanka pukotina od velikog interesa brojnih istraživača. Također, pojava pukotina Tipa IV utvrđena je kod feritnih/bainitnih čelika (0,5Cr0,5Mo0,25V, 1CrMo, 1CrMoV, 1,25Cr0,5Mo, 2CrMo, P22, P23, P24) kao i kod feritnih/martenzitnih čelika (P91, X20CrMoV121, P92, P122). Lom uslijed pojave puzanja kod feritnih čelika pri visokim naprezanjima može nastati u osnovnom materijalu, metalu zavara ili

u zoni utjecaja topline, dok se pukotine Tipa IV javljaju i pri nižim vrijednostima naprezanja u sitnozrnatom i interkritičnom području zone utjecaja topline. U osnovi, pukotine Tipa IV nastaju kao razlike u mikrostrukturnim zonama koje karakteriziraju visoka otpornost na pojavu puzanja u odnosu na zone koje imaju niske vrijednosti otpornosti na puzanje, što uzrokuje složeno ponašanje materijala. [21]

Na slici 41. prikazana je pojava pukotina Tipa IV u cijevi iz niskolegiranog čelika 1Cr0,5Mo pri temperaturi rada od 540 °C i naprezanju 18 MPa nakon 200000 sati rada.



Slika 41. Pukotina Tipa IV u cijevi iz niskolegiranog čelika 1Cr0,5Mo [21]

## 7. POSTUPCI ZAVARIVANJA ČELIKA P91

Unatoč složenom kemijskom sastavu, čelik P91 ima svojstvo dobre zavarljivosti ponajviše zbog smanjenog udjela ugljika (0,08–0,12 %C) i povoljnih svojstava, korištenjem svih uobičajenih postupaka zavarivanja. Ručni elektrolučni postupak zavarivanja (REL) najčešće je primjenjivan postupak zavarivanja zbog mogućnosti korištenja kako u proizvodnom pogonu tako i na terenu. Zbog visoke produktivnosti postupak elektrolučnog zavarivanja pod zaštitnim praškom (EPP) koristi se u industrijskoj proizvodnji komponenata debelostijenih konstrukcija. Postupak zavarivanja s taljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi (MIG/MAG) primjenjuje se s punom i praškom punjenom žicom zbog jednostavnog rukovanja i visoke produktivnosti. Ručni elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi (TIG) primjenjuje se kod zavarivanja cijevi manjih promjera i kod zavarivanja korijenskog prolaza. Glavna prednost TIG zavarivanja je visoka kvaliteta zavarenog spoja i izostanak troske. Mehanizirani TIG postupak primjenjuje se kod orbitalnog zavarivanja kada između dijelova konstrukcija koje je potrebno zavariti postoji uski otvor i u industrijskoj proizvodnji komponenata debelostijenih konstrukcija. [18]

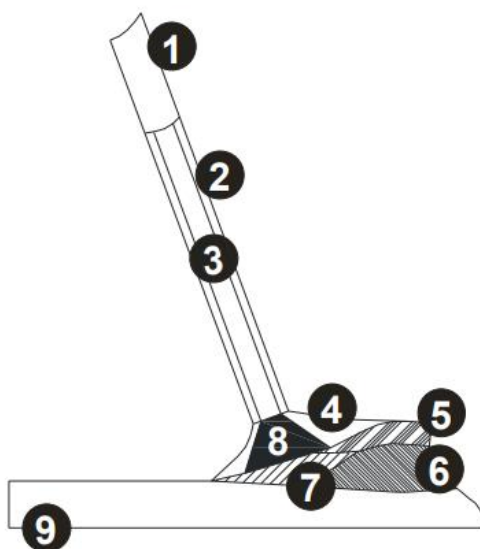
### 7.1. REL postupak zavarivanja

REL postupak zavarivanja predstavlja najranije rješenje primjene zavarivanja električnim lukom koje još i danas predstavlja jedno od najjednostavnijih, najproširenijih i najsvestranijih postupaka zavarivanja čelika i pojedinih neželjeznih metala u praksi. Najčešće se koristi obložena elektroda koju čini metalna jezgra s oblogom sastavljenom od različitih praškastih sastojaka poput: karbonata, oksida, fluorida, legiranih elemenata i dr. Takva se obloga koristi kao stabilizator električnog luka, a plinovi koji se u postupku zavarivanja oslobađaju sprječavaju pristup okolnog zraka, troske za zaštitu rastaljenog metala, a vrlo često i dijela dodatnog metala. [5]

Kod REL postupka zavarivanja električni se luk uspostavlja kratkim spojem između elektrode koja je ujedno i dodatni materijal, i radnog komada. Taljenjem elektrode, stvara se odgovarajuća količina rastaljenog materijala, troske i plinova. Tekuća troska prekriva metalnu kapljicu tijekom prolaza kapi kroz električni luk, a dodatnu zaštitu metalne kapljice tvore plinovi koji nastaju disocijacijom komponenata obloge. Obloga se tali počevši od unutarnje

strane prema vanjskoj, pa se na vrhu elektrode stvara krater koji usmjerava struju plinova i kapljice rastaljenog metala i troske prema rastaljenom osnovnom materijalu. Hlađenjem se rastaljeni metal postupno skrućuje, a sloj troske koji je izašao na površinu i prekriva zavareni spoj regulira brzinu hlađenja, a samim time utječe i na uvjete kristalizacije. Vrlo je važno postizanje ravnomjernog dodavanja elektrode u električni luk od strane zavarivača te poprečno gibanje elektrode bilo pravolinijskim kretanjem ili drugim propisanim načinom kretanja. Poprečno gibanje elektrode, okomito na smjer gibanja utječe na postignuti oblik zavarenog spoja i na brzinu zavarivanja, a sami time i na količinu unesene topline u radni komad. [22]

Na slici 42. prikazana je shema REL postupka zavarivanja.



Slika 42. Shematski prikaz REL postupka zavarivanja [22]

- 1 – obložena elektroda,
- 2 – nemetalna obloga,
- 3 – metalna žica,
- 4 – zaštitni plinovi,
- 5 – troska,
- 6 – metal zavara,
- 7 – rastaljeni materijal,
- 8 – električni luk,
- 9 – osnovni materijal.

Uspostavljanje električnog luka provodi se povlačenjem elektrode po radnom komadu (kresanjem) ili dodirrom (kratkim spojem) uz odmak elektrode od radnog komada nakon uspostavljenog električnog luka. Prekid električnog luka izvodi se podizanjem elektrode iznad kraja zavarenog spoja ili vraćanjem luka na skrutnutu trosku. Vrlo je važno pravilno uspostavljanje i prekid električnog luka jer su najčešća mjesta pojave pogrešaka kod ove vrste elektrolučnog zavarivanja mjesta izvođenja nastavka zavarenog spoja. Pravilan nastavak zavarenog spoja izvodi se uspostavljanjem električnog luka na stranici žlijeba, prije završnog kratera na prethodno položenom sloju ili ispred završnog kratera uz pomak elektrode u smjeru prethodnog spoja. Osnovni parametri REL postupka zavarivanja su [22]:

- iznos jakosti struje,
- polaritet i vrsta struje,
- brzina zavarivanja,
- nagib elektrode i dužina električnog luka,
- poprečna kretanja elektrode (njihanje).

Iznos jakosti struje zavarivanja ovisi o promjeru i vrsti elektrode, vrsti zavarenog spoja, debljini osnovnog materijala i o položaju zavarivanja. Povećanjem promjera elektrode raste i iznos jakosti struje zavarivanja zbog veće potrebne količine topline za taljenje elektrode. Najčešće vrijednosti iznosa jakosti struje kod REL postupka zavarivanja iznose približno od 30 do 40 A za svaki mm promjera elektrode, tj. od 10% do 20% manje vrijednosti struje ukoliko se radi o prisilnim položajima zavarivanja. Polaritet i vrsta struje obično se odabire prema preporukama proizvođača dodatnog materijala tj. elektroda. Kod odabira elektroda s bazičnom oblogom preporučuje se korištenje istosmjernog izvora struje za zavarivanja s elektrodom na + polu. Brzina zavarivanja odabire se prema dopuštenom iznosu topline koja se u postupku zavarivanja unosi u osnovni materijal. Visokolegirani korozijski postojani čelici zavaruju se većim brzinama kako bi unos topline bio što manji i time spriječile neželjene mikrostrukturne pojave koje kasnije mogu biti pokretači korozijskih procesa. Nagib elektrode i dužina električnog luka utječu na penetraciju zavarenog spoja. Veći nagib elektrode daje duži električni luk, što kao posljedicu ima veće zagrijavanje i lakše taljenje elektrode tj. smanjenje zagrijavanja i taljenja osnovnog materijala (manju penetraciju), manju zaštitu taline i veće gubitke materijala zbog štrcanja. Kraći električni luk ima veću snagu, a time i veći penetraciju. Dužina električnog luka kod kiselih i rutilnih elektroda najčešće je iznosa promjera elektrode, dok se kod bazičnih elektroda za dužinu električnog luka uzima vrijednost polovice promjera elektrode. Poprečna

gibanja elektrode tj. njihanje utječe na oblik zavarenog spoja i na količinu unesene topline u osnovni materijal. Odabir načina kretanja elektrode ovisi o radnim uvjetima poput položaja zavarivanja i zahtjevima zavarenog spoja. [22]

REL postupak zavarivanja ima široku primjenu kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja većine metalnih materijala. Zbog male brzine zavarivanja i relativno male količine depozita u jedinici vremena koristi se za izvođenje kraćih zavara debljina materijala do 15 mm kod sučeljenih zavarenih spojeva te kod kraćih kutnih spojeva manje debljine zavara gdje nije potrebna velika penetracija u korijenu zavara. [22]

Na slici 43. prikazan je REL postupak zavarivanja.



Slika 43. REL postupak zavarivanja [22]

Prednosti primjene REL postupka zavarivanja su [22]:

- mogućnost korištenja širokog spektra dodatnih materijala,
- niska cijena opreme za zavarivanje u odnosu na MIG/MAG i EPP postupke zavarivanja,
- prikladnost za manja proizvodna i reparaturna zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima,
- prikladnost za izvođenje radova na terenu,
- jednostavno rukovanje opremom,
- dobra mehanička svojstva zavarenih spojeva.

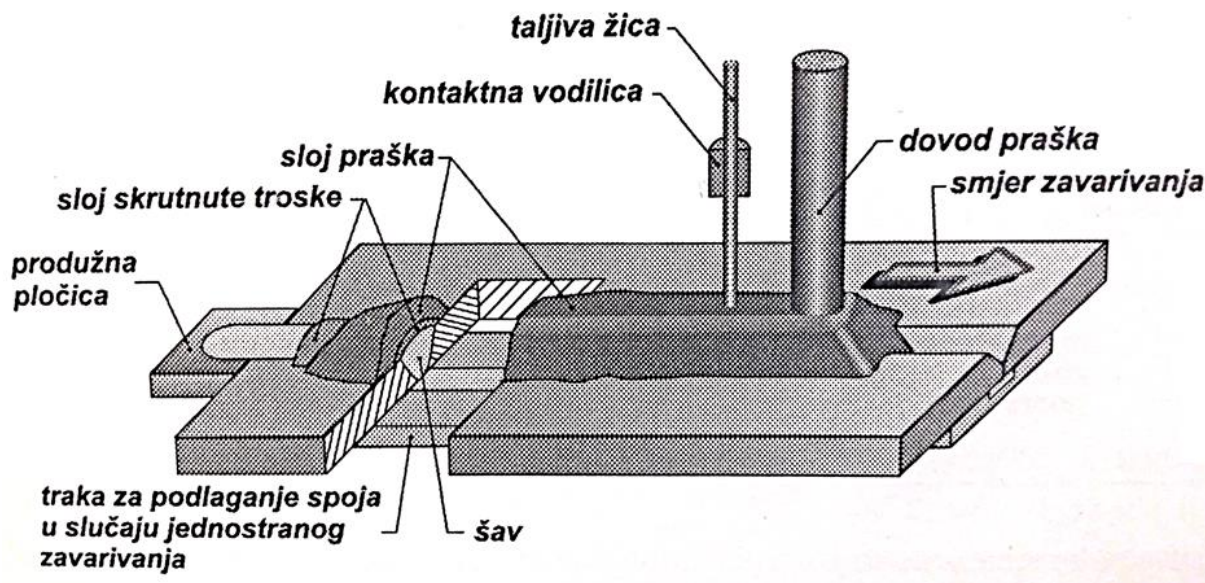
Nedostaci primjene REL postupka zavarivanja su [22]:

- male brzine zavarivanja i niska produktivnost u usporedbi s MIG/MAG i EPP postupcima zavarivanja,
- kvaliteta zavarenog spoja ovisi o vještini zavarivača,
- relativno dugo vrijeme izobrazbe zavarivača,
- neizbježan otpad elektrode,
- gubitak vremena zbog čišćenja troske,
- nastajanje štetnih plinova,
- dugotrajne štetne posljedice za zdravlje.

## 7.2. EPP postupak zavarivanja

Kod postupka elektrolučnog zavarivanja pod zaštitom praška obloga elektrode kakva se koristi kod REL postupka zavarivanja zamijenjena je zrnastim praškom koji se dovodi i nasipava tako da u potpunosti prekriva električni luk. EPP postupak zavarivanja vrlo brzo se proširio u praksi prije svega zbog čitavog niza značajnih prednosti. Električni luk stalno je prekriven i nevidljiv tijekom postupka zavarivanja čime se bitno smanjuje izravno djelovanje svjetlosnog i drugih zračenja kao i rasprskavanje čestica rastaljenog materijala i troske, uz vrlo malu prisutnost dima, što su glavni nedostaci svih postupaka zavarivanja s otkrivenim električnim lukom. Uspostavljeni električni luk potpuno je prekriven zrnastim praškom između vrha taljive metalne žice i zavarivanog metala, a rastaljeni je metal zaštićen slojem troske i ostatkom nerastaljenih čestica praška, kako je prikazano na slici 44. [5]





Slika 44. Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška [5]

Potreban iznos unesene topline postiže se regulacijom brzine zavarivanja i podešavanjem jakosti struje i napona, tj. dužine električnog luka na izvoru struje zavarivanja. Napon električnog luka, maksimalne vrijednosti do 45 V, osim što utječe na dužinu električnog luka, važan je i za dubinu penetracije, širinu i nadvišenje dobivenog zavarenog spoja. Kemijski sastav praška utječe na postignuti kemijski sastav i svojstva metala zavara, stoga se prašku dodaju i pojedini legirni elementi. Zavareni spojevi visoke su kvalitete, a postupak zavarivanja odvija se pri velikim brzinama s mogućnošću primjene kod zavarivanja sučeljenih i kutnih spojeva i navarivanja. Otuda se može zaključiti o osnovnim značajkama EPP postupka zavarivanja [5]:

- velika brzina zavarivanja i visoki koeficijent taljenja dodatnog metala,
- mogućnost automatiziranja i mehaniziranja postupka uz visoku razinu učinkovitosti proizvodnog procesa,
- uštede dodatnog materijala, posebno zaštitnog praška,
- ujednačena kvaliteta i izgled površine zavarenog spoja,
- zavarivanje debelostijenih materijala,
- nema izravnih štetnih zračenja.

Osnovni nedostatak postupka je nemogućnost zavarivanja u prisilnim položajima, zbog nemogućnosti zadržavanja zaštitnog praška na mjestu zavarivanja. Također, u tijeku postupka

zavarivanja nije moguće ocijeniti izgled i kvalitetu zavarenog spoja zbog prekrivenosti slojem troske i zaštitnim praškom. [5]

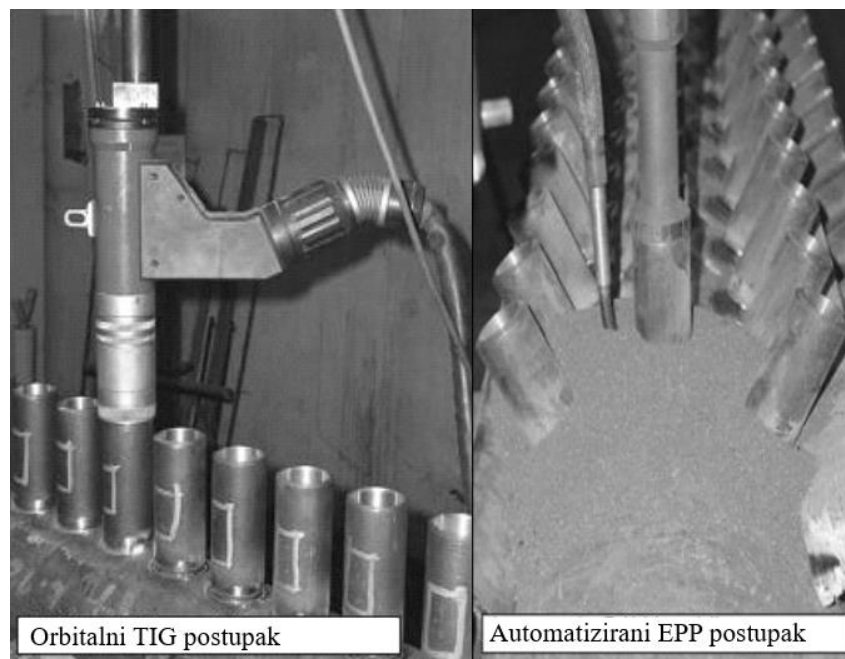
EPP postupak zavarivanja prikladan je za široki raspon debljina limova, najčešće od 4 mm do 30 mm. Međutim koristi se i u postupku zavarivanja znatno većih debljina, pa je tako moguće u jednom prolazu izvesti sučeljeni spoj debljine osnovnog materijala i do 75 mm te kutni zavar debljine 10 mm. Učinak postupka zavarivanja odgovara trenutnom taljenju dodatnog materijala, što u stvarnim pogonskim uvjetima rada pri korištenju vremena od 50% do 75 % znači ostvaren učinak od 0,12 kg/min do 0,18 kg/min rastaljenog dodatnog materijala, što je oko 2 do 5 puta više u odnosu na ručno elektro-lučno zavarivanje u vodoravnom položaju. Utrošak praška i žice približno je jednak pri čemu se za svaki 1 kg žice utroši 1 kg praška, iako se u praksi pokazao nešto veći utrošak praška, pogotovo ako se nerastaljeni prašak ne skuplja i ponovno koristi. Taljiva neobložena žica, obično vrlo dugačka i namotana na kolut koristi se sve do promjera od 12 mm, a jakost struje iznosa je do 4000 A. U postupku EPP zavarivanja može se primjenjivati izmjenična ili istosmjerna struja, pri čemu se kod istosmjerne struje žica obično spaja na + pol zavarivanja. [5]

EPP postupak zavarivanja koristi se u kombinaciji s TIG postupkom zavarivanja kod izrade brizgalica s komorom u proizvodnji parnih kotlova, kako je prikazano na slici 45. [14]

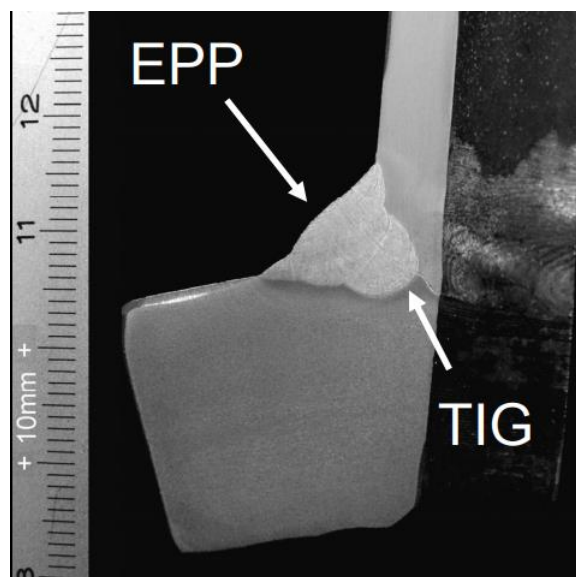


Slika 45. Brizgalica s komorom u proizvodnji parnih kotlova [14]

Automatizirano orbitalno TIG zavarivanje koristi se za korijenski prolaz, a EPP zavarivanje za prolaz popune, kako je prikazano na slici 46., pri čemu se dobiva zavareni spoj kako je prikazano na slici 47. [14]



Slika 46. Orbitalni TIG postupak i automatizirani EPP postupak zavarivanja [14]

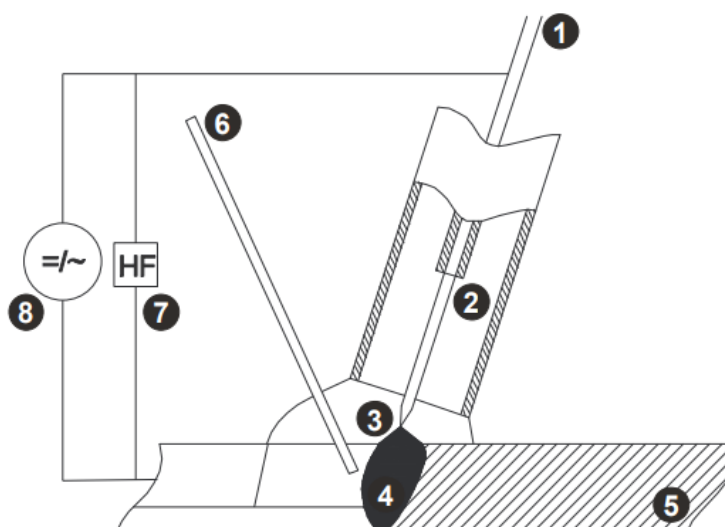


Slika 47. Zavareni spoj brizgalice s komorom u proizvodnji parnih kotlova [14]

### 7.3. TIG postupak zavarivanja

TIG postupak zavarivanja temelji se na uspostavljanju električnog luka između netaljive volframove elektrode i osnovnog metala. Zona utjecaja topline, rastaljeni osnovni materijal i volframova elektroda zaštićeni su atmosferom inertnog plina ili mješavinom inertnih plinova. Postupak TIG zavarivanja izvodi se uz korištenje dodatnog materijala ili bez njega (pretaljivanje). [23]

Na slici 48. prikazana je shema TIG postupka zavarivanja.



Slika 48. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [23]

- 1 – netaljiva elektroda,
- 2 – kontaktna vodilica,
- 3 – električni luk,
- 4 – rastaljeni materijal,
- 5 – osnovni materijal,
- 6 – dodatni materijal,
- 7 – visokofrekventni generator,
- 8 – izvor struje.

Električni luk se uspostavlja kontaktno ili pomoću visokofrekventnog generatora, sklopa koji je integriran zajedno s upravljanjem i izvorom struje za postupak zavarivanja. Kod TIG postupka zavarivanja električni se luk sastoji od tri područja: anodnog, katodnog i područja stupa električnog luka. Anodno područje (područje minus pola) i katodno područje (područje plus pola) imaju male duljine, a sastoje se od iona koji udaraju u anodu, tj. katodu te oslobađaju određenu količinu energije tj. topline. Područje električnog stupa, odnosno njegova duljina ovisi o naponu električnog luka, a najčešće je iznosa promjera netaljive elektrode. [23]

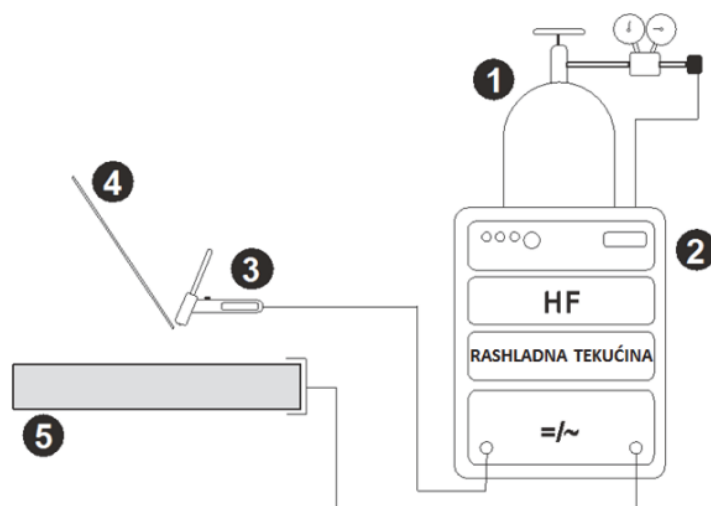
Osnovi dijelovi opreme za TIG postupak zavarivanja su [23]:

- izvor struje za zavarivanje,
- vodiči struje i plina,
- gorionik,
- sustav za hlađenje,
- sustav za dovođenje zaštitnog plina.

Izvor struje za zavarivanje kod TIG postupka zavarivanja ima strmopadajuću statičku karakteristiku, kao što je slučaj i kod REL postupka zavarivanja s obzirom da se postupak zavarivanja uglavnom izvodi ručno. Osnovne karakteristike izvora struje za zavarivanje su [23]:

- vrsta struje zavarivanja (AC/DC, impulsna),
- mogućnost visokofrekventnog paljenja luka,
- intermitencija,
- raspon struje zavarivanja,
- priključni napon,
- mogućnost upravljanja parametrima (početna i završna struja, predplin i završni plin, upravljanje impulsima, frekvencijom, balansom).

Na slici 49. prikazana je shema standardne opreme TIG postupka zavarivanja.



Slika 49. Shema standardne opreme TIG postupka zavarivanja [23]

- 1 – zaštitni plin,
- 2 – izvor struje za zavarivanje,
- 3 – gorionik,
- 4 – dodatni materijal,
- 5 – osnovni materijal.

Specifične potrebe TIG postupka zavarivanja zahtijevaju gorionike različitih karakteristika (veličina, dužina kape, oblike, fleksibilnosti itd.) koje uvelike koriste prilikom posebnih zahtjeva konstrukcije. Važan dio gorionika predstavlja vanjska sapnica koja direktno utječe na svojstva zaštite metala zavara, ali i netaljive elektrode. Vanjske sapnice najčešće se izrađuju od keramičkih materijala koje mogu izdržati visoke temperature, ali su dostupne i prozirne sapnice kada je potrebna vidljivost zavarenog spoja. Gorionici mogu biti hlađeni zrakom za manje struje zavarivanja i vodom u zatvorenom sustavu za visoke iznose struja zavarivanja. [23]

Netaljiva elektroda se koristi za uspostavu električnog luka između gorionika i radnog komada, a njezino trošenje u postupku zavarivanja rezultat je toplinskih opterećenja ili mehaničkih oštećenja. Geometrija elektrode oblikuje se brušenjem, a prosječni vijek trajanja elektrode dužine 200 mm iznosi 30 sati. Izrađuju se iz volframa, metala visoke gustoće i visokog iznosa temperature tališta od 3422 °C. Postupnim razvojem TIG postupka zavarivanja

i izvora struje za zavarivanje postavljani su i sve veći zahtjevi u pogledu uspostave i održavanja stabilnosti električnog luka, stoga se danas upotrebljavaju elektrode koje nisu iz čistog volframa, već se legiraju kako bi se poboljšale njihove radne karakteristike. [23]

U tablici 10. prikazana je usporedba karakteristika pojedinih vrsta elektroda u TIG postupku zavarivanja.

Tablica 10. Usporedba karakteristika pojedinih vrsta elektroda u TIG postupku zavarivanja [23]

Vrsta elektrode	Oznaka (boja)	Primjena i karakteristike
W	ZELENA	dobra stabilnost el. luka kod AC zavarivanja, otporna na onečišćenja, niža cijena
dodatak oksida 1,8-2,2 % CeO <sub>2</sub>	SIVA	karakteristike slične kao i kod elektroda s torijevim oksidom, laka uspostava el. luka, duži vijek trajanja
dodatak oksida 1,7-2,2 % ThO <sub>2</sub>	CRVENA ŽUTA LJUBIČASTA NARANČASTA	laka uspostava el. luka, veća stabilnost el. luka, podnosi veće opterećenje, duži vijek trajanja, otežana stabilnost el. luka kod oblog oblikovanja na AC strujama
dodatak oksida 1,3-1,7 % La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZLATNA CRNA PLAVA	vrlo slične karakteristike kao kod elektroda s torijevim oksidom
dodatak oksida 0,15-0,40 % ZrO <sub>2</sub>	SMEĐA	izvrsne karakteristike kod AC zavarivanja i zaobljenog vrha elektrode, visoka otpornost na onečišćenja, laka uspostava el. luka, prikladno korištenje kod zahtjeva gdje nije dozvoljena prisutnost volframa u zavaru

Elektrode se proizvode u različitim dimenzijama promjera od 0,5, 1,0, 1,6, 2,4, 3,2, 4,8, 6,4 do 8,0 mm, duljine najčešće 150 mm. Korišteni promjer volframove elektrode kao i debljina i vrsta osnovnog materijala određuju potrebnu jakost struje. [5,23]

U tablici 11. prikazani su rasponi jakosti struje u ovisnosti o vrsti struje zavarivanja i promjeru elektrode.

Tablica 11. Orijentacijske vrijednosti jakosti struje TIG postupka zavarivanja [5]

Promjer elektrode, mm	Raspon jakosti struje zavarivanja, A		
	Izmjenična struja	Elektroda (-)	Elektroda (+)
1,0	30 – 60	50 – 75	–
1,6	30 – 100	50 – 150	10 – 20
2,4	50 – 175	125 – 275	20 – 35
3,2	75 – 200	200 – 375	25 – 50
4,8	125 – 300	250 – 475	30 – 75
6,4	175 – 400	300 – 550	40 – 125

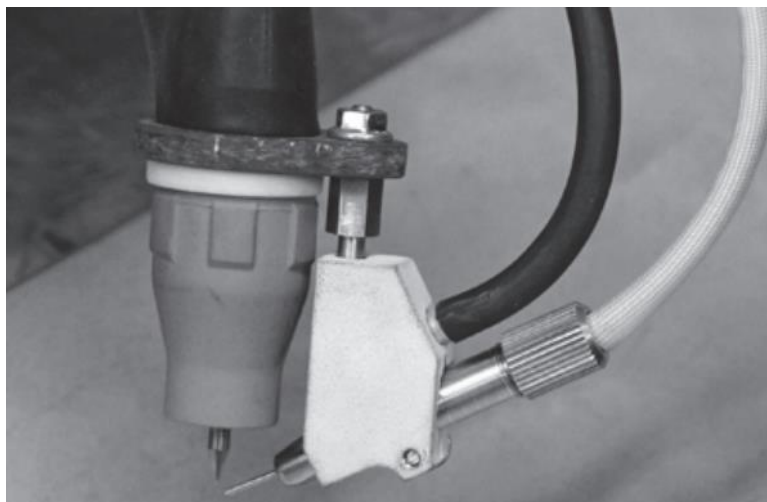
Osim pravilnog odabira elektrode za danu primjenu, jednako je važna i priprema elektrode. Priprema se sastoji od brušenja elektrode kako bi se dobio zaobljeni ili šiljasti vrh. Geometrijom netaljive elektrode u postupku zavarivanja direktno se utječe na geometriju električnog luka. Zaobljeni vrh elektrode koristi se u postupku zavarivanja Al, Mg i njihovih legura. Ostali materijali zahtijevaju šiljastu geometriju vrha elektrode, oblika stošca. Pravilnom tehnologijom brušenja elektrode mogu se izbjeći nestabilnosti luka ili kontaminacija drugim metalima. [23]

Postupak TIG zavarivanja moguće je provoditi bez ili uz korištenje dodatnog materijala. Zavarivanje bez dodatnog materijala naziva se pretaljivanje. Kod potrebe za TIG postupkom zavarivanja uz dodatak dodatnog materijala, dodatni se materijal dodaje ručno u obliku šipki različitih promjera i duljine od oko 915 mm (36 in), a kod automatiziranog dodavanja dodatni se materijal mehanizirano dovodi u rastaljeni osnovni materijal u hladnom („cold wire“) ili predgrijanom stanju („hot wire“). Osnovna prednost automatiziranog dovođenja dodatnog



materijala kod TIG postupka zavarivanja je znatno povećanje produktivnosti procesa uz veću količinu depozita čime se umanjuje najveći nedostatak ovog postupka zavarivanja. [23]

Na slici 50. prikazan je TIG postupak zavarivanja s automatiziranim dodavanjem žice u predgrijanom stanju.

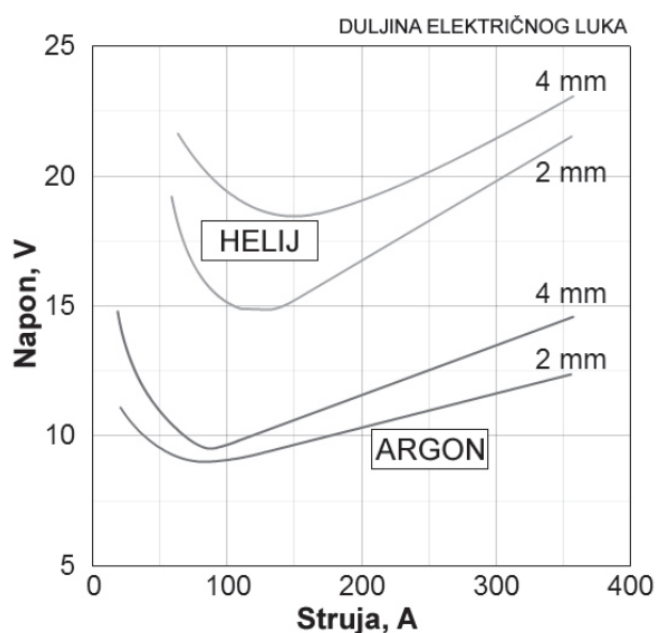


Slika 50. TIG postupak zavarivanja s automatiziranim dodavanjem žice [23]

Glavni nosilac ionizacije kod TIG postupka zavarivanja je zaštitni plin o kojem ovisi i uspostava električnog luka. Najčešće korišteni zaštitni plinovi u primjeni TIG postupka zavarivanja su plemeniti plinovi argon i helij. Oba plina su inertna, a zaštitna atmosfera koju tvore ne izaziva kemijske reakcije u postupku zavarivanja između zaštitnog plina i osnovnog materijala. Osim primarnog cilja korištenja zaštitnog plina, zaštite rastaljenog metala od atmosferskih utjecaja, zaštitni plin direktno utječe na stabilnost i kvalitetu zavarenog spoja, geometrijske karakteristike, estetski izgled zavarenog spoja i na količinu para koje se oslobađaju u procesu zavarivanja. [23]

Argon je najjeftiniji inertni plin korišten u TIG postupku zavarivanja, ima niski ionizacijski potencijal tj. energiju koja je potrebna za uzimanje jednog elektrona atoma plina da ga pretvori u ion, u iznosu od 15,7 eV čime je znatno olakšana uspostava i stabilnost električnog luka. U odnosu na zrak, argon je 1,4 puta lakši od zraka pa ga izlaskom iz sapnice potiskuje i dobro štiti rastaljeni metal, a navedeno svojstvo doprinosi i potrebi za manjim protokom argona tijekom postupka zavarivanja. U odnosu na helij, argon ima nižu toplinsku vodljivost što daje kompaktniji električni luk i manju penetraciju i protaljivanje. [23]

Helij ima viši ionizacijski potencijal u iznosu od 24,5 eV čime je otežana uspostava električnog luka. Ima deset puta manju masu u odnosu na argon što zahtijeva i do tri puta veći protok helija u odnosu na protok argona. Helij ima vrlo dobru toplinsku vodljivost čime se dobiva širi električni luk. Toplina iz električnog luka brže se prenosi na radni komad, ostvaruje se veća penetracija i unos topline (napon električnog luka s helijem kao zaštitnim plinom znatno je veći u odnosu na napon luka kod argona pri istom iznosu jakosti struje, kako je prikazano na slici 51.) što posebno dolazi do izražaja kod zavarivanja materijala velike toplinske vodljivosti, poput bakra. [23]



Slika 51. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG postupka zavarivanja [23]

Osim primjene čistog inertnog plina argona ili helija, česta je upotreba i njihovih mješavina u različitim omjerima. Mješavinom plinova argona i helija postižu se kombinacije povoljnih svojstava argona odnosno helija, kako je prikazano u tablici 12. [23]

Tablica 12. Usporedba karakteristika zavarivanja primjenom zaštitnih plinova Ar i He [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 el. luka	laka	bolja nego kod 100 % He	otežana
Stabilnost el. luka	dobra	bolja nego kod 100 % He	niža kod manjih struja
Oblik el. luka	uži, fokusiran	uži nego kod 100 % He	širi
Napon el. luka	manji	srednja	veći
Protok	manji	veći nego kod 100 % Ar	povećan
Cijena	niža	veća nego kod 100 % Ar	veća nego 100 % Ar

Osim kombinacija inertnih plinova argona i helija, moguće je dodavanje manjeg postotka drugih plinova u mješavine poput vodika i dušika. Vodik ima vrlo dobru toplinsku vodljivost i povećava penetraciju. Mješavine s dušikom uglavnom se upotrebljavaju kod zavarivanja materijala s austenitnom mikrostrukturom. [23]

Prednosti primjene TIG postupka zavarivanja su [23]:

- koncentriranost električnog luka, smanjena zona utjecaja topline,
- bez troske i prskanja,
- minimalna količina štetnih plinova,
- zavarivanje širokog spektra različitih metala i legura,
- mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima,
- mogućnost zavarivanja tankih materijala,
- odličan izgled zavarenog spoja.

Nedostaci primjene TIG postupka zavarivanja su [23]:

- mala brzina zavarivanja,
- mala količina depozita dodatnog materijala,
- potrebna precizna priprema zavarenog spoja,
- neekonomičnost kod zavarivanja debljih materijala,
- viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova,
- zahtjevnost izvođenja ručnog postupka zavarivanja,
- dugotrajna izobrazba zavarivača,
- pojačana svjetlost i UV zračenje.

### ***7.3.1. Vrsta struje i polariteta elektrode TIG postupka zavarivanja***

Raspodjela topline u električnom luku, tj. raspodjela topline između netaljive elektrode i radnog komada ovisi o primijenjenoj vrsti struje u postupku zavarivanja i polaritetu elektrode. Moguća su tri različita slučaja primijenjene vrste struje i polariteta elektrode [23]:

- primjena istosmjerne struje s elektrodom na – polu (DCEN),
- primjena istosmjerne struje s elektrodom na + polu (DCEP),
- primjena izmjenične struje (AC).

Karakteristike TIG postupka zavarivanja u ovisnosti o vrsti struje zavarivanja i polaritetu prikazane su u tablici 13.

Tablica 13. Karakteristike TIG postupka zavarivanja u ovisnosti o vrsti struje zavarivanja i polaritetu elektrode [23]

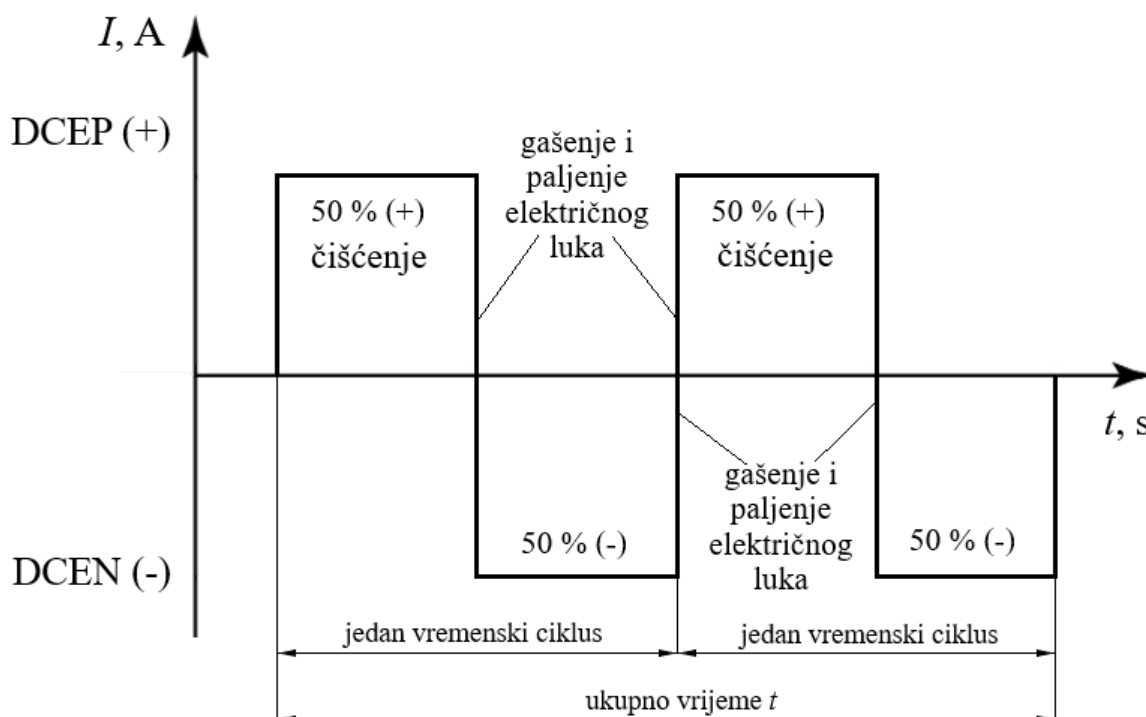
Vrsta struje	DC	DC	AC
Polaritet	-	+	~
Shematski prikaz			
Čišćenje oksida	NE	DA	DA (pola ciklusa, tj. na + dijelu ciklusa)
Raspodjela topline	1/3 na elektrodi 2/3 na materijalu	2/3 na elektrodi 1/3 na materijalu	1/2 na elektrodi 1/2 na materijalu
Penetracija	uska, duboka	plitka, široka	srednje široka srednje duboka
Kapacitet elektrode	odličan npr. Ø3,2/400 A	loš npr. Ø6,4/120 A	dobar npr. Ø3,2/255 A

TIG postupak zavarivanja istosmjernom strujom s elektrodom na negativnom polu najčešći je postupak TIG zavarivanja. Naziva se i DCEN (eng. *Direct Current Electrode Negative*). Kada je netaljiva elektroda spojena na negativni pol istosmjerne struje, elektroni se kreću s negativne elektrode na pozitivni osnovni materijal pri čemu dolazi do ubrzavanja elektrona kroz električni luk, a pozitivni elektroni imaju suprotan smjer. Količina kinetičke energije elektrona pri tome je znatno veća od kinetičke energije iona pa dolazi do većeg zagrijavanja radnog komada, a manjeg zagrijavanja vrha elektrode, kako je prikazano u tablici 13. Zbog takve raspodjele topline ovaj način TIG postupka zavarivanja omogućava rad s manjim promjerima elektroda pri većim iznosima struje zavarivanja, a vrh elektrode može biti zašiljen, čime se postiže stabilnost električnog luka i dobra penetracija. [23]

Kod TIG postupka zavarivanja istosmjernom strujom s elektrodom na pozitivnom polu, elektroni se kreću od negativnog radnog komada na pozitivnu elektrodu. Naziva se i DCEP (eng. *Direct Current Electrode Positive*). Zbog gibanja elektrona od negativnog radnog komada na pozitivnu elektrodu raspodjela topline je drugačija pri čemu dolazi do velikog toplinskog opterećenja elektrode, pa je ovaj način zavarivanja moguć kod manjih struja zavarivanja uz primjenu elektroda većeg promjera. Penetracija je manja, dolazi do zaobljenja elektrode što može rezultirati nestabilnošću električnog luka. Ipak, kod elektrode na pozitivnom polu, smjer pozitivnih iona s elektrode na radni komad razara tanke površinske okside osnovnog materijala što omogućava zavarivanje aluminija, magnezija i njihovih legura. [23]

TIG postupak zavarivanja izmjeničnom strujom (TIG AC) objedinjuje karakteristike primjene TIG postupka zavarivanja istosmjernom strujom s elektrodom na negativnom i pozitivnom polu. Izmjenična struja AC (eng. *Alternating Current*) je vrsta električne struje kod koje dolazi do promjene smjera toka elektrona u jedinici vremena, tj. unutar jednog vremenskog ciklusa. Primjenom izmjenične struje postiže se dobro čišćenje oksida s površine materijala, a toplinsko opterećenje približno je jednakog iznosa na elektrodi i radnom komadu. Zbog mijenjanja pravca kretanja čestica, tj. promjene polariteta na elektrodi i radnom komadu, dolazi do paljenja i gašenja električnog luka i njegove nestabilnosti. [23]

Na slici 52. prikazan je valni oblik izmjenične struje pravokutnog oblika. Vrijeme elektrode tj. radnog komada provedeno na pozitivnom tj. negativnom polu jednako je i iznosi pola vremena jednog ciklusa.



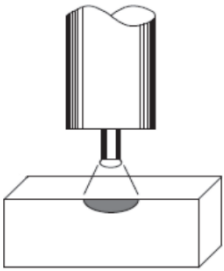
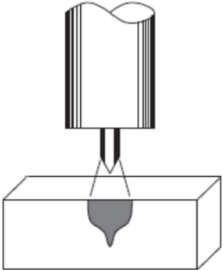
Slika 52. Valni oblik izmjenične struje pravokutnog oblika kod TIG postupka zavarivanja

[23]

Kod TIG AC postupka zavarivanja promjenom frekvencije izmjenične struje i njezinim balansom može se utjecati na geometriju zavarenog spoja, čišćenje oksida, ali i toplinsko opterećenje radnog komada i elektrode. Frekvencija izmjenične struje govori o broju ciklusa u vremenu, dok balans izmjenične struje predstavlja vrijeme unutar ciklusa tijekom kojeg je elektroda na pozitivnom tj. na negativnom polu. [23]

U tablici 14. prikazani su utjecaji parametara frekvencije i balansa zavarivanja na zavareni spoj i netaljivu elektrodu.

Tablica 14. Utjecaji parametara frekvencije i balansa zavarivanja na zavareni spoj i netaljivu elektrodu [23]

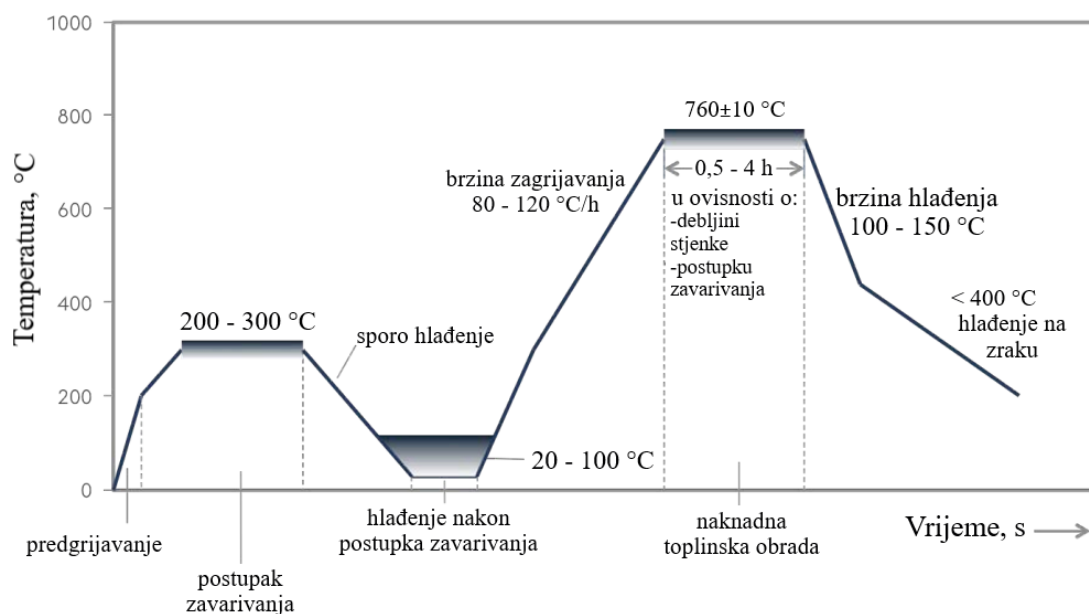
<b>Izgled elektrode</b>	zaobljena	šiljasta
<b>Shematski prikaz</b>		
<b>Kontrola balansa izmjenične struje</b>	više vremena elektrode na + polu, veće čišćenje	više vremena elektrode na - polu, manje čišćenje
<b>Kontrola frekvencije izmjenične struje</b>	manja frekvencija, mekši luk, manja penetracija	veća fekvencija, usmjereniji luk, dublja penetracija
<b>Nezavisna kontrola jakosti struje</b>	veća struja u EP području, manja penetracija	veća struja u EN području, dublja penetracija, veća brzina zavarivanja



## 8. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu provedeno je ispitivanje utjecaja parametara AC TIG zavarivanja na geometriju i svojstva zavarenih spojeva cijevnih komponenti izrađenih od čelika P91. Ispitivanje je provedeno na različitim razinama balansa polariteta i područjima frekvencija mehaniziranim TIG postupkom zavarivanja izmjeničnom strujom (TIG AC). Kako bi se usporedile karakteristike primjene TIG postupka zavarivanja korištenjem izmjenične struje i postupak zavarivanja čelika P91 koji se najčešće provodi u praksi, korištenjem istosmjerne struje s elektrodom na negativnom polu, jedan ispitni uzorak nazvan referentnim uzorkom zavarivan je korištenjem istosmjerne struje s elektrodom na negativnom polu. Nakon postupka zavarivanja, iz cijevi čelika P91 na kojima se provodio postupak navarivanja, izrezana su 4 ispitna uzorka s ukupno 10 ispitnih zavara na kojima su nakon postupka brušenja, poliranja i nagrizanja provedena metalografska ispitivanja i mjerenje tvrdoće.

Kako je navedeno u teorijskom dijelu rada, martenzitni čelici se ubrajaju u teže zavarljive čelike, pod čime se podrazumijeva zahtjev za provođenjem predgrijavanja osnovnog materijala prije postupka zavarivanja na određenu temperaturu, održavanje međuprolazne temperature između svakog prolaza i naknadna toplinska obrada nakon postupka zavarivanja. Cjelokupni proces postupka zavarivanja čelika P91 prikazan je na slici 53.



Slika 53. Cjelokupni proces postupka zavarivanja čelika P91 [18]

Iz slike 53. vidljivo je da hlađenje nakon postupka zavarivanja i naknadna toplinska obrada imaju najveći udio u vremenu cjelokupnog procesa postupka zavarivanja čelika P91. Toplinska obrada sastoji se od postupnog ugrijavanja peći i radnog komada definiranom brzinom zagrijavanja kako bi se postiglo postupno ugrijavanje po poprečnom presjeku i izbjegla pojava toplinskih naprezanja. Po postizanju definirane temperature toplinske obrade, radni komad je potrebno držati na zadanoj temperaturi u trajanju od 30 minuta do 4 sata što ovisi o debljini materijala i postupku zavarivanja. Hlađenje radnog komada u peći, poput ugrijavanja provodi se definiranom brzinom hlađenja, kako bi se radni komad ravnomjerno hladio po poprečnom presjeku i ponovno izbjegla pojava toplinskih naprezanja i mogućnost pojave loma. Cjelokupni toplinski ciklus u postupku zavarivanja čelika P91 koji uključuje predgrijavanje, održavanje međuprolazne temperature i naknadnu toplinsku obradu značajno povećava vrijeme trajanja izrade i cijenu komponente. Svrha provođenja eksperimentalnog dijela rada je utvrditi mogu li se primjenom različitih vrijednosti parametara balansa polariteta i frekvencije izmjenične struje postići povoljna mikrostrukturalna svojstva i tvrdoća zavarenog spoja kakva se postižu nakon provedene toplinske obrade, ali da se u postupku zavarivanja ne provodi predgrijavanje, održavanje međuprolazne temperature i naknadna toplinska obrada, već da se unos topline osigurava parametrima procesa zavarivanja izmjeničnom strujom, tj., balansom i frekvencijom izmjenične struje. Postizanjem povoljnih svojstava mikrostrukture i tvrdoće nakon postupka zavarivanja značajno bi se skratilo vrijeme izrade komponenata iz čelika P91, ali i postigle značajne uštede novčanih sredstava.

## 8.1. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten u eksperimentalnom dijelu rada je visokolegirani martenzitni čelik P91 za rad pri visokim temperaturama od 585 °C do 625 °C. Naziv T/P91 dodijeljen je prema američkom standardu ASTM/ASME, dok je u Europi, čelik P91 poznat prema oznaci X10CrMoVNb9–1 u skladu s europskim standardom EN 10216–2. Najveću primjenu ima u izgradnji i reparaturi komponenata korištenih u termoenergetskim postrojenjima poput parnih kotlova, za cijevi pregrijača pare. Osnovni materijal korišten u postupku zavarivanja su cijevi čelika P91 dimenzija  $\text{Ø}60,3 \times 8,7$  mm. Duljina pretaljivanja ispitnih uzoraka iznosila je 100 mm. Za postupak zavarivanja, cijevi čelika P91 nisu pripremane rezanjem na manje radne komade već se postupak zavarivanja provodio na cijevima duljina kakve se koriste za izradu

komponentata u energetske postrojenjima. Na taj način uvjeti provođenja eksperimenta približeni su realnim uvjetima provođenja postupka zavarivanja za izradu komponentata u proizvodnim pogonima. Time se najviše utječe na brzinu hlađenja radnog komada, koja ovisi o dimenzijama i debljini stijenke radnog komada. Konstrukcije većih dimenzija i debljina stijenki brže odvedu toplinu unesenu tijekom postupka zavarivanja. Brzina hlađenja utječe na postignutu mikrostrukturu i svojstva zavarenog spoja, pri čemu preveliki iznos brzine hlađenja može rezultirati zakaljenjem materijala, pojavom zaostalih naprezanja i pukotina. Stoga je važno uvjete eksperimenta približiti stvarnim uvjetima provođenja postupka zavarivanja.

Na slici 54. prikazane su cijevi osnovnog materijala čelika P91 korištene u postupku zavarivanja.



Slika 54. Cijevi čelika P91 korištene u postupku zavarivanja

Kemijski sastav i mehanička svojstva osnovnog materijala korištenog u postupku zavarivanja prikazani su u tablicama 15. i 16.

Tablica 15. Kemijski sastav osnovnog materijala [13]

Oznaka čelika	Sadržaj kemijskih elemenata, %												
		C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Nb	N	Al	Ni	P	S
P91	min.	0,08	0,30	0,20	8,00	0,85	0,18	0,06	0,03	-	-	-	-
	maks.	0,12	0,60	0,50	9,50	1,05	0,25	0,10	0,07	0,04	0,40	0,02	0,01

Tablica 16. Mehanička svojstva osnovnog materijala [13]

Oznaka čelika	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ , N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća $R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	Istezljivost $A_5$ , %	Tvrdoća, HB
P91	min. 415	min. 585	maks. 20	250

## 8.2. Zaštitni plin i netaljiva elektroda

Postupak zavarivanja provodio se bez dodatnog materijala, tj. provodilo se pretaljivanje osnovnog materijala. Korišteni plin u postupku zavarivanja je zaštitni plin trgovačkog naziva *Argon 4,8* proizvođača *Messer*, oznake I1 prema normi HRN EN ISO 14175:2008. Brojčana oznaka u trgovačkom nazivu plina označava čistoću plina, gdje prvi broj označava broj desetki postotka čistoće, a drugi broj posljednju znamenku decimale. *Argon 4,8* je stoga 99,998 % čist plin. Koristi se kao zaštitni plin u postupku zavarivanja visokolegiranih čelika, aluminijskih i aluminijevih legura. Protok plina u postupku zavarivanja iznosio je 9 l/min. Karakteristike argona kao zaštitnog plina u postupku zavarivanja detaljnije su opisane u teorijskom dijelu rada. [24]

Na slici 55. prikazana je boca zaštitnog plina korištena u postupku zavarivanja.



Slika 55. Boca zaštitnog plina Argon 4,8

Netaljiva volframova elektroda korištena u postupku zavarivanja označava se kao zelena volframova elektroda. Sadrži 99,50 % volframa što je čini elektrodom s najvećim udjelom volframa u kemijskom sastavu. Zbog većeg udjela volframa u kemijskom sastavu uglavnom je jeftinija u odnosu na legirane volframove elektrode. Ova vrsta elektroda koristi se u postupku TIG zavarivanja izmjeničnom strujom, posebice aluminija, magnezija i njihovih legura. Vrh elektrode se u postupku zavarivanja zaobli, tj. tvori kuglicu, čime se utječe na stabilnost električnog luka. Elektroda od čistog volframa ne koristi se na istosmjernoj struji zavarivanja zbog otežanog uspostavljanja električnog luka, stoga je preporučljivo koristiti volframove elektrode legirane kemijskim elementima torijem ili cerijem. Promjer zelene volframove elektrode korištene u postupku zavarivanja iznosi  $\varnothing 3,2$  mm. [25]

### 8.3. Oprema za zavarivanje

Uređaj za TIG postupak zavarivanja korišten u postupku pretaljivanja cijevi čelika P91 je uređaj *Welbee WB-A350P* proizvođača *Daihen Varstroj*, prikazan na slici 56.



Slika 56. Uređaj za zavarivanje *Welbee WB-A350P* [26]

Uređaj karakterizira mogućnost korištenja REL i TIG postupaka zavarivanja na istosmjernoj i izmjeničnoj struji. Također, TIG postupak zavarivanja moguće je izvoditi uz istovremenu primjenu izmjenične i istosmjerne struje. Raspon jakosti struja omogućava zavarivanje tankih i debelih materijala. [26]

Specifikacije uređaja za zavarivanje *Welbee WB-A350P* prikazane su u tablici 17.

Tablica 17. Specifikacije uređaja za zavarivanje *Welbee WB-A350P* [26]

Specifikacije uređaja za zavarivanje	
Uređaj	Welbee WB-A350P
Priključni napon	460 V $\pm$ 10 %, 3-fazni
Nazivna frekvencija	50/60 Hz
Nazivna ulazna snaga (AC TIG)	12,9 kVA (11,9 kW)
Nazivna ulazna struja (AC TIG)	16,2 A
Raspon izlazne struje (AC TIG)	5 A - 350 A
Nazivni napon opterećenja (AC/DC TIG)	24 V
Nazivna ulazna snaga (DC TIG)	12,5 kVA (11,0 kW)
Nazivna ulazna struja (DC TIG)	16,3 A

Raspon izlazne struje (DC TIG)	2 A - 350A
Intermitencija	40 % 350 A
	60 % 300 A
	100 % 270 A
Raspon frekvencije izmjenične struje (AC TIG)	30 Hz - 500 Hz
Raspon balansa polariteta (AC TIG)	od -20 % do +20 %
Stupanj zaštite	IP23
Masa	68 kg
Dimenzije	395x710x640 mm

Među najvažnijim karakteristikama uređaja za zavarivanje čiji se utjecaj na svojstva zavarenog spoja eksperimentalnim dijelom želio ispitati su frekvencija izmjenične struje i raspon balansa polariteta izmjenične struje. Iznos frekvencije izmjenične struje utječe na penetraciju i usmjerenost električnog luka; pri nižim iznosima frekvencije izmjenične struje, manji je broj gašenja i paljenja električnog luka (manji je broj ciklusa promjene od pozitivnog do negativnog pola struje u vremenu) pa iznos struje zavarivanja ostaje duže vremena kako na pozitivnom tako i na negativnom polu što rezultira širim električnim lukom i manjom penetracijom. Pri višim iznosima frekvencije izmjenične struje, veći je broj gašenja i paljenja električnog luka (veći je broj ciklusa promjene od pozitivnog do negativnog pola struje u vremenu) pa iznos struje zavarivanja ostaje kraće vremena kako na pozitivnom tako i na negativnom polu što rezultira užim i usmjerenijim električnim lukom i većom penetracijom.

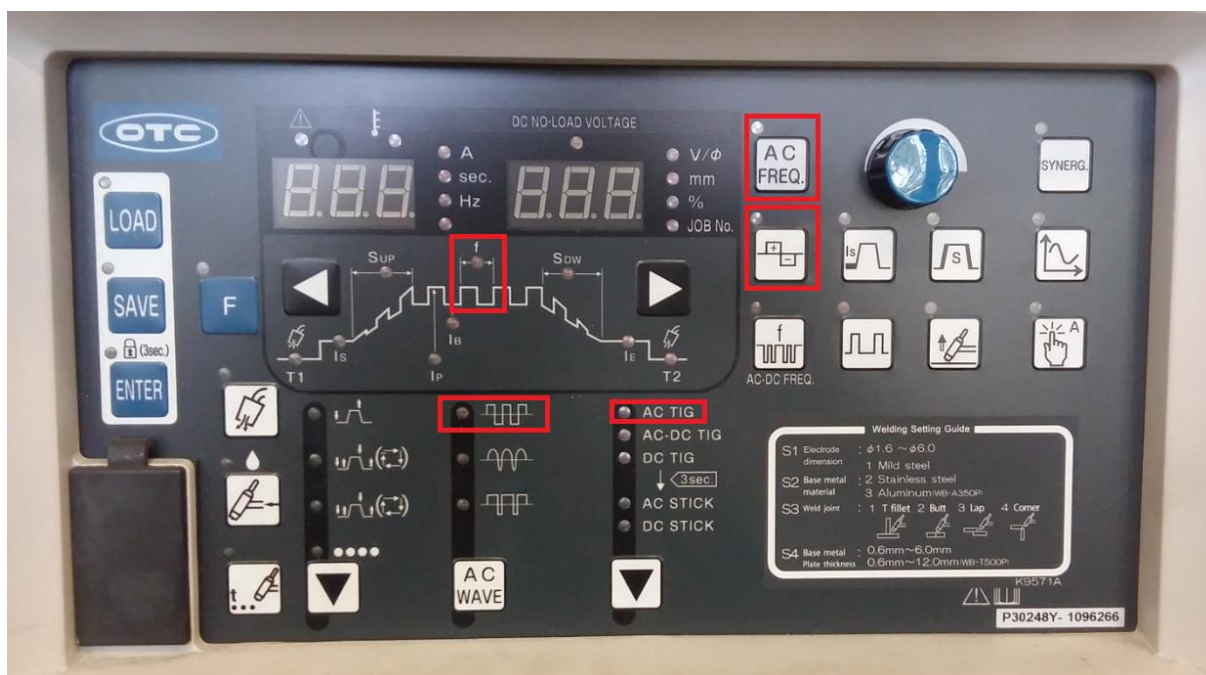
Regulacijom balansa polariteta izmjenične struje utječe se na vrijeme koje elektroda provede na pozitivnom tj. na negativnom polu struje tijekom jednog ciklusa promjene od pozitivnog do negativnog pola. Kao rezultat promjene balansa izmjenične struje utječe se na iznos čišćenja zavarenog spoja od oksida i penetraciju. Kod izmjenične struje, čišćenje oksida postiže se kada je struja na pozitivnom polu. Na uređaju za zavarivanje moguće je regulirati čišćenje oksida u rasponu od -20 % do +20 %. pri čemu je čišćenje najviše izraženo pri iznosu balansa polariteta od +20 %. Veća penetracija postiže se kod dužeg zadržavanja elektrode na negativnom polu izmjenične struje.

Iz navedenog se može zaključiti da je za zavarivanje debljih materijala potreban manji iznos AC frekvencije i viši iznos AC balansa na negativnom polu; čime se dobiva širi električni



luk s više penetracije, dok je za tanje materijale potreban viši iznos AC frekvencije i viši iznos AC balansa na pozitivnom polu; čime se dobiva uži električni luk i manje penetracije.

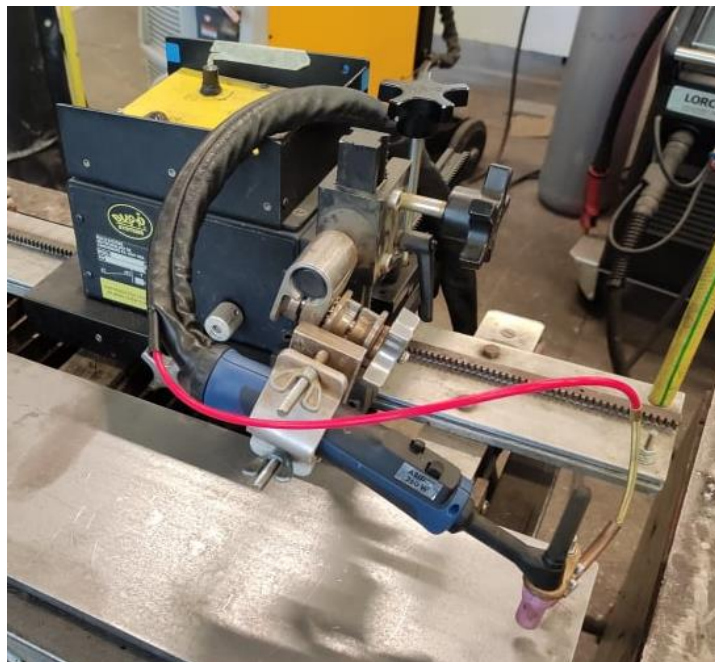
Na slici 57. prikazano je sučelje uređaja za zavarivanje *Welbee WB-A350P* s postavkama koje su korištene u postupku zavarivanja.



Slika 57. Sučelje uređaja za zavarivanje *Welbee WB-A350P*

Kako bi se tijekom postupka zavarivanja ispitnih uzoraka osigurao konstantan iznos brzine zavarivanja, točnost i preciznost te uklonili utjecaji koje zavarivač može imati na kvalitetu zavarenog spoja i ponovljivost, TIG postupak zavarivanja automatiziran je korištenjem sustava *Bug-O Systems*, kako je prikazano na slici 58. Pištolj za TIG zavarivanje pričvršćen je na sustav za automatsko upravljanje pomoću kojega je osigurana putanja kretanja, brzina zavarivanja u iznosu od 8 cm/min, duljina pretaljivanja u iznosu od 100 mm i udaljenost netaljive elektrode od radnog komada u iznosu od 4 mm.





Slika 58. Bug-O sustav za automatizirani postupak zavarivanja

#### 8.4. Postupak pretaljivanja uzoraka čelika P91

Kako je prethodno navedeno uzorci čelika P91 zavarivani su bez dodatnog materijala (pretaljivanje) automatiziranim TIG postupkom zavarivanja korištenjem izmjenične struje. Tijekom postupka zavarivanja parametri koji su bili konstantnog iznosa su:

- zavarivanje korištenjem izmjenične struje (TIG AC),
- pravokutni valni oblik balansa polariteta pod nazivom *Standard*,
- brzina zavarivanja u iznosu 8 cm/min,
- udaljenost elektrode od radnog komada u iznosu 4 mm,
- visokofrekventno paljenje električnog luka,
- dužina zavarenog spoja u iznosu 100 mm,
- zaštitni plin *Argon 4,8* protoka u iznosu 9 l/min,
- vrijeme trajanja pred i post protoka zaštitnog plina 2 s,
- promjer elektrode  $\text{Ø}3,2$  mm,
- položaj zavarivanja PA.

Prije izvođenja postupka zavarivanja cijevi čelika P91 pripremljene su brušenjem i očišćene od masti i nečistoća. Pripremljene cijevi postavljene su u položaj za zavarivanje kako je prikazano na slici 59.



Slika 59. Položaj pištolja i cijevi čelika P91 u postupku zavarivanja

Iznosi parametara TIG postupka zavarivanja referentnog uzorka istosmjernom strujom prikazani su u tablici 18.

Tablica 18. Iznosi parametara postupka zavarivanja istosmjernom strujom

PARAMETRI POSTUPKA ZAVARIVANJA				
Uzorak	Vrsta struje	Polaritet	Struja, A	Napon, V
R1	Istosmjerna	(-)	150	12,3 - 13

Iznosi parametara TIG postupka zavarivanja izmjeničnom strujom prikazani su u tablici 19.

Tablica 19. Parametri postupka zavarivanja izmjeničnom strujom

PARAMETRI PRIJE ZAVARIVANJA				PARAMETRI TIJEKOM ZAVARIVANJA	
Uzorak	Frekvencija, Hz	Balans polariteta, %	Struja, A	Napon, V	Struja, A
1	30	-20	150	13,9 - 14,9	150

2	30	0	150	19 - 23	150
3	30	20	150	15 - 17	150
4	265	-20	150	16,1 - 17,3	150
5	265	0	150	21 - 25	≈146
6	265	20	150	19 - 24	≈147
7	500	-20	150	19 - 24	≈146
8	500	0	150	21 - 25	141 - 142
9	500	20	150	20 - 23	141 - 142

Frekvencija i balans polariteta izmjenične struje su parametri zavarivanja čiji se utjecaj na svojstva zavarenog spoja eksperimentalnim dijelom rada želi istražiti, stoga su iznosi frekvencije i balansa polariteta korišteni u različitim rasponima, od 30 Hz do 500 Hz iznosi frekvencije i od -20 % do +20 % balans polariteta, u skladu s karakteristikama uređaja za zavarivanje. Struja zavarivanja svakog ispitnog uzorka iznosila je 150 A.

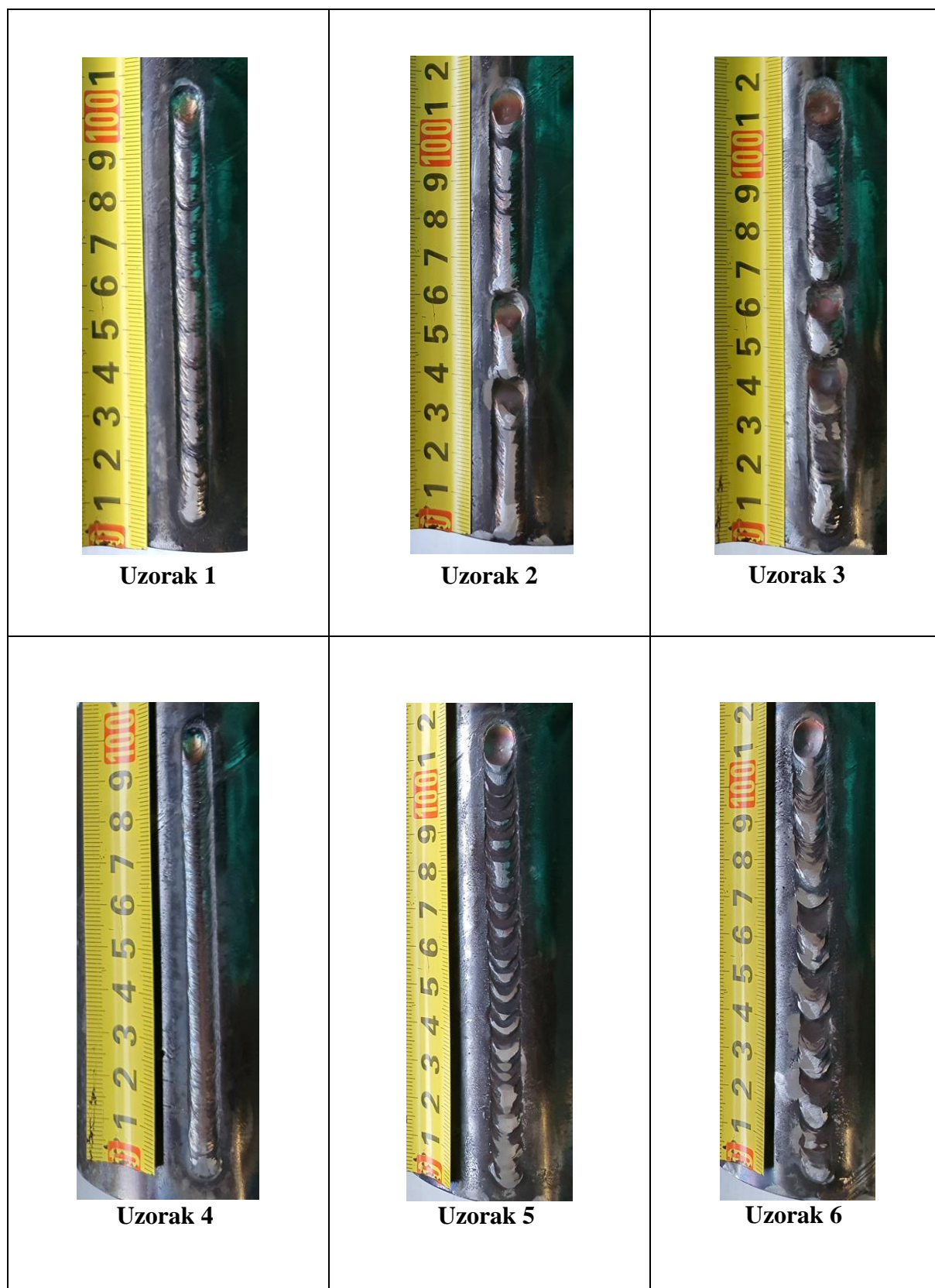
Primjenom parametara zavarivanja navedenih u tablici 18. dobiven je referentni ispitni uzorak R1 prikazan na slici 60.



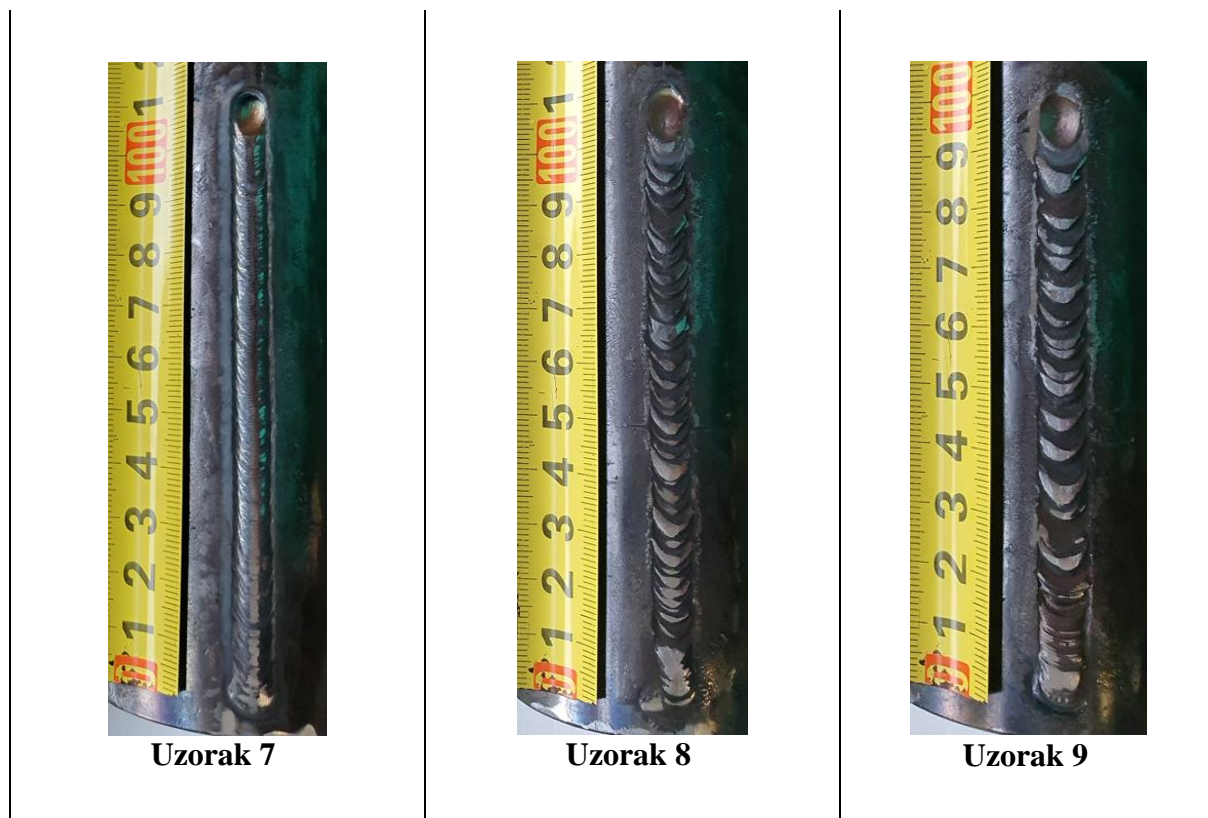
Slika 60. Referentni uzorak R1 pretaljivan istosmjernom strujom

Primjenom parametara zavarivanja navedenih u tablici 19. dobiveni su ispitni uzorci prikazani u tablici 20.

Tablica 20. Ispitni uzorci nakon pretaljivanja izmjeničnom strujom







Vizualnom metodom moguće je procijeniti utjecaj pojedinih parametara na izgled zavarenog spoja nakon postupka pretaljivanja uzoraka čelika P91. Postupak pretaljivanja referentnog uzorka R1 istosmjernom strujom protekao je stabilno, bez skokova napona i jakosti struje.

Uzorci kod kojih je balans polariteta bio  $-20\%$  (uzorci 1, 4 i 7), tj. veći udio vremena zadržavanja struje na negativnom polu izmjenične struje pokazuju najveću stabilnost luka bez gašenja i ponovne uspostave električnog luka. Promjenom balansa polariteta uz jednako vrijeme zadržavanja struje na pozitivnom i negativnom polu pretaljivanje uzorka 2 proteklo je relativno stabilno, dok je kod pretaljivanja uzorka 5 došlo do pregrijavanja i zaobljenja vrha elektrode. Tijekom pretaljivanja uzorka 8 došlo je do pregrijavanja sapnice, gašenja električnog luka i nekoliko skokova napona i struje zavarivanja. Promjenom balansa polariteta na  $+20\%$  (uzorci 3, 6 i 9), tj. veći udio vremena zadržavanja struje na pozitivnom polu izmjenične struje postupak pretaljivanja uzorka 3 prošao je relativno stabilno, dok je s povećanjem frekvencije kod uzorka 6 i 9 utvrđeno nekoliko skokova iznosa napona i struje zavarivanja. Estetski najbolji izgled zavara i stabilnost električnog luka postignuti su primjenom balansa polariteta u iznosu od  $-20\%$ . Kada se usporedi izgled zavarenog spoja referentnog uzorka R1 i uzorka

zavarenih na izmjeničnoj struji, upravo primjena balansa polariteta u iznosu od -20 % najviše odgovara postupku zavarivanja na istosmjernoj struji s elektrodom na negativnom polu.

Na temelju parametara postupka zavarivanja moguće je izračunati iznos unesene topline prema izrazu [27]:

$$E = \frac{60 \cdot I \cdot U}{1000 \cdot v} \cdot \eta \quad (7)$$

$E$  – iznos unosa toplinske energije, kJ/mm,

$I$  – jakost struje zavarivanja, A,

$U$  – napon električnog luka, V,

$\eta$  – koeficijent iskoristivosti električnog luka (prema normi HRN EN ISO 1011-1:2009, koeficijent iskoristivosti električnog luka za TIG postupak zavarivanja iznosi  $\eta = 0,6$ ),

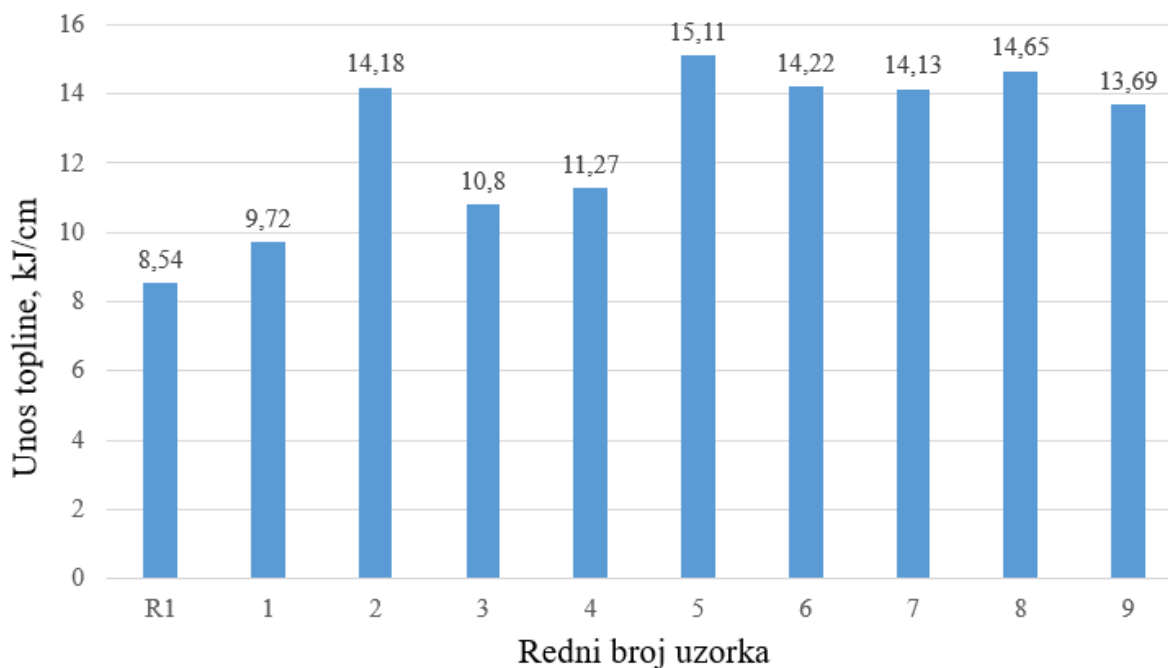
$v$  – brzina zavarivanja, mm/min.

Vrijednosti parametara postupka zavarivanja i iznosi unesene topline tijekom postupka zavarivanja prikazani su u tablici 21.

Tablica 21. Vrijednosti iznosa unosa topline tijekom postupka zavarivanja pojedinih uzoraka

Broj uzorka	Brzina zavarivanja, mm/min	Srednja vrijednost napona, V	Srednja vrijednost struje, A	Unos topline, kJ/mm	Unos topline, kJ/cm
R1	80	12,65	150	0,854	8,54
1	80	14,4	150	0,972	9,72
2	80	21	150	1,418	14,18
3	80	16	150	1,08	10,8
4	80	16,7	150	1,127	11,27
5	80	23	146	1,511	15,11
6	80	21,5	147	1,422	14,22
7	80	21,5	146	1,413	14,13
8	80	23	141,5	1,465	14,65
9	80	21,5	141,5	1,369	13,69

Grafički prikaz iznosa unosa topline svakog pojedinog uzorka prikazan je na slici 61.

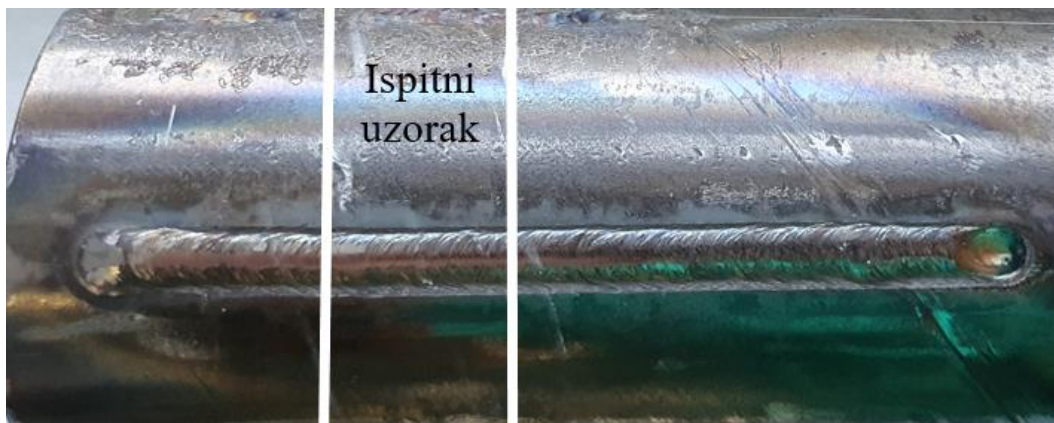


Slika 61. Grafički prikaz iznosa unosa topline pojedinog uzorka

Iz dijagrama na slici 61. može se zaključiti da je najmanji iznos unosa topline zabilježen tijekom postupka zavarivanja referentnog uzorka R1 uz primjenu istosmjerne struje. Kod preostalih uzoraka zavarivanih uz primjenu izmjenične struje, najveći iznosi unesene topline zabilježeni su kod primjene balansa polariteta „0 %“, tj. kod jednakog vremena zadržavanja elektrode na pozitivnom i negativnom polu izmjenične struje. Također, promatrajući uzorke koji su tijekom postupka pretaljivanja imali isti iznos frekvencije (uzorci 1, 2, 3; uzorci 4, 5, 6; uzorci 7, 8, i 9) može se uočiti da za isti iznos frekvencije, najmanji unos topline imaju uzorci pretaljivani na balansu polariteta -20 %, tj. kod dužeg zadržavanja elektrode na negativnom polaritetu izmjenične struje, osim pri frekvenciji od 500 Hz, gdje je slučaj da je najmanji unos topline kod balansa polariteta +20 %.

## 8.5. Izrada ispitnih uzoraka

Nakon postupka pretaljivanja uzoraka uslijedila je izrada makroizbrusaka za daljnje metalografsko ispitivanje. Ispitni su uzorci iz pretaljivanih cijevi izrezani postupkom piljenja na tračnoj pili kako je prikazano na slici 62.



Slika 62. Izrada ispitnih uzoraka

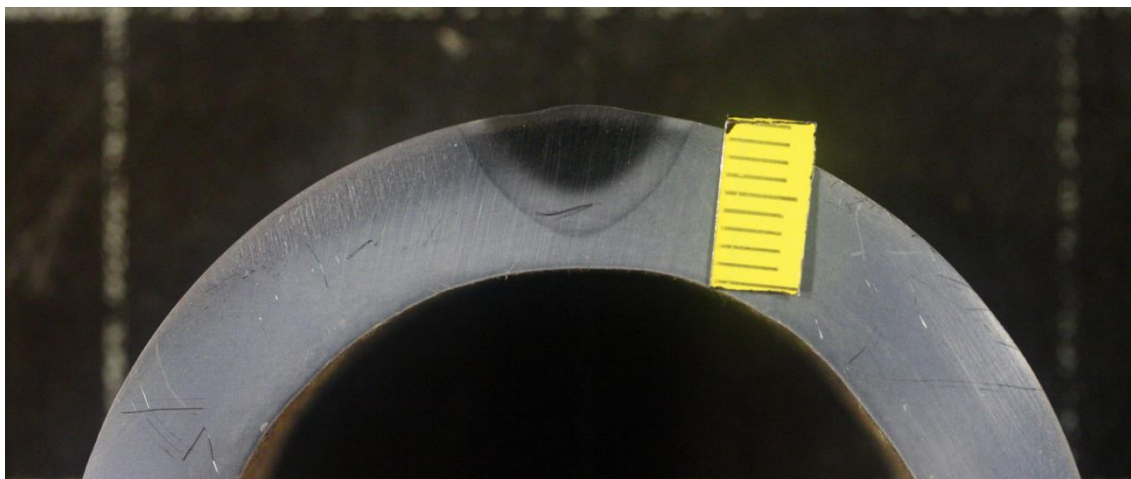
Nakon postupka piljenja, ispitni su uzorci ručno brušeni korištenjem brusnih papira zrnatosti P80, P100, P180 i P240. Izrađeni makroizbrusci dodatno su strojno brušeni na uređaju *Minitech 233* proizvođača *Presi*, korištenjem brusnih papira granulacija P320, P600, P1000, P2400 i P4000. Kao sredstvo za podmazivanje korištena je voda, a brzina vrtnje u postupku brušenja iznosila je 300 okretaja u minuti. Nakon strojnog brušenja ispitnih uzoraka uslijedilo je poliranje korištenjem uređaja *DAP-V* proizvođača *Struers*. Postupak poliranja proveden je u dva koraka pri brzini vrtnje u iznosu od 150 okretaja u minuti. U prvom koraku uzorci su polirani korištenjem tkanine za poliranje uz primjenu lubrikanta za podmazivanje i dijamantne paste granulacije 3  $\mu\text{m}$ . U drugom koraku uzorci su polirani korištenjem tkanine za poliranje uz primjenu tekućine za podmazivanje koja ima funkciju dijamantne paste i lubrikanta granulacije 0,03  $\mu\text{m}$ .

Po završetku poliranja ispitnih uzoraka, uslijedilo je elektrokemijsko nagrizanje. Elektrokemijsko nagrizanje provedeno je korištenjem 10 %-tne oksalne kiseline u trajanju od 3 minute pri struji od 2 A i naponu u iznosu od 5 V.

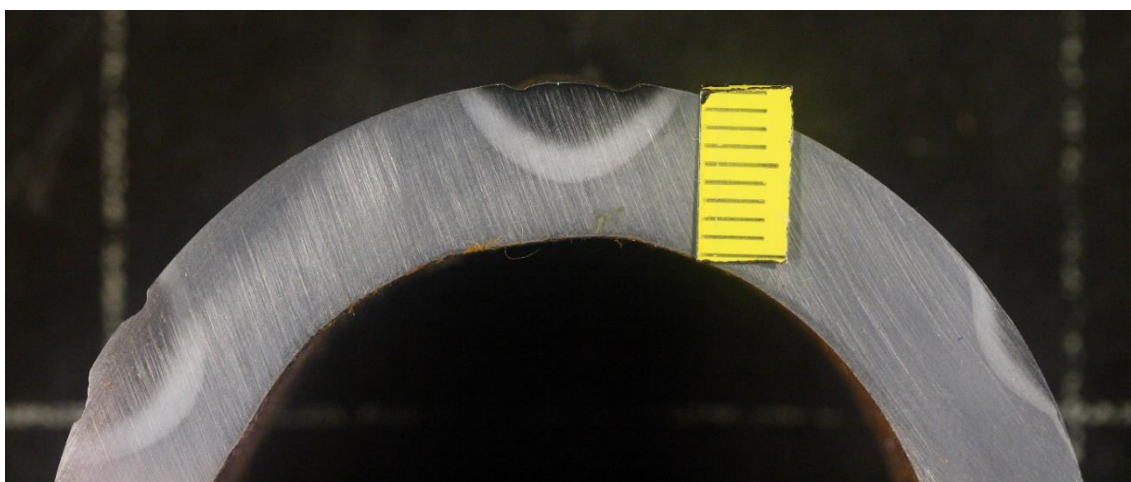


## 8.6. Analiza makrostrukture

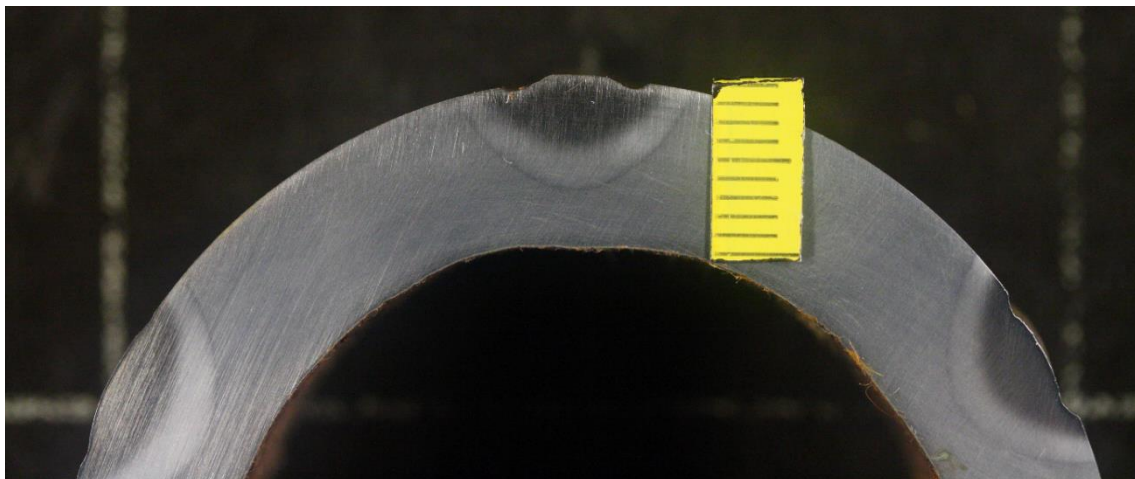
Nakon postupka brušenja, poliranja i elektrokemijskog nagrivanja, na pretaljenim uzorcima vidljive su karakteristične zone zavarenog spoja: zona taljenja, zona utjecaja topline i zona nepromijenjenog osnovnog materijala. Površine pripremljene za analizu makrostrukture prikazane su na slikama 63. do 72.



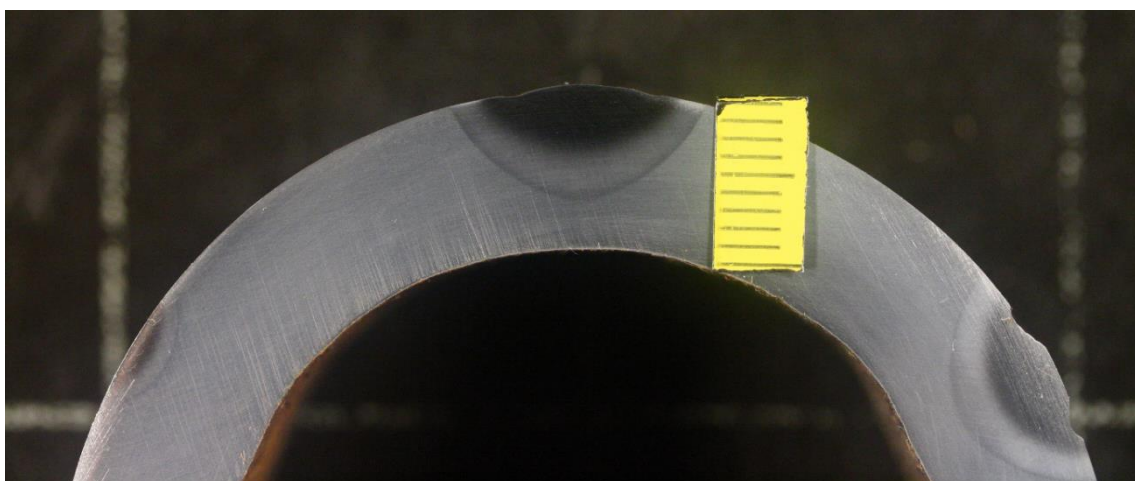
Slika 63. Makroizbrusak referentnog uzorka R1



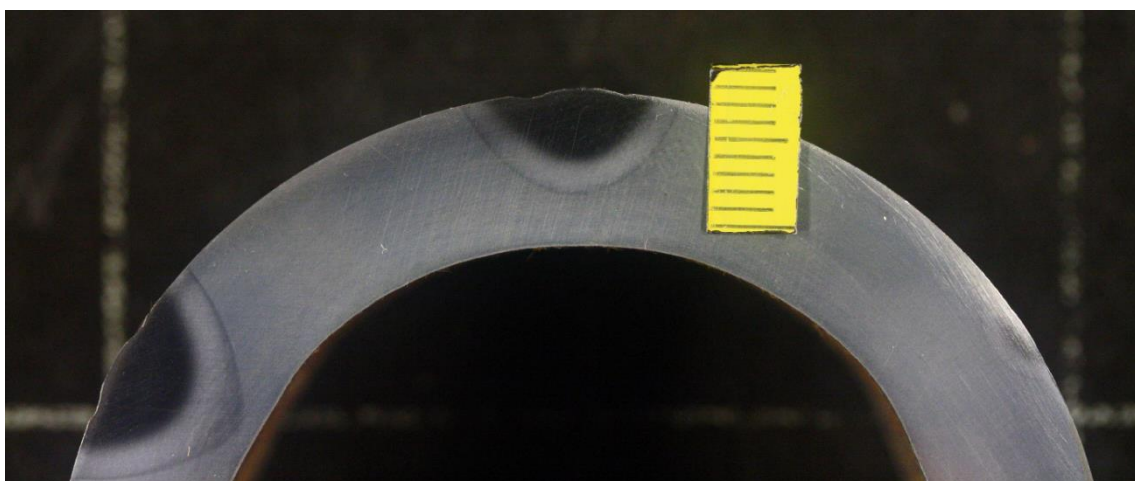
Slika 64. Makroizbrusak uzorka 1



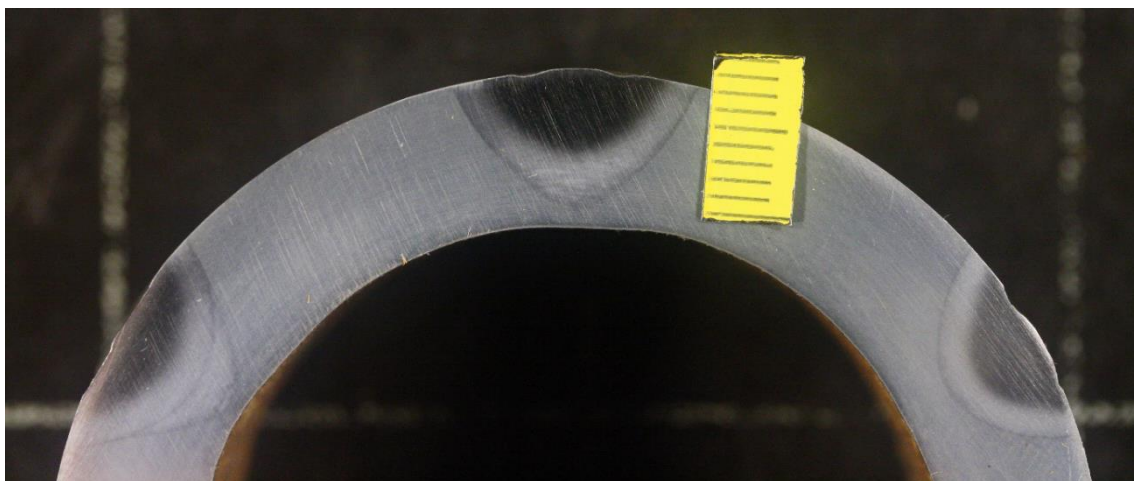
Slika 65. Makroizbrusak uzorka 2



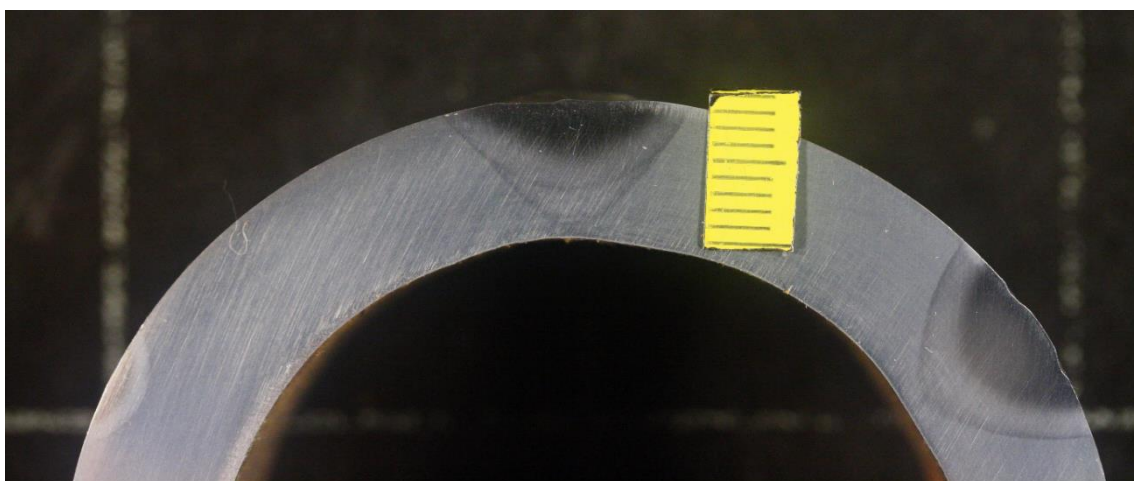
Slika 66. Makroizbrusak uzorka 3



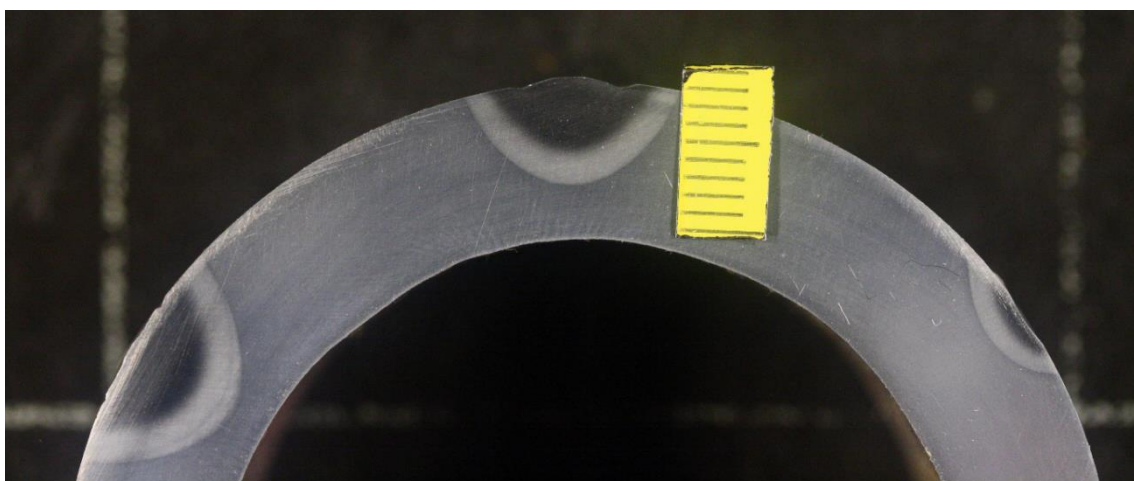
Slika 67. Makroizbrusak uzorka 4



Slika 68. Makroizbrusak uzorka 5

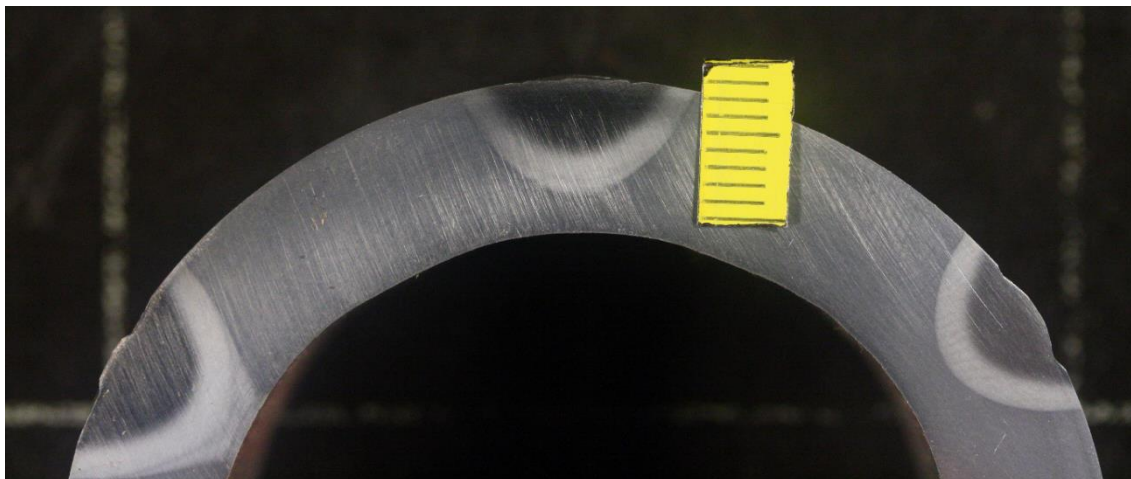


Slika 69. Makroizbrusak uzorka 6

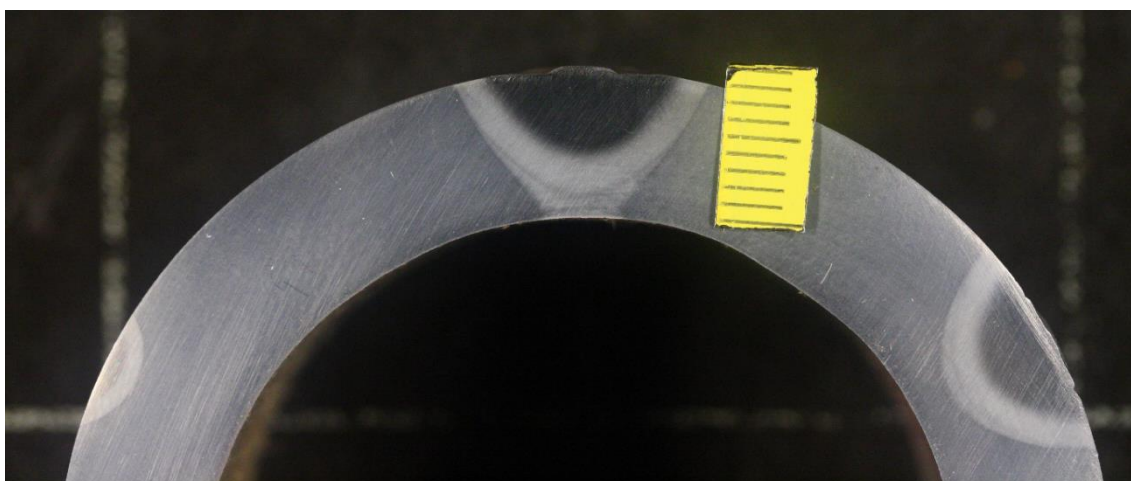


Slika 70. Makroizbrusak uzorka 7





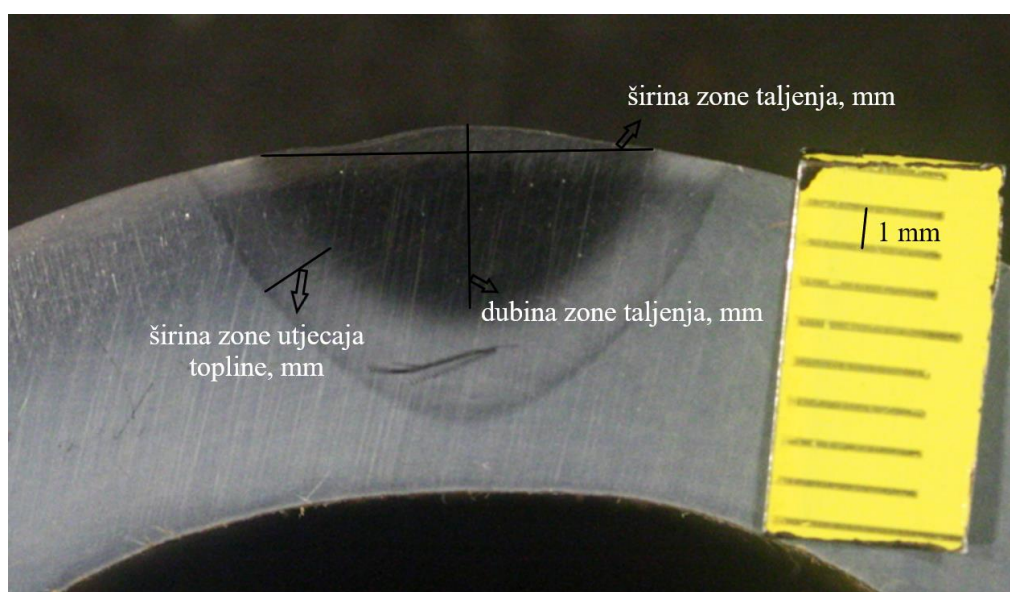
Slika 71. Makroizbrusak uzorka 8



Slika 72. Makroizbrusak uzorka 9

Primjena različitih parametara postupka zavarivanja na različit je način utjecala na ostvareni izgled i geometriju zavarenog spoja. Kako bi se поближе saznao utjecaj promjenjivih parametara, frekvencije i balansa izmjenične struje na geometriju zavarenog spoja, provedena je analiza geometrije pretaljenih uzoraka. Analizom geometrije svakog ispitnog uzorka izmjerene su; širina zone taljenja, dubina zone taljenja i širina zone utjecaja topline. Mjerenje je provedeno u računalnom programu *ImageJ*. Program *ImageJ* pretvara izmjerene piksele u odabrane mjerne jedinice. Na početku mjerenja potrebno je odabrati mjernu skalu i duljinu koju ta mjerna skala predstavlja naredbom *Set Scale*. U postupku mjerenja mjerna skala iznosila je 1 mm, a odabrana je pomoću žute mjerne skale vidljive na svakoj od slika 63. do 72. s ispitnim uzorcima. Jednom odabrana mjerna skala u programu *Image J* omogućava mjerenje duljine

korištenjem naredbe *Measure*. Na slici 73. prikazane su veličine mjerene u postupku analize geometrije pretaljenih uzoraka.



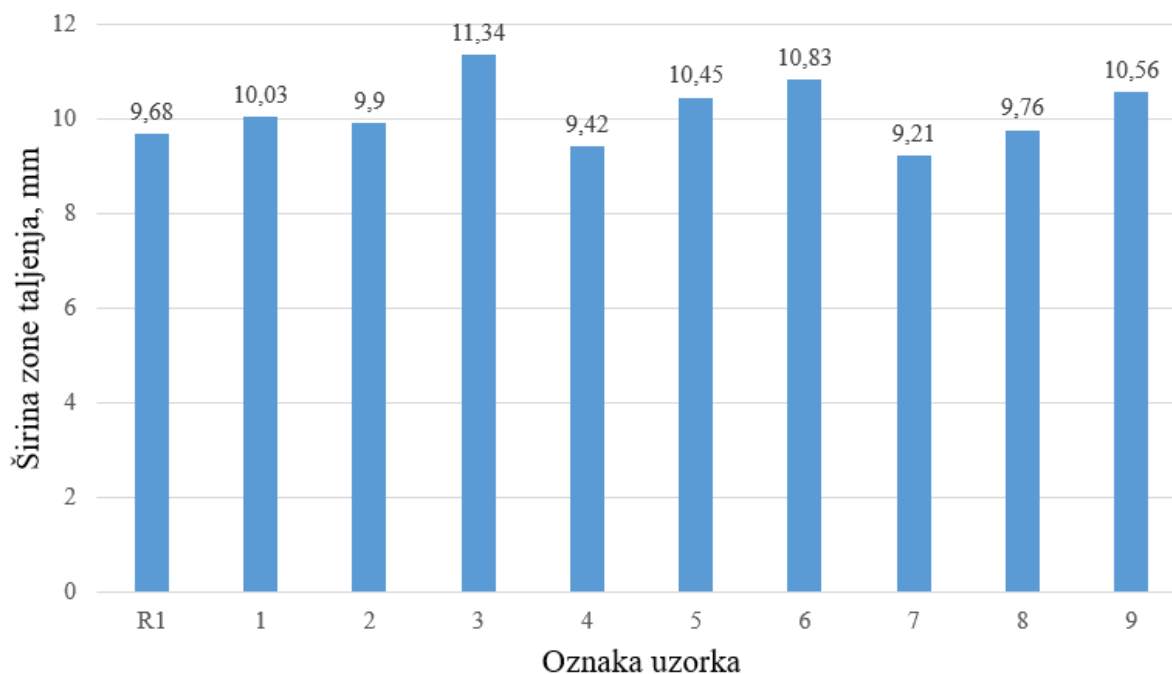
Slika 73. Mjerene veličine u postupku analize geometrije referentnog uzorka R1

Rezultati izmjerenih vrijednosti širine zone taljenja, dubine zone taljenja i širine zone utjecaja topline prikazani su u tablici 22.

Tablica 22. Rezultati mjerenja geometrije pretaljenih uzoraka

Balans polariteta, %	Oznaka uzorka	Širina zone taljenja, mm	Dubina zone taljenja, mm	Širina ZUT-a, mm	Frekvencija, Hz
/	R1	9,68	4,69	1,98	/
-20	1	10,03	3,94	1,88	30 Hz
0	2	9,90	3,80	1,97	
+20	3	11,34	3,85	2,00	
-20	4	9,42	4,21	1,88	265 Hz
0	5	10,45	4,77	2,14	
+20	6	10,83	3,38	2,21	
-20	7	9,21	4,02	1,89	500 Hz
0	8	9,76	4,58	2,30	
+20	9	10,56	4,92	2,25	

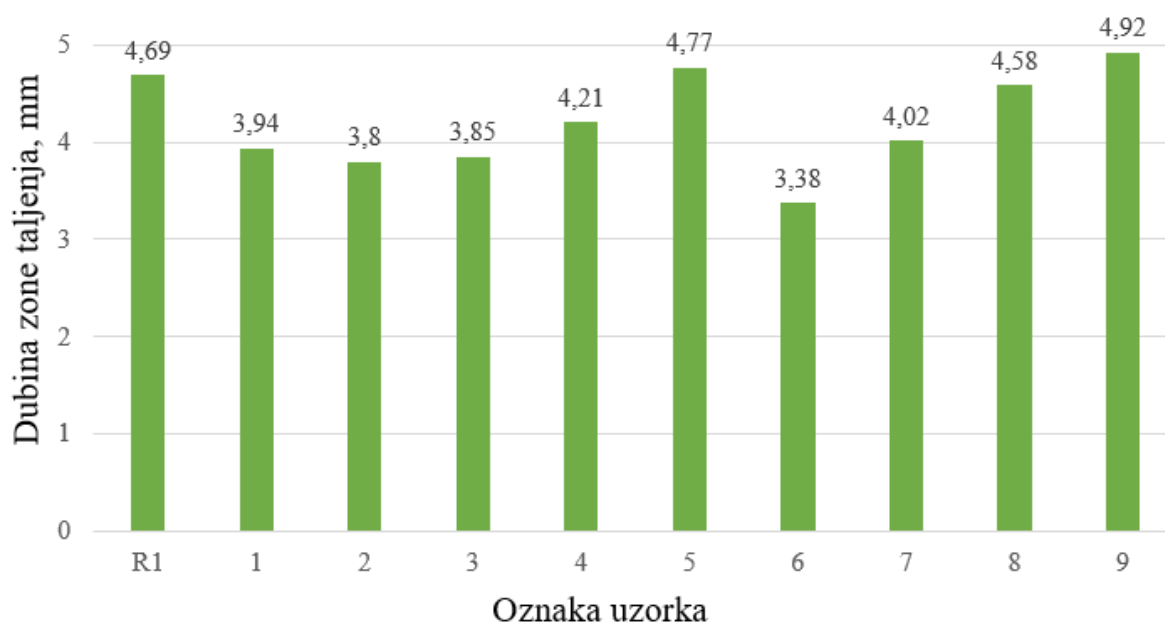
Grafički prikaz širine zone taljenja svakog pojedinog uzorka prikazan je na slici 74.



Slika 74. Grafički prikaz širine zone taljenja pojedinih ispitnih uzoraka

Promatrajući iznose mjerenja širine zone taljenja uočljivo je da je najveća vrijednost širine zone taljenja postignuta za ispitni uzorak 3 kod kojega je frekvencija iznosila 30 Hz i balans polariteta +20 %. Nadalje, redom slijede uzorci 6 i 9, kod kojih je balans polariteta također iznosio +20 %, a frekvencija 265 Hz kod uzorka 6 i 500 Hz kod uzorka 9. Dobiveni rezultati prikazani na slici 74. poklapaju se s utjecajem koji frekvencija i balans polariteta imaju na izgled zavarenog spoja koji je opisan u teorijskom dijelu rada. Manji iznos frekvencije uzrokuje duže zadržavanje elektrode na pozitivnom, ali i na negativnom polu izmjenične struje što rezultira širim električnim lukom, također duže zadržavanje na pozitivnom polu izmjenične struje pri balansu polariteta od +20 % utječe se na postizanje veće širine zavarenog spoja. Suprotno tome, najniže vrijednosti širine zone taljenja uočene kod uzorka 7 postignute su pri visokim iznosima frekvencije i pri dužem zadržavanju elektrode na negativnom polu izmjenične struje pri balansu polariteta od -20 %, što se također poklapa s prethodno opisanim utjecajem frekvencije i balansa polariteta na izgled zavarenog spoja u teorijskom dijelu rada.

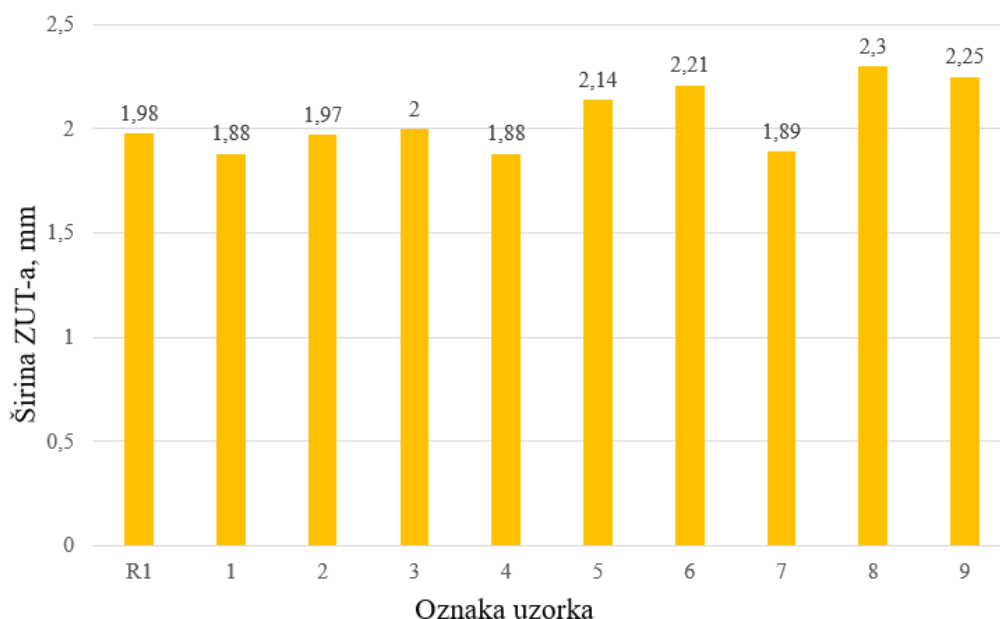
Grafički prikaz dubine zone taljenja svakog pojedinog uzorka prikazan je na slici 75.



Slika 75. Grafički prikaz dubine zone taljenja pojedinih ispitnih uzoraka

Promatrajući iznose mjerenja dubine zone taljenja uočljivo je da dubina zone taljenja tj. penetracija raste s porastom frekvencije izmjenične struje, ali različito ovisi o balansu polariteta izmjenične struje. Uzorci 1, 2 i 3 kod kojih je frekvencija iznosila 30 Hz pokazuju male razlike u promjeni iznosa dubine zone taljenja s promjenom balansa polariteta izmjenične struje. Kod uzoraka 4, 5 i 6 kod kojih je frekvencija postupka pretaljivanja iznosila 265 Hz, primijećena je najveća dubina zone taljenja pri balansu polariteta 0 %, dok je kod uzoraka 7, 8 i 9 uočen najveći iznos dubine zone taljenja i to kod balansa polariteta u iznosu od +20 %. Izražena dubina zone taljenja, tj. penetracija prisutna je i kod referentnog uzorka R1 pretaljivanog uz primjenu istosmjernje struje s elektrodom na negativnom polu, što je karakteristika primjene takve kombinacije struje i polariteta kod TIG postupka zavarivanja čelika.

Grafički prikaz širine zone utjecaja topline svakog pojedinog uzorka prikazan je na slici 76.



Slika 76. Grafički prikaz širine zone utjecaja topline pojedinih ispitnih uzoraka

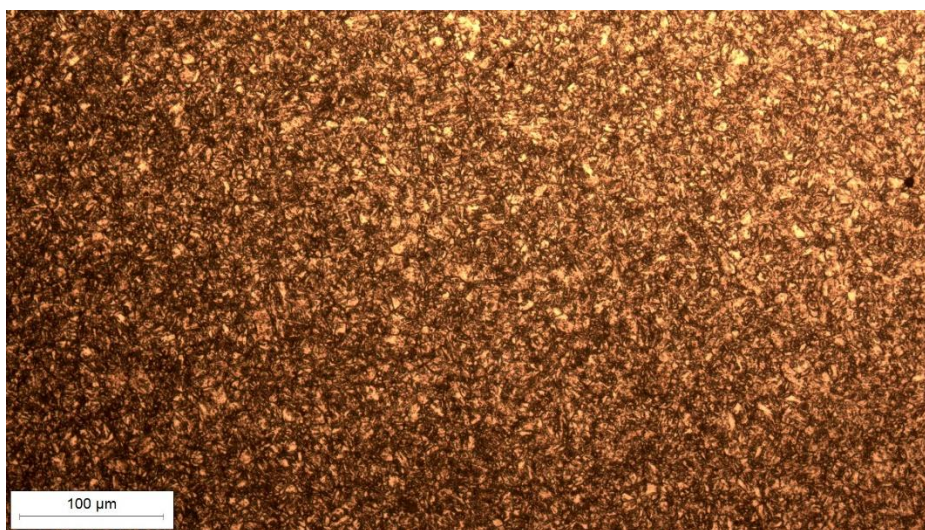
Promatrajući iznose mjerenja širine zone utjecaja topline može se uočiti sličnost s rezultatima mjerenja širine zone taljenja. Za iste vrijednosti frekvencije izmjenične struje najmanju širinu ZUT-a imaju uzorci pretaljivani korištenjem balansa polariteta izmjenične struje od -20 %, dok je najveća širina ZUT-a utvrđena kod uzorka s balansom polariteta u iznosu od +20 %. Dobiveni rezultati mjerenja širine ZUT-a kao i širine zone taljenja poklapaju se s utjecajem frekvencije i balansa polariteta na izgled zavarenog spoja iz teorijskog dijela rada. Povećani iznos širine ZUT-a uočen je i kod referentnog uzorka R1.

## 8.7. Analiza mikrostrukture

Čelik P91 isporučuje se u normaliziranom i popuštenom stanju. Normalizacijom pri temperaturama od 1040 °C do 1080 °C osigurava se otapanje većine karbida bez značajnog porasta zrna. Daljnjim postupkom popuštanja pri temperaturama od 750 °C do 780 °C omogućava se homogena precipitacija karbida unutar martenzitne mikrostrukture. Navedenom toplinskom obradom osigurava se postizanje mikrostrukture popuštenog martenzita s precipitatima  $M_{23}C_6$  karbida i karbida bogatih vanadijem i niobijem čime se doprinosi povećanju granice puzanja. [13]



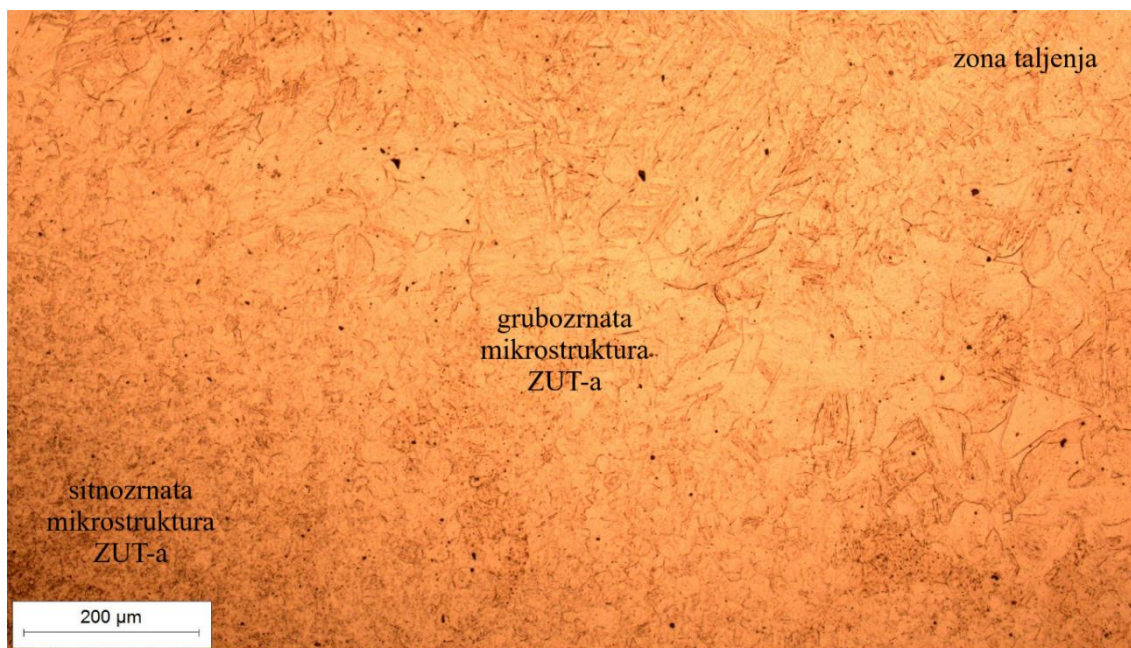
Na slici 77. prikazana je sitnozrnata mikrostruktura popuštenog martenzita čelika P91 korištenog u postupku pretaljivanja ispitnih uzoraka, pod uvećanjem od 200 puta.



Slika 77. Sitnozrnata mikrostruktura osnovnog materijala prije postupka pretaljivanja pod povećanjem od 200x

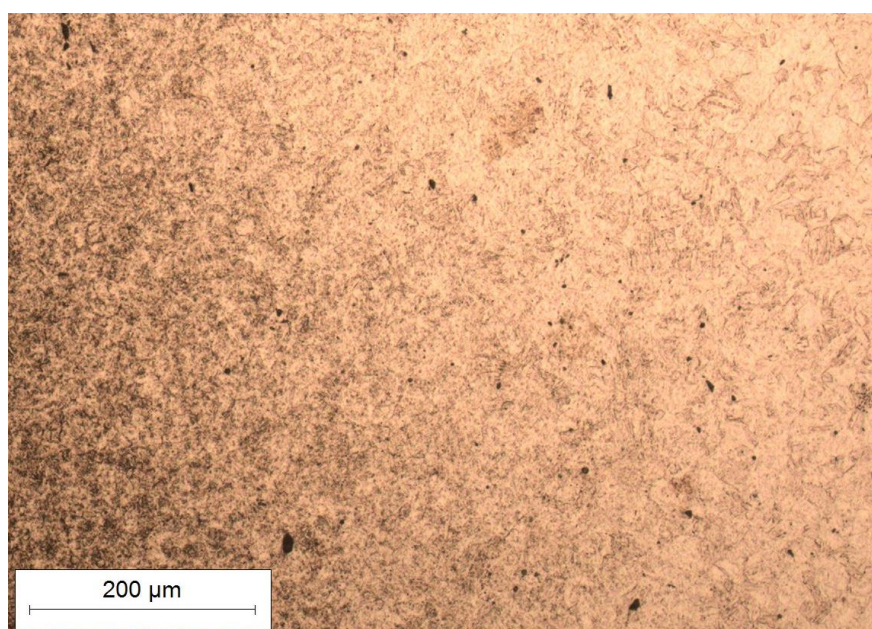
Analiza mikrostrukture prethodno pripremljenih makroizbrusaka provedena je u Laboratoriju za metalografiju. Za analizu mikrostrukture korišten je svjetlosni mikroskop *Olympus GX51*. Mikrostruktura osnovnog materijala promatrana je pod uvećanjem u iznosu od 200 puta, kako je prikazano na slici 77, dok su mikrostrukture pretaljivanih uzoraka promatrane pod uvećanjem od 100 puta. Cilj analize mikrostrukture je utvrditi utjecaj parametara postupka zavarivanja na postignutu mikrostrukturu i veličinu zrna u metalu zavara, zoni utjecaja topline i osnovnome materijalu.

Na slici 78. prikazane su i označene karakteristične zone zavarenog spoja uzorka 2.



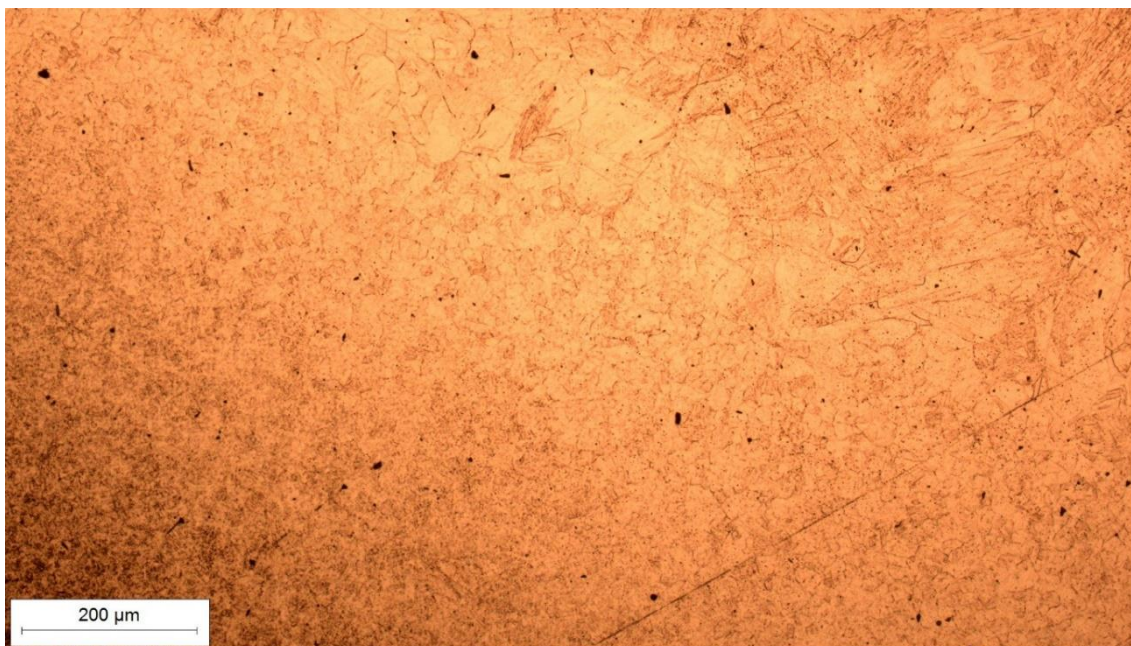
Slika 78. Mikroskopska snimka zone taljenja i ZUT-a ispitnog uzorka 2 pod uvećanjem 100 puta

Na slikama 79., 80., 81. i 82. prikazane su karakteristične zone zavarenog spoja ispitnih uzoraka R1, 1, 5 i 9.

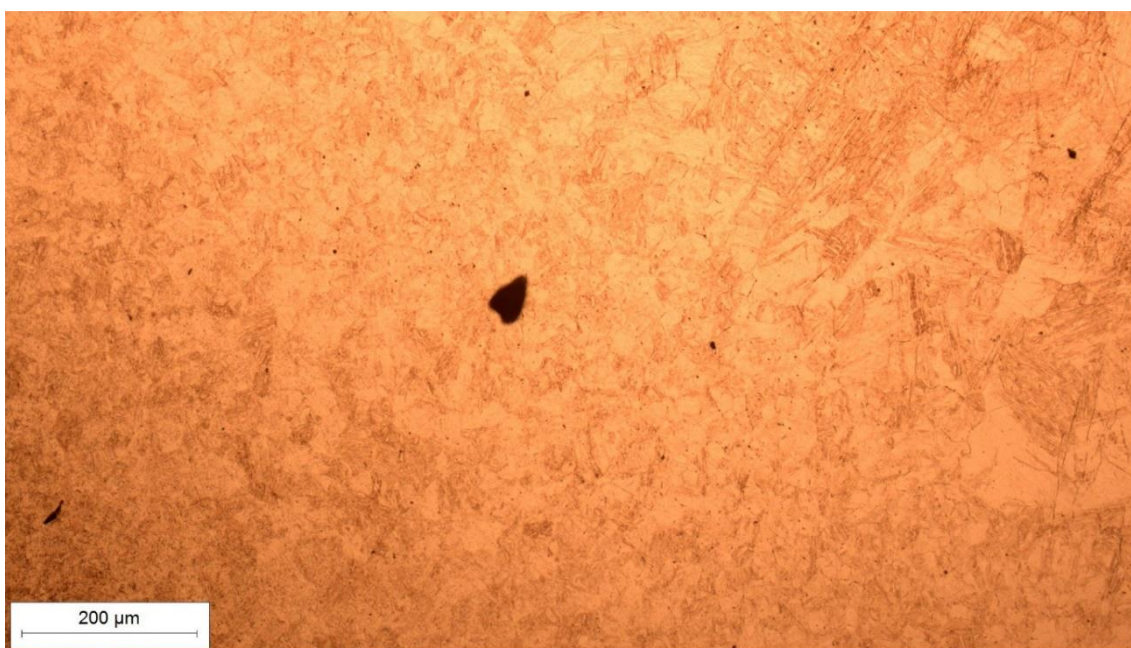


Slika 79. Mikroskopska snimka zone taljenja i ZUT-a ispitnog uzorka R1 pod uvećanjem 100 puta

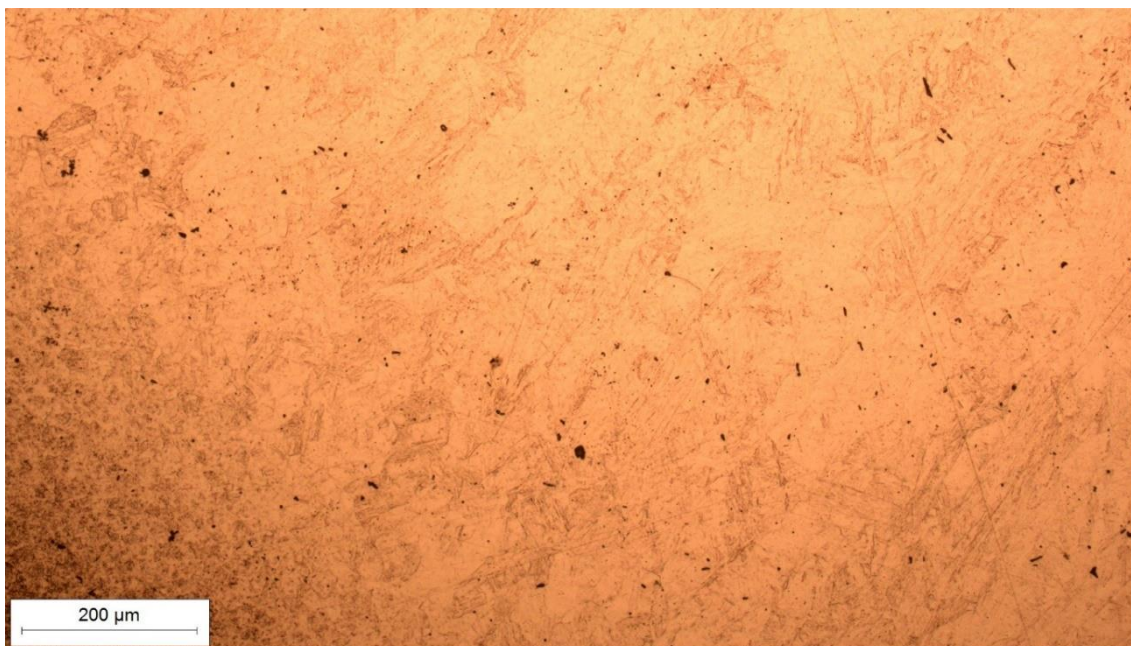




Slika 80. Mikroskopska snimka zone taljenja i ZUT-a ispitnog uzorka 1 pod uvećanjem 100 puta



Slika 81. Mikroskopska snimka zone taljenja i ZUT-a ispitnog uzorka 5 pod uvećanjem 100 puta

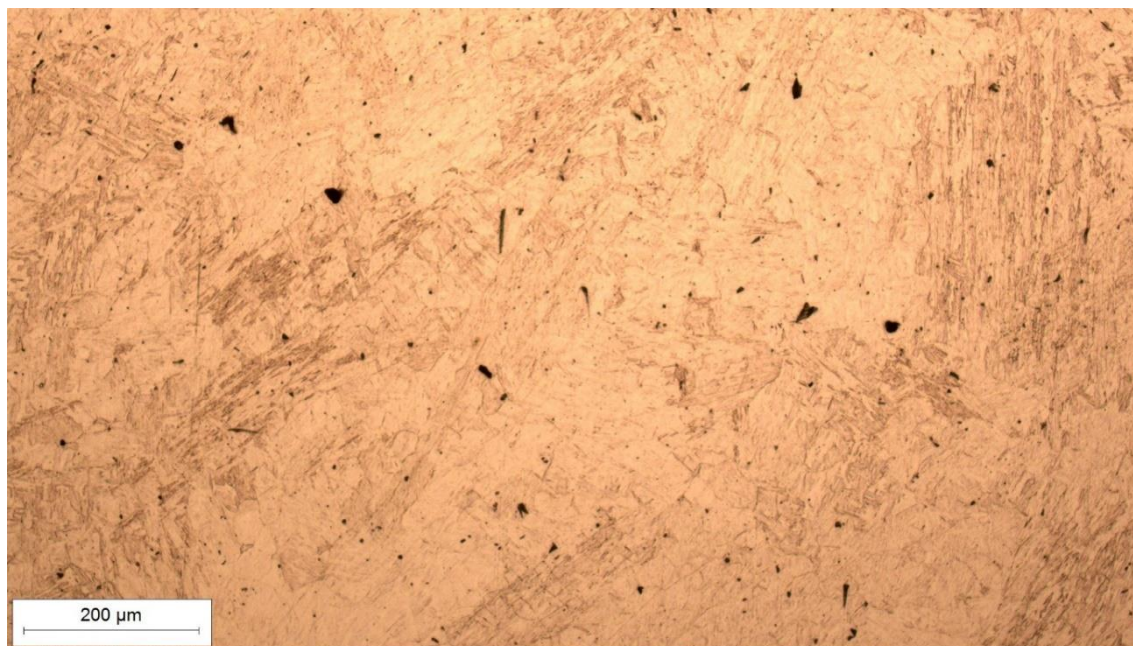


Slika 82. Mikroskopska snimka zone taljenja i ZUT-a ispitnog uzorka 9 pod uvećanjem 100 puta

Iz mikroskopskih snimaka zone taljenja i zone utjecaja topline može se uočiti da neovisno o promjeni parametara postupka zavarivanja (uzorak R1 pretaljivan je korištenjem istosmjernje struje, uzorak 1 izmjeničnom strujom frekvencije 30 Hz i balansa polariteta -20 %, uzorak 5 izmjeničnom strujom frekvencije 265 Hz i balansom polariteta 0 % i uzorak 9 izmjeničnom strujom frekvencije 500 Hz i balansom polariteta +20 %) mogu se uočiti karakteristična područja zone utjecaja topline. Područje sitnozrnate mikrostrukture ZUT-a veličinom zrna najviše odgovara osnovnome materijalu. Približavajući se zoni taljenja, u zoni utjecaja topline zrno postaje sve krupnije. Pojava krupnog zrna uzrokovana je sve većim zagrijavanjem osnovnog materijala tijekom postupka pretaljivanja. Visoke temperature uzrokuju otapanje precipitata koji onemogućavaju rast zrna što kao posljedicu ima pojavu krupnog zrna u zoni pogrubljenja zrna i djelomično rastaljenoj zoni zone utjecaja topline. Osim pogrubljenja zrna, ove zone karakteriziraju i povišeni iznosi tvrdoće i smanjene vrijednosti žilavosti.

Osim promjena veličina zrna uočeni u zoni utjecaja topline, do povećanja zrna, u većoj ili manjoj mjeri došlo je i u zoni taljenja primijećenih kod svih ispitnih uzoraka. Na slici 83. prikazana je zona taljenja uzorka R1.

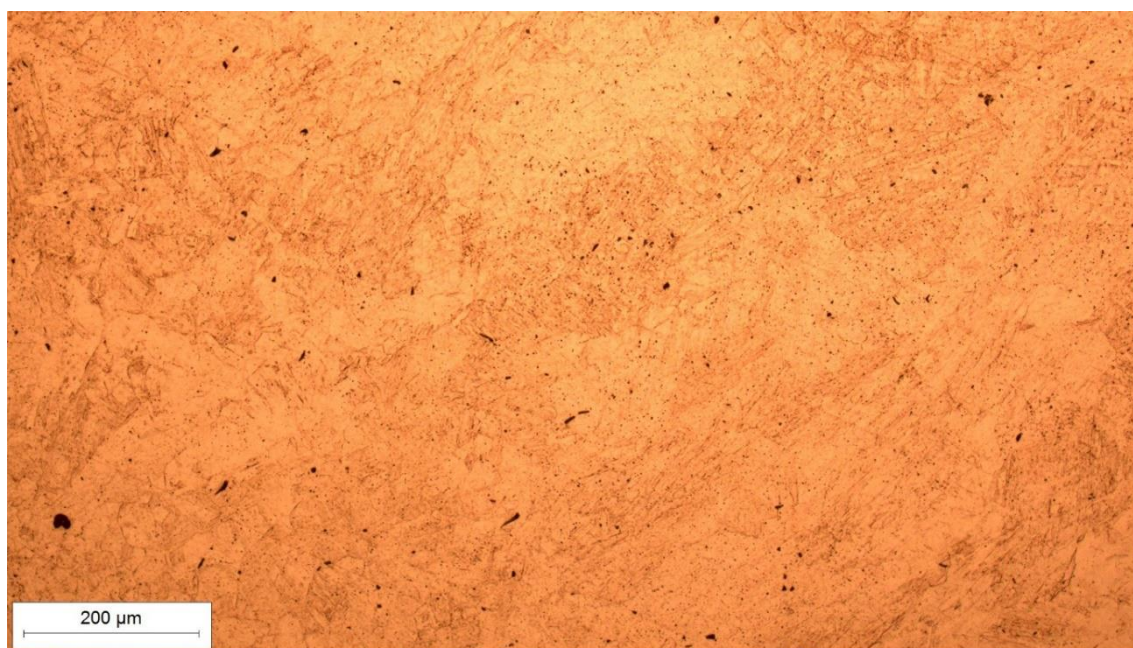




Slika 83. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka R1 pod uvećanjem 100 puta

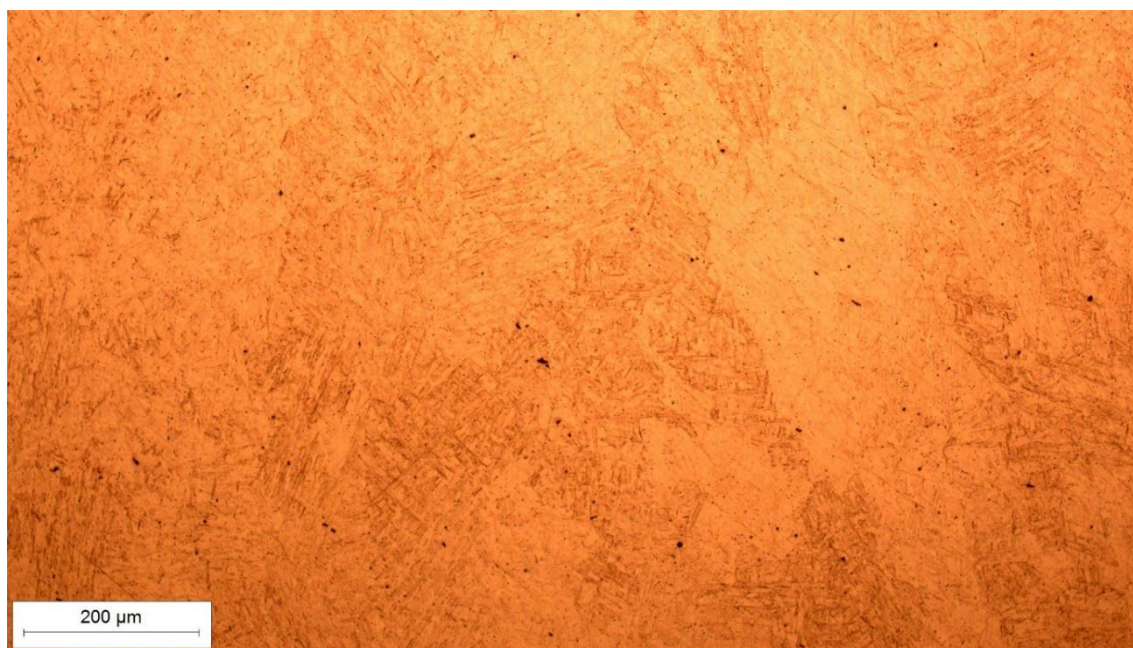
Najveća usmjerenost i najmanji udio pojave krupnog zrna u zoni taljenja uočeni su kod uzoraka 2 i 3 koji su pretaljivani na frekvenciji od 30 Hz. Kod uzoraka 2 i 3 promjena balansa polariteta izmjenične struje nije utjecala na promjenu veličine zrna.

Na slikama 84. i 85. prikazane su mikrostrukture zone taljenja uzoraka 2 i 3.



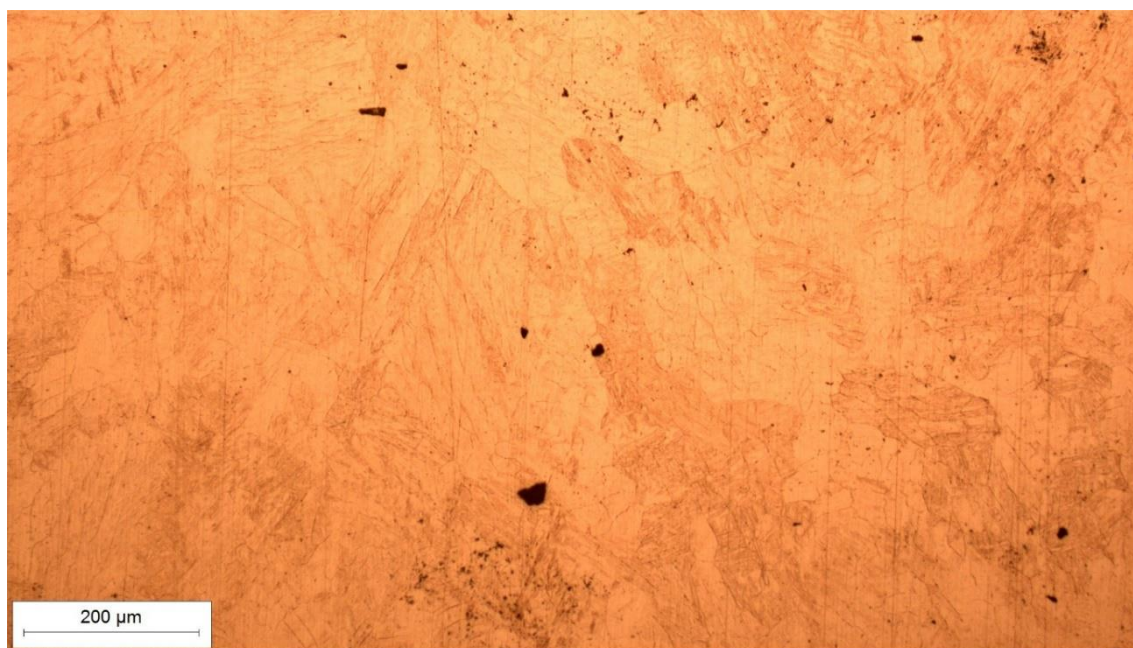
Slika 84. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka 2 pod uvećanjem 100 puta





Slika 85. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka 3 pod uvećanjem 100 puta

Najveći udio pojave i veličina krupnog zrna uočeni su kod uzoraka 7, 8 i 9 koji su pretaljivani na frekvenciji od 500 Hz. Kod uzoraka 7, 8 i 9 promjena balansa izmjenične struje nije utjecaja na promjenu razlike u veličini zrna. Na slikama 86., 87. i 88. prikazane su mikrostrukture zone taljenja uzoraka 7, 8 i 9.

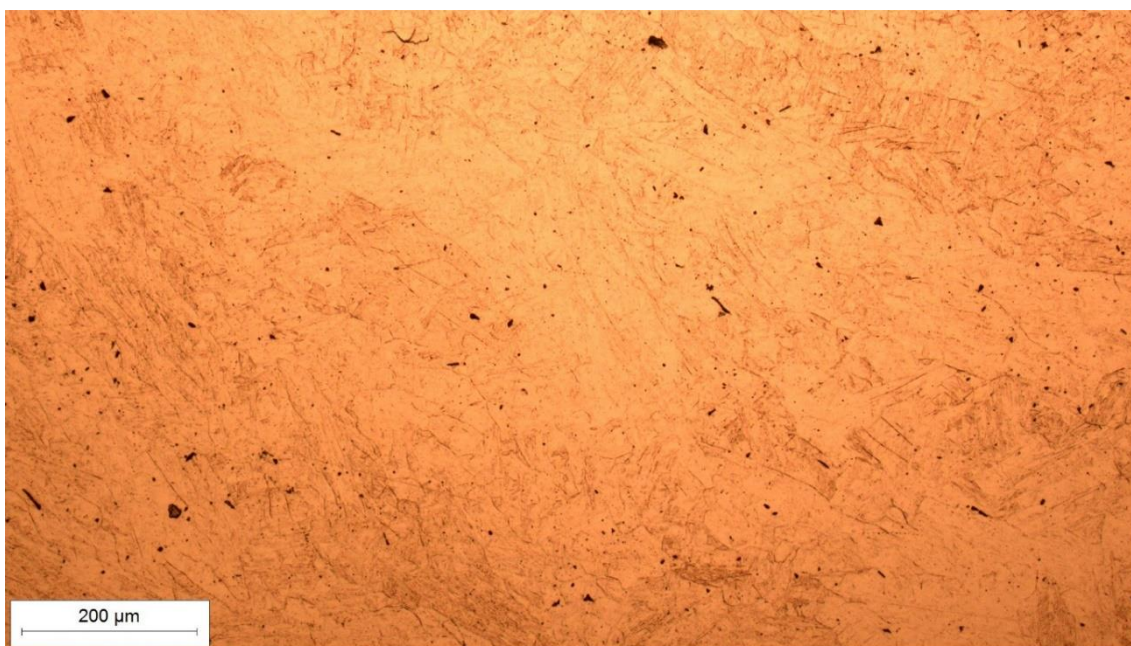


Slika 86. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka 7 pod uvećanjem 100 puta





Slika 87. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka 8 pod uvećanjem 100 puta

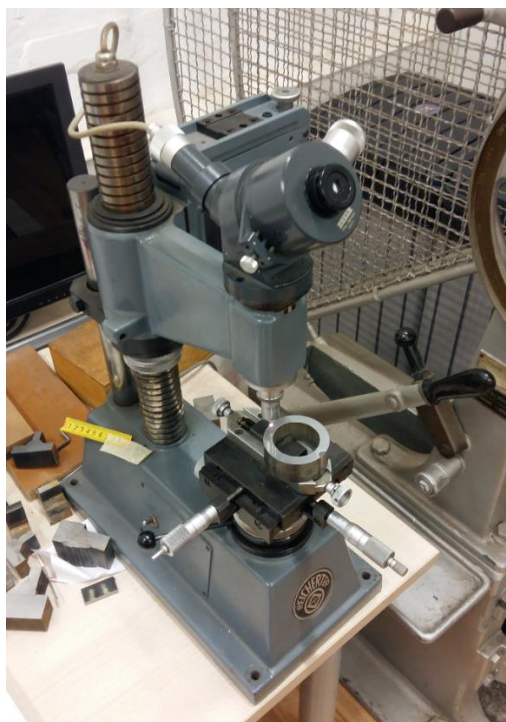


Slika 88. Mikroskopska snimka zone taljenja ispitnog uzorka 9 pod uvećanjem 100 puta

Analizom mikrostrukture zone taljenja može se zaključiti da je najveća usmjerenost i najmanje povećanje zrna prisutno kod ispitnih uzoraka koji su pretaljivani pri nižim iznosima frekvencije od 30 Hz, neovisno o promjeni balansa polariteta. Također, najveći udio krupnog zrna i najveća veličina krupnog zrna uočeni su kod ispitnih uzoraka koji su pretaljivani pri frekvenciji od 500 Hz, neovisno o promjeni balansa polariteta izmjenične struje.

## 8.8. Ispitivanje tvrdoće

Analizom mikrostrukture pretaljenih ispitnih uzoraka utvrđene su zona taljenja, karakteristična područja zone utjecaja topline i zona nepromijenjenog osnovnog materijala. U zoni utjecaja topline, neposredno uz granicu taljenja uočljive su zone pogrubljenja zrna koje karakteriziraju visoki iznosi tvrdoće i mali iznosi žilavosti. Pojava pogrubljenja zrna uočena je i u zoni taljenja ispitnih uzoraka. S obzirom da je pojava grubog zrna povezana s povišenim iznosima tvrdoća, viši iznosi tvrdoće mogu se očekivati i u zoni taljenja. Mjerenjem tvrdoće u zoni taljenja, zoni utjecaja topline i zoni nepromijenjenog osnovnog materijala ispitat će se utjecaj parametara zavarivanja i uvjeti hlađenja na karakteristike postignute mikrostrukture. Na ispitnim uzorcima mjerenje tvrdoće je provedeno ispitnom metodom prema Vickersu (HV10). Uređaj na kojem je provedeno ispitivanje tvrdoće je tvrdomjer proizvođača *REICHERTER*, prikazan na slici 89.

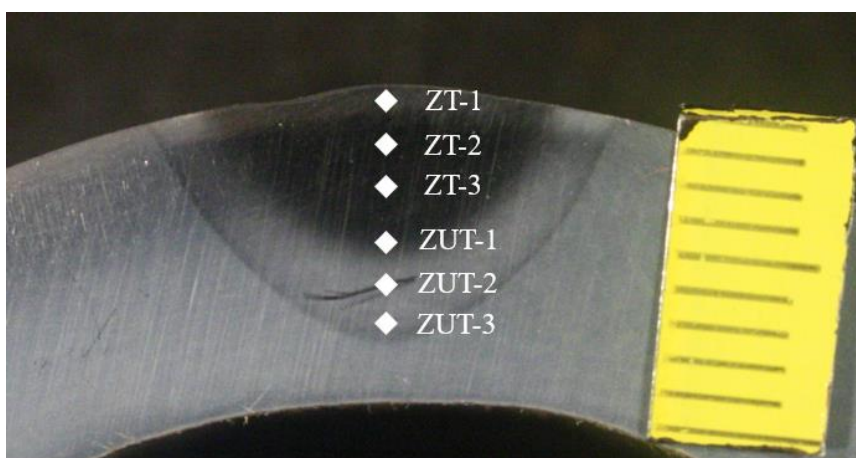


Slika 89. Tvrdomjer proizvođača *REICHERTER*

Ispitna metoda mjerenja tvrdoće prema Vickersu zasniva se na otpornosti materijala uslijed prodiranja vrha uređaja izrađenog iz dijamanta oblika četverostrane piramide s vršnim kutem u iznosu od  $136^\circ$ . Nakon odabira položaja ispitivanja tvrdoće pomoću mikroskopa, dijamantni vrh oblika piramide utiskuje se u materijal u trajanju od 10 sekundi. Na temelju



ostvarenog otiska vrha dijamanta, iz tablice za tvrdoću očitava se iznos ostvarene vrijednosti tvrdoće. Na slici 90. prikazana su mjesta mjerenja tvrdoće.



Slika 90. Shematski prikaz redoslijeda ispitivanja tvrdoće ispitnih uzoraka

Rezultati dobiveni mjerenjem tvrdoće prikazani su u tablici 23.

Tablica 23. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Ispitni uzorak	Vrijednost tvrdoće (HV10)			
	ZT		ZUT	
R1	ZT-1	429	ZUT-1	464
	ZT-2	421	ZUT-2	421
	ZT-3	421	ZUT-3	397
1	ZT-1	459	ZUT-1	464
	ZT-2	450	ZUT-2	464
	ZT-3	421	ZUT-3	425
2	ZT-1	425	ZUT-1	464
	ZT-2	421	ZUT-2	413
	ZT-3	464	ZUT-3	405
3	ZT-1	464	ZUT-1	450
	ZT-2	450	ZUT-2	421
	ZT-3	450	ZUT-3	401
4	ZT-1	425	ZUT-1	450
	ZT-2	429	ZUT-2	401
	ZT-3	397	ZUT-3	370
5	ZT-1	437	ZUT-1	442
	ZT-2	437	ZUT-2	437
	ZT-3	425	ZUT-3	397
6	ZT-1	437	ZUT-1	442
	ZT-2	413	ZUT-2	417
	ZT-3	433	ZUT-3	417

Nastavak tablice 23.

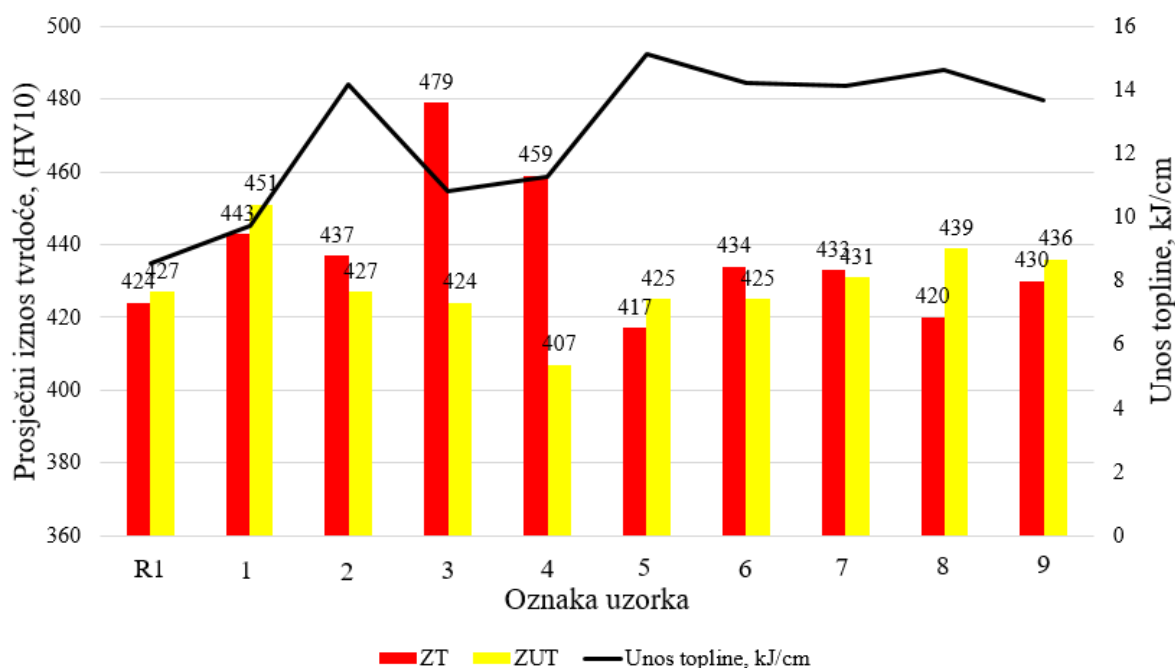
7	ZT-1	464	ZUT-1	455
	ZT-2	421	ZUT-2	429
	ZT-3	413	ZUT-3	409
8	ZT-1	421	ZUT-1	455
	ZT-2	413	ZUT-2	437
	ZT-3	425	ZUT-3	425
9	ZT-1	429	ZUT-1	450
	ZT-2	425	ZUT-2	442
	ZT-3	437	ZUT-3	417

Promatrajući izmjerene vrijednosti tvrdoće u zoni utjecaja topline može se uočiti da su najviše vrijednosti izmjerene u grubozrnatom području zone utjecaja topline (ZUT-1), a izmjereni iznos tvrdoće opada približavanjem u područje sitnozrnate mikrostrukture (ZUT-3). Prosječne vrijednosti iznosa tvrdoće prema Vickersu u zoni taljenja i zoni utjecaja topline prikazani su u tablici 24. Prosječna tvrdoća u osnovnome materijalu iznosi 285 HV10.

Tablica 24. Prosječne vrijednosti iznosa tvrdoće u zoni taljenja i zoni utjecaja topline

Ispitni uzorak	Prosječne vrijednosti tvrdoće (HV10)	
	ZT	ZUT
R1	424	427
1	443	451
2	437	427
3	479	424
4	459	407
5	417	425
6	434	425
7	433	431
8	420	439
9	430	436

Povećani iznosi tvrdoće u zoni taljenja uočeni su kod ispitnih uzoraka 3 i 4, dok je u zoni utjecaja topline povećana tvrdoća uočena kod uzorka 1. Radi lakše preglednosti, na slici 91. prikazana je usporedba prosječnih vrijednosti mjerenja tvrdoće s iznosom unesene topline tijekom postupka pretaljivanja.



Slika 91. Usporedba prosječnih vrijednosti mjerenja tvrdoće s iznosom unesene topline

Iz dijagrama na slici 91. može se uočiti da su najveći iznosi tvrdoće izmjereni kod uzoraka 1, 3 i 4. Također, vidljivo je da iznos ostvarene tvrdoće kod postupka zavarivanja korištenjem izmjenične struje ovisi o iznosu unosa topline. Najveća tvrdoća izmjerena kod uzoraka 1, 3 i 4 ima najmanje iznose unesene topline tijekom postupka zavarivanja. Ovakva pojava povećanja tvrdoće rezultat je malog unosa topline tijekom postupka zavarivanja. Malim unosom topline dolazi do bržeg hlađenja radnog komada što uzrokuje povećanje čvrstoće i tvrdoće zavarenog spoja. Unos topline kod uzoraka 2, 5, 6, 7, 8 i 9 bio je u iznosu od 14 do 15 kJ/cm, čime je postignuta veća ujednačenost izmjerene tvrdoće. Također, najmanji iznos izmjerene tvrdoće utvrđen je kod uzorka 5 kod kojega je izmjeren najveći iznos unesene topline u iznosu od 15,111 kJ/cm. Promatrajući referentni uzorak R1 pretaljivan korištenjem istosmjerne struje može se uočiti da njegovo ponašanje odstupa od pojava zabilježenih kod postupka pretaljivanja korištenjem izmjenične struje. Iako je referentni uzorak R1 imao najmanji unos topline od svih ispitnih uzoraka, taj iznos nije bio premali da uzrokuje povećanje tvrdoće mikrostrukture kao kod uzoraka 1, 3 i 4. Uz to, postignuti iznos tvrdoće uzorka R1 vrlo je sličnog iznosa tvrdoće uzorka 5, usprkos znatnoj razlici u iznosu unosa topline. Navedene razlike u iznosu unosa topline mogu nastati kao rezultat odabira neadekvatne metode mjerenja

unos topline. Ispitni uzorak R1 pretaljivan je korištenjem istosmjerne struje pri čemu istosmjerna struja ima konstantan iznos u vremenu i ne mijenja polaritet, stoga je izračun za unos topline prema izrazu (7) u skladu s normom HRN EN ISO 1011–1:2009 prikladan za TIG postupak zavarivanja korišten za pretaljivanje uzorka R1. Preostali uzorci pretaljivani su promjenjivim parametrima frekvencije i balansa polariteta izmjenične struje, tj. postupkom TIG AC, pri čemu je unos topline također izračunat prema izrazu (7) u skladu s normom HRN EN ISO 1011–1:2009. Postupak TIG AC ubraja se u modificirane postupke zavarivanja koji karakterizira posebno generirani oblik izmjenične struje kojim se utječe na penetraciju, geometriju zavara i čišćenje zavarenog spoja od oksida. Promatrajući dinamičku karakteristiku tijekom TIG AC postupka zavarivanja, tj. praćenjem parametara struje i napona tijekom vremena, može se utvrditi promjena vrijednosti tih parametara u vremenu. Kao posljedica promjene struje i napona u vremenu, unos topline mjeran je srednjim vrijednostima tih promjenjivih parametara, pa može doći do odstupanja između stvarne isporučene energije i izračunate vrijednosti unosa topline. U takvom slučaju umjesto izračuna unosa topline prema normi HRN EN ISO 1011–1:2009 korištenjem srednjih vrijednosti parametara struje i napona, praktičnije je izračun provoditi mjerenjem energije luka prema normi ISO/TR 18491, a umjesto srednjih vrijednosti parametara koristiti srednju kvadratnu vrijednost (eng. *RMS-root mean square*). [28]

Za određivanje dozvoljenog iznosa tvrdoće pojedine skupine materijala koriste se norme ISO-TR 20172-2009 i HRN EN ISO 15614–1:2017. Norma ISO-TR 20172:2009 čelik P91 (X10CrMoVNb9-1) svrstava u grupu 6, a norma HRN EN ISO 15614–1:2017 propisuje dozvoljeni iznos tvrdoće. Maksimalni dozvoljeni iznos tvrdoće čelika P91 nakon provedene toplinske obrade iznosi 350 HV10. Također, normom HRN EN ISO 15614–1:2017 nije propisana maksimalna dozvoljena tvrdoća nakon postupka zavarivanja bez provedene toplinske obrade, što znači da konstrukcije iz čelika P91 na kojima je proveden postupak zavarivanja nisu namijenjene eksploataciji bez prethodno provedene naknadne toplinske obrade. [29,30]

Iz rezultata ispitivanja tvrdoće ispitnih uzoraka, može se uočiti da se tvrdoća niti jednog od ispitnih uzoraka ne nalazi ispod maksimalnog dopuštenog iznosa tvrdoće što govori da je provođenje toplinske obrade neophodno za svaki ispitni uzorak iz provedenog ispitivanja.

## 9. ZAKLJUČAK

Zbog potrebe za primjenom viših radnih parametara u industriji proizvodnje energije razvijene su nove vrste čelika otporne na puzanje s visokim udjelom kroma, poput visokolegiranog martenzitnog čelika P91. Primjenom viših radnih parametara poput temperatura i tlakova u energetskim se postrojenjima smanjuju gubici prijenosa energije i povećava se njihova učinkovitost, a umanjuje štetni utjecaj fosilnih goriva na okoliš. Zbog povoljnih svojstava otpornosti na puzanje i visokotemperaturnu koroziju čelik P91 omogućava primjenu pri temperaturama od 585 °C do 625 °C. U usporedbi s drugim materijalima za navedenu primjenu, čelik P91 cijenom je pristupačniji i omogućava smanjenje debljine stijenke cijevi parovoda. Unatoč povoljnim svojstvima u uvjetima eksploatacije, čelik P91 karakterizira složen proces postupka zavarivanja koji uključuje neophodno provođenje postupka predgrijavanja, održavanja međuprolazne temperature i naknadne toplinske obrade čime se značajno produžuje vrijeme izrade konstrukcije.

Svrha eksperimentalnog dijela rada je provjeriti utjecaj parametara balansa polariteta i frekvencije izmjenične struje na mikrostrukturu i tvrdoću ispitnih uzoraka te utvrditi može li se kombinacijom tih parametara postići povoljna svojstva kakva se postižu nakon provedenog predgrijavanja i toplinske obrade. Na završna svojstva zavarenog spoja iz provedenog ispitivanja ispitan je utjecaj unosa topline postignut kombinacijom parametara zavarivanja, bez prethodnog predgrijavanja i naknadne toplinske obrade uzoraka. Tijekom postupka zavarivanja električni je luk najveću stabilnost pokazao kod zavarivanja istosmjernom strujom. Električni luk bio je stabilan i kod zavarivanja izmjeničnom strujom s balansom polariteta na -20 %, a stabilnost luka se smanjivala s povećanjem pozitivnog udjela balansa polariteta. Kod pozitivnog balansa polariteta +20 % najmanja je stabilnost električnog luka, a povećanjem frekvencije utvrđeno je nekoliko skokova iznosa napona i struje zavarivanja. Opisane pojave i ponašanje električnog luka vidljive su iz samog estetskog izgleda pretaljenih uzoraka. Iz pripremljenih ispitnih uzoraka analizirana je geometrija karakterističnih zona zavarenog spoja; širina zone taljenja, dubina zone taljenja i širina zone utjecaja topline. Analizom širine zone taljenja potvrđena je ovisnost parametara postupka zavarivanja na dimenzije zavarenog spoja opisane u teorijskom dijelu. Manji iznos frekvencije uzrokuje duže zadržavanje elektrode na pozitivnom, ali i na negativnom polu izmjenične struje što rezultira širim električnim lukom, također duže zadržavanje na pozitivnom polu izmjenične struje pri balansu polariteta od +20 %

utječe se na postizanje veće širine zavarenog spoja. Suprotno tome, najniže vrijednosti širine zone taljenja uočene su kod uzoraka pri visokim iznosima frekvencije i pri dužem zadržavanju elektrode na negativnom polu izmjenične struje pri balansu polariteta od -20 %. Analizom dubine zone taljenja uočeno je da dubina zone taljenja tj. penetracija raste s porastom frekvencije izmjenične struje, ali različito ovisi o balansu polariteta izmjenične struje, pri čemu je najveća dubina zone taljenja utvrđena kod uzoraka balansa polariteta +20 %. Izražena dubina zone taljenja, tj. penetracija prisutna je i kod referentnog uzorka R1 pretaljivanog uz primjenu istosmjernje struje s elektrodom na negativnom polu. Nakon analize makrostrukture uslijedila je analiza mikrostrukture. Na analiziranim uzorcima nije utvrđena pojava grešaka u zavarenom spoju. Utvrđeno je pogrubljenje zrna kod svih uzoraka u zoni utjecaja topline, ali u većoj ili manjoj mjeri i u zoni taljenja što se odrazilo na povećanje tvrdoće u ove dvije zone. Ispitivanjem tvrdoće u zoni taljenja i zoni utjecaja topline uočeno je da se tvrdoća niti jednog od ispitnih uzoraka ne nalazi ispod maksimalne dozvoljene vrijednosti tvrdoće propisane normom što govori da je toplinsku obradu neophodno provesti za svaki ispitni uzorak. Ispitivanjem tvrdoće utvrđena je ovisnost unosa topline i tvrdoće kod postupka zavarivanja izmjeničnom strujom, pri čemu je za veći unos topline utvrđena manja tvrdoća nakon postupka zavarivanja. Nasuprot tome kod postupka zavarivanja istosmjernom strujom uočena je suprotna pojava, pri čemu je tvrdoća manjeg iznosa utvrđena za manju vrijednost unosa topline. S obzirom da se TIG AC postupak zavarivanja ubraja u modificirane postupke zavarivanja umjesto unosa topline prema normi HRN EN ISO 1011-1:2009 praktičnije je mjeriti energiju električnog luka u skladu s normom ISO/TR 18491, te tada utvrditi utjecaj isporučene energije na svojstva zavarenog spoja. Provedeno ispitivanje utjecaja parametara TIG AC postupka zavarivanja može poslužiti kao temelj za buduća ispitivanja. U budućnosti, moguće je istražiti utjecaj parametara TIG AC postupka zavarivanja s višestrukim prolazima gdje bi se unesena energija naknadnog prolaza koristila kao svojevrsna toplinska obrada prethodno formiranog zavara, te tada istražio utjecaj višeprolaznog postupka zavarivanja na karakteristike mikrostrukture i tvrdoće zavarenog spoja.

**POPIS LITERATURE**

- [1] Fossil Fuels Still Supply 84 Percent of World Energy: <https://www.forbes.com/sites/rrapier/2020/06/20/bp-review-new-highs-in-global-energy-consumption-and-carbon-emissions-in-2019/?sh=5a6a1d1166a1>, Pristupljeno: 30. rujna 2021.
- [2] It's Harder Than You Think To Stop Using Fossil Fuels: <https://www.forbes.com/sites/daneberhart/2020/08/03/its-harder-than-you-think-to-stop-using-fossil-fuels/?sh=5ef53ac4202c>, Pristupljeno: 01. listopada 2021.
- [3] Creep properties of 1,25Cr-1Mo-0,25V steels for turbine casings: <https://www.scielo.br/j/rem/a/6zTTYsbrPCDX5rp7z8bwvVc/?lang=en>, Pristupljeno: 03. listopada 2021.
- [4] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J. Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [5] Meden, G., Pavelić, A., Pavletić, D. Osnove zavarivanja, Tehnički fakultet, Rijeka, 2000.
- [6] Samardžić, I., Bogovac, D., Jorgić, T., Kovačić, K. Primjena TIG postupka u spajanju pozicija, Tehnički glasnik 9, 2(2015), 202-208. Dostupno online: <https://hrcak.srce.hr/140768>
- [7] Dunder, M., Salopek, G., Horvat, M., Kondić, V., Marković, M. Pristup određivanju zavarljivosti čelika, Tehnički glasnik 9, 3(2015), 291-297. Dostupno online: <https://hrcak.srce.hr/146244>
- [8] Garašić, I. Autorizirana predavanja iz kolegija Zavarljivost materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [9] Ćorić, D. Posebni metali materijali III. dio. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [10] Novosel, M., Krumes, D. Posebni čelici, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, Slavonski brod 1998.
- [11] Ćorić, D., Alar, Ž. Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [12] Despotović, B., Marsenić, T., Samardžić. Suvremeni materijali u kotlogradnji, Zavarivanje 59(2016)3/4, 65-72.

- [13] Haarmann, K., Vaillant, J. C., Vandenberghe, B. The T91/P91 Book, Vallourec&Mannesmann Tubes, 2008.
- [14] Despotović, B., Marsenić, T., Bajić, D., Vuherer, T., Samardžić, I. Zavarljivost savremenih 9-12 Cr martenzitnih čelika za komponente u kotlogradnji, Zavarivanje i zavarene konstrukcije 1/2012, 5-14, Dostupno online: <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0354-7965/2013/0354-79651301005D.pdf>
- [15] Zavarivanje i navarivanje visokolegiranih feritnih (F), martenzitnih (M) i austenitnih (A) čelika: <https://old.unisb.hr/kth/zavar/tii/visoko.pdf>, Pristupljeno: 15. listopada 2021.
- [16] Kožuh, S. Specijalni čelici, Metalurški fakultet, Zagreb, 2010.
- [17] Stupnišek, M., Cajner, F. Osnove toplinske obrade metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [18] Welding solutions for grade 91, <http://www.voestalpine.com/welding>, Pristupljeno: 17. listopada 2021.
- [19] Meet the Demanding Requirements of Welding P91 Pipe With Advanced Wire Processes, <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/meet-the-requirements-of-welding-p91-pipe-with-wire-processes>, Pristupljeno: 18. listopada 2021.
- [20] Lončar, Đ., Gordić, M., Kovačević, M., Mateljan, D., Podhraški, M. Priručnik za zavarivanje, Tehnička knjiga, Zagreb.
- [21] Mayr, P. Evolution of microstructure and mechanical properties of the heat affected zone in B-containing 9% chromium steels, doktorski rad, Sveučilište u Grazu, Graz, 2007.
- [22] Horvat, M., Bilić, M., Kondić, V. Primjena PEL zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik 7, 2(2013), 132-137. Dostupno online: <https://hrcak.srce.hr/105594>
- [23] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D. Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Tehnički glasnik 8, 4(2014), 426-432. Dostupno online: <https://hrcak.srce.hr/131573>
- [24] Zaštitni plin argon: <https://www.messer.hr/argon>, Pristupljeno: 08. studeni 2021.
- [25] Guidelines for tungsten electrodes: <https://www.thefabricator.com/thefabricator>, Pristupljeno: 10. studeni 2021.
- [26] Welbee Inverter A350P: <https://www.daihen-usa.com/product/welbee-wb-a350p-dual-inverter-ac-dc-tig-weld-power-source/>, Pristupljeno: 12. studeni 2021.



- [27] HRN EN ISO 1011–1:2009 Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1.dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje
- [28] Garašić, I. Autorizirana predavanja iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [29] ISO/TR 20172:2009 Zavarivanje – Sustavi razvrstavanja materijala – Europski materijali
- [30] HRN EN ISO 15614–1:2017 Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – 1.dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla