

Utjecaj stacionarnog autogenog TIG procesa zavarivanja na profil penetracije kod nehrđajućeg austenitnog čelika 316L

Kojundžić, Domagoj

Doctoral thesis / Disertacija

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:179:477338>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-07**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture - University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Domagoj Kojundžić

**UTJECAJ STACIONARNOG AUTOGENOG TIG PROCESA
ZAVARIVANJA NA PROFIL PENETRACIJE KOD
NEHRĐAJUĆEG AUSTENITNOG ČELIKA 316L**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Domagoj Kojundžić

***Utjecaj stacionarnog autogenog TIG procesa zavarivanja na profil
penetracije kod nehrđajućeg austenitnog čelika 316L***

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2023.

Doktorska disertacija je izrađena pri Zavodu za proizvodno strojarstvo, Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Splitu.

Mentor: izv. prof. dr. sc. Nikša Krnić

Rad br.: 182

Podaci za bibliografsku karticu

Ključne riječi: Stacionarno TIG zavarivanje; točkasto zavarivanje; TIG zavarivački parametri; vremenska evolucija zone taljenja; oblik i dimenzije zone taljenja; nehrđajući čelici; austenitni nehrđajući čelik 316L; argon; helij

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojstvo

Znanstvena grana: Proizvodno strojarstvo

Institucija na kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: izv. prof. dr. sc. Nikša Krnić

Broj stranica: 163

Broj slika: 190

Broj tablica: 62

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 85

Podaci o ocjeni i obrani disertacije

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc. Dražen Bajić (FESB, Split) – predsjednik
2. Prof. dr. sc. Zoran Kožuh (FSB, Zagreb) – član
3. Prof. dr. sc. Ivan Samardžić (SFSB, Slavonski Brod) – član
4. Prof. dr. sc. Sandro Nižetić (FESB, Split) – član
5. Izv. prof. dr. sc. Sonja Jozić (FESB, Split) – član

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc. Dražen Bajić (FESB, Split) – predsjednik
2. Prof. dr. sc. Zoran Kožuh (FSB, Zagreb) – član
3. Prof. dr. sc. Ivan Samardžić (SFSB, Slavonski Brod) – član
4. Prof. dr. sc. Sandro Nižetić (FESB, Split) – član
5. Izv. prof. dr. sc. Sonja Jozić (FESB, Split) – član

Disertacija obranjena dana: 13.02.2023.

Utjecaj stacionarnog autogenog TIG procesa zavarivanja na profil penetracije kod nehrđajućeg austenitnog čelika 316L

Sažetak

U ovoj doktorskoj disertaciji istražen je utjecaj stacionarnog autogenog TIG procesa zavarivanja na profil penetracije kod nehrđajućeg austenitnog čelika 316L. Treba istaknuti kako su ponavljanjem eksperimenata pod jednakim zavarivačkim parametrima utvrđena značajna odstupanja u dubini penetracije unatoč tome što uzorci potječu iz iste šarže i načelno imaju jednak kemijski sastav.

Istraživanje je pokazalo da zaštita korijenske strane zavara argonom povećava penetraciju u odnosu na zaštitu helijem. Povećanje protoka argona na korijenskoj strani zavara rezultiralo je smanjenjem penetracije dok je u slučaju helija utvrđeno upravo suprotno. Stanje površine osnovnog metala nije značajnije utjecalo na dimenzije zone taljenja. Najveća penetracija ostvarena je za električni luk duljine 6 mm. Električni luk duljine 1,5 mm rezultirao je većom penetracijom u odnosu na luk duljine 3 mm. Povećanje vršnog kuta volframove elektrode s 20 ° na 45 ° nije bitnije utjecalo na penetraciju za luk duljine 1,5 mm i 3 mm. Međutim, za vršni kut elektrode od 20 ° zabilježena je veća penetracija ukoliko je duljina električnog luka iznosila 6 mm. Impulsno TIG zavarivanje rezultiralo je većom penetracijom u odnosu na konvencionalni TIG proces jednake efektivne jakosti struje, bez obzira na duljinu električnog luka i vrijeme zavarivanja. Niti jedan od istraženih faktora nije utjecao na promjenu širine zone taljenja.

Ključne riječi:

Stacionarno TIG zavarivanje; točkasto zavarivanje; TIG zavarivački parametri; vremenska evolucija zone taljenja; oblik i dimenzije zone taljenja; nehrđajući čelici; austenitni nehrđajući čelik 316L; argon; helij

Influence of stationary autogenous TIG welding process on the penetration profile for 316L austenitic stainless steel

Abstract

In this PhD thesis, the influence of the stationary autogenous TIG welding process on the penetration profile for 316L austenitic stainless steel was investigated. It should be pointed out that by repeating the experiments under the same welding parameters, significant variations in the penetration depth were determined, despite the fact that the samples come from the same batch and have the same nominal chemical composition.

The study has shown that weld root side argon purging increases penetration compared to helium purging. Increasing the argon flow on the weld root side decreased penetration, while the opposite was found in the case of helium. The surface condition of the base metal did not affect the dimensions of the fusion zones significantly. The highest penetration was achieved for 6 mm electric arc length. 1,5 mm arc resulted in greater penetration compared to 3 mm arc. Increasing the tungsten electrode vertex angle from 20 ° to 45 ° did not affect the penetration for 1,5 and 3 mm arc. However, 20 ° tungsten angle resulted in greater penetration in the case of 6 mm arc. Pulsed TIG welding increased penetration depth compared to the conventional TIG process of equal effective current, regardless of the arc length and the welding time. None of the investigated factors affected fusion zone width.

Keywords:

Stationary TIG welding; spot TIG welding; TIG welding parameters; fusion zone evolution; fusion zone shape and dimensions; stainless steels; austenitic stainless steel 316L; argon; helium

Zahvala

Prije svega iskazao bih svoju zahvalnost mentoru i profesoru Nikši Krniću na tehničkoj i moralnoj podršci koju mi je pružio tijekom doktorskog studija. Njegovo usmjeravanje i strpljivost pomogli su mi da uspješno prođem kroz sve faze studija i završim ga ovom doktorskom disertacijom.

Zahvaljujem i svim kolegama koji su mi pomogli, a posebno prijateljima Zvoni i Juri na korisnim savjetima i podjeli svojih iskustava s doktorskog studija.

Velika zahvala mojoj supruzi Emi koja je preuzela veliki dio roditeljskih i životnih obveza na sebe kada je to bilo potrebno. Hvala i baki Barbari koja je unatoč svojim godinama mnogo pomogla kuhajući i čuvajući praunuke.

Zahvalu svakako dugujem i mojim roditeljima na njihovoj bezuvjetnoj podršci i pomoći te školovanju koje je prethodilo doktorskom studiju.

Sadržaj

Podaci za bibliografsku karticu	ii
Podaci o ocjeni i obrani disertacije	iii
Sažetak	iv
Abstract	v
Zahvala	iii
Sadržaj	viii
Popis tablica	xi
Popis slika	xiv
Popis kratica	xxi
1. UVOD	1
1.1. Motivacija.....	1
1.2. Hipoteza	2
1.3. Znanstveni doprinos	2
1.4. Organizacija disertacije	3
2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA.....	4
2.1 Osnove TIG zavarivanja	4
2.2 Procesna oprema	4
2.3 Električni luk kod TIG zavarivanja	5
2.4 Fizika TIG zavarivanja	9
2.5 Zavarivački parametri TIG procesa	12
2.5.1 Strujni parametri	12
2.5.2 Duljina električnog luka.....	15
2.5.3 Zaštitni plin.....	15
2.5.4 Volframova elektroda	15
2.5.5 Brzina zavarivanja	16
2.5.6 Ostali zavarivački parametri	17
2.6 Osnovna svojstva austenitnih nehrđajućih čelika	17
2.6.1 Kemijski sastav	17
2.6.2 Fizikalna svojstva	18
2.6.3 Mehanička svojstva.....	19
2.6.4 Otpornost na koroziju	19
2.6.5 Zavarljivost i pojava pukotina	19
2.7 TIG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika — zona taljenja	24
2.7.1 Utjecaj kemijskog sastava osnovnog metala na zonu taljenja	25
2.7.2 Utjecaj jakosti struje na zonu taljenja	28
2.7.3 Utjecaj brzine zavarivanja na zonu taljenja	31

2.7.4	Utjecaj duljine električnog luka na zonu taljenja.....	33
2.7.5	Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na zonu taljenja	37
2.7.6	Utjecaj zaštitnog plina na zonu taljenja	40
2.7.7	Impulsno TIG zavarivanje	45
2.8	Područje istraživanja doktorskog rada	47
3.	OPIS METODOLOGIJE ISTRAŽIVANJA	48
3.1	Eksperimentalni postav	48
3.2	Mjerenje dimenzija zone taljenja	50
3.3	Mjerenje temperature	51
3.4	Utjecaj vrste plina na korijenskoj strani zavara na zonu taljenja.....	52
3.5	Utjecaj protoka argona i helija s korijenske strane zavara na zonu taljenja	53
3.6	Utjecaj stanja površine osnovnog metala na zonu taljenja	54
3.7	Utjecaj duljine električnog luka na zonu taljenja.....	54
3.8	Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na zonu taljenja.....	55
3.9	Utjecaj impulsnog TIG (P-TIG) zavarivanja na zonu taljenja.....	56
4.	REZULTATI.....	57
4.1	Utjecaj vrste plina na korijenskoj strani zavara na zonu taljenja.....	57
4.2	Utjecaj protoka zaštitnog plina na korijenskoj strani zavara na zonu taljenja.....	58
4.3	Utjecaj stanja površine osnovnog metala na zonu taljenja	59
4.4	Utjecaj duljine električnog luka na dimenzije zone taljenja	60
4.5	Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na zonu taljenja.....	61
4.6	Utjecaj P-TIG zavarivanja na zonu taljenja	62
5.	RASPRAVA.....	64
5.1	Utjecaj vrste plina s korijenske strane zavara na dimenzije zone taljenja	64
5.1.1	Vrijeme zavarivanja 7 s	65
5.1.2	Vrijeme zavarivanja 14 s	68
5.1.3	Vrijeme zavarivanja 21 s	72
5.1.4	Vremenska evolucija zone taljenja	76
5.2	Utjecaj protoka zaštitnog plina na korijenskoj strani zavara na zonu taljenja.....	83
5.2.1	Vrijeme zavarivanja 7 s - zaštita korijenske strane argonom	83
5.2.2	Vrijeme zavarivanja 7 s - zaštita korijenske strane helijem.....	85
5.2.3	Vrijeme zavarivanja 14 s - zaštita korijenske strane argonom	87
5.2.4	Vrijeme zavarivanja 14 s - zaštita korijenske strane helijem.....	89
5.2.5	Vrijeme zavarivanja 21 - zaštita korijenske strane argonom	91
5.2.6	Vrijeme zavarivanja 21 s - zaštita korijenske strane helijem.....	94
5.2.7	Vremenska evolucija zone taljenja	96
5.3	Utjecaj stanja površine osnovnog metala na dimenzije zone taljenja.....	100

5.3.1	Vrijeme zavarivanja 7 s	100
5.3.2	Vrijeme zavarivanja 14 s	102
5.3.3	Vrijeme zavarivanja 21 s	106
5.3.4	Vremenska evolucija zone taljenja	108
5.4	Utjecaj duljine električnog luka na dimenzije zone taljenja	112
5.4.1	Vrijeme zavarivanja 7 s	112
5.4.2	Vrijeme zavarivanja 14 s	115
5.4.3	Vrijeme zavarivanja 21 s	118
5.4.4	Vremenska evolucija zone taljenja	120
5.5	Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na dimenzije zone taljenja	123
5.5.1	Vrijeme zavarivanja 7 s	124
5.5.2	Vrijeme zavarivanja 14 s	126
5.5.3	Vrijeme zavarivanja 21 s	129
5.5.4	Vremenska evolucija zone taljenja	131
5.6	Utjecaj P-TIG zavarivanja na zonu taljenja	135
5.6.1	Vrijeme zavarivanja 7 s	135
5.6.2	Vrijeme zavarivanja 14 s	137
5.6.3	Vrijeme zavarivanja 21 s	140
5.6.4	Vremenska evolucija zone taljenja	143
5.7	Utjecaj istraženih faktora na D/W omjer zone taljenja	146
6.	ZAKLJUČCI	148
	LITERATURA	150
	PRILOZI	155
	Arduino mikrokontroler C++ kod	155
	ŽIVOTOPIS	159
	BIOGRAPHY	160

Popis tablica

<i>Tablica 2.1 Karakteristike različite vrste struje kod TIG zavarivanja [2].....</i>	<i>13</i>
<i>Tablica 2.2 Preporučene jakosti struje ovisno o promjeru volframove elektrode, [2]</i>	<i>16</i>
<i>Tablica 2.3 Kemijski sastav austenitnih nehrđajućih čelika, [48]</i>	<i>17</i>
<i>Tablica 2.4 Utjecaj legirnih elemenata na legure nehrđajućih čelika, [48]</i>	<i>18</i>
<i>Tablica 2.5 Usporedba odabranih svojstva austenitnog i niskougljičnog čelika, [48]</i>	<i>18</i>
<i>Tablica 2.6 Mehanička svojstva austenitnih nehrđajućih čelika, odžareno stanje [49]</i>	<i>19</i>
<i>Tablica 2.7 Utjecaj količine površinskih aktivnih elemenata na oblik zone taljenja</i>	<i>27</i>
<i>Tablica 2.8 Utjecaj povećanja jakosti struje na geometriju zone taljenja</i>	<i>31</i>
<i>Tablica 2.9 Utjecaj povećanja brzine zavarivanja na geometriju zone taljenja</i>	<i>33</i>
<i>Tablica 2.10 Utjecaj povećanja duljine električnog luka na geometriju zone taljenja</i>	<i>37</i>
<i>Tablica 2.11 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na geometriju zone taljenja</i>	<i>39</i>
<i>Tablica 2.12 Utjecaj zaštitnog plina kod TIG zavarivanja na geometriju zone taljenja</i>	<i>44</i>
<i>Tablica 2.13 Utjecaj zavarivačkih parametara P-TIG procesa na geometriju zone taljenja..</i>	<i>47</i>
<i>Tablica 3.1 Generalni plan istraživanja</i>	<i>48</i>
<i>Tablica 3.2 Kemijski sastav korištenih uzoraka od nehrđajućeg čelika 316L</i>	<i>48</i>
<i>Tablica 3.3 Zavarivački parametri za stacionarni TIG proces</i>	<i>52</i>
<i>Tablica 3.4 Plan eksperimenata za analizu utjecaja vrste zaštitnog plina na korijenskoj strani zavara na zonu taljenja</i>	<i>53</i>
<i>Tablica 3.5 Plan eksperimenata za analizu utjecaja protoka zaštitnog plina na korijenskoj strani zavara na zonu taljenja</i>	<i>53</i>
<i>Tablica 3.6 Plan eksperimenata za analizu utjecaja stanja površine osnovnog metala na zonu taljenja</i>	<i>54</i>
<i>Tablica 3.7 Plan eksperimenata za analizu utjecaja duljine električnog luka na zonu taljenja</i>	<i>55</i>
<i>Tablica 3.8 Plan eksperimenata za analizu utjecaja vršnog kuta volframove elektrode na zonu taljenja</i>	<i>55</i>
<i>Tablica 3.9 Zavarivački parametri za stacionarni P-TIG proces</i>	<i>56</i>
<i>Tablica 3.10 Plan eksperimenata za analizu utjecaja P-TIG zavarivanja na zonu taljenja....</i>	<i>56</i>
<i>Tablica 4.1 Dimenzije zona taljenja formiranih uz zaštitu korijenske strane argonom</i>	<i>57</i>
<i>Tablica 4.2 Dimenzije zona taljenja formiranih uz zaštitu korijenske strane helijem</i>	<i>57</i>
<i>Tablica 4.3 Dimenzije zona taljenja formiranih bez zaštite korijenske strane</i>	<i>57</i>
<i>Tablica 4.4 Maksimalne temperature i odstupanje pozicije termopara od osi električnog luka</i>	<i>58</i>
<i>Tablica 4.5 Dimenzije zone taljenja uz protok argona od 4 l/min na korijenskoj strani uzorka</i>	<i>59</i>

<i>Tablica 4.6 Dimenzije zone taljenja uz protok argona od 10 l/min na korijenskoj strani uzorka</i>	59
<i>Tablica 4.7 Dimenzije zone taljenja uz protok helija od 4 l/min na korijenskoj strani uzorka</i>	59
<i>Tablica 4.8 Dimenzije zone taljenja uz protok helija od 10 l/min na korijenskoj strani uzorka</i>	59
<i>Tablica 4.9 Dimenzije zona taljenja za uzorke čija je površina ostavljena u izvornom stanju</i>	60
<i>Tablica 4.10 Dimenzije zona taljenja za uzorke kojima je brušena gornja površina</i>	60
<i>Tablica 4.11 Dimenzije zona taljenja za uzorke kojima su brušene gornja i donja površina</i>	60
<i>Tablica 4.12 Površinske hrapavosti izmjerne na uzorcima u izvornom stanju i brušenim uzorcima</i>	60
<i>Tablica 4.13 Dimenzije zone taljenja za duljinu električnog luka od 1,5 mm</i>	61
<i>Tablica 4.14 Dimenzije zone taljenja za duljinu električnog luka od 3 mm</i>	61
<i>Tablica 4.15 Dimenzije zone taljenja za duljinu električnog luka od 6 mm</i>	61
<i>Tablica 4.16 Dimenzije zona taljenja za vršne kutove volframove elektrode od 20 ° i 45 °</i>	62
<i>Tablica 4.17 Dimenzije zona taljenja formiranih stacionarnim P-TIG zavarivanjem</i>	62
<i>Tablica 4.18 Dimenzije zona taljenja formiranih konvencionalnim stacionarnim TIG procesom</i>	63
<i>Tablica 5.1 Prosječne širine zone taljenja (mm) za različite protoke argona i helija</i>	97
<i>Tablica 5.2 Prosječne dubine zone taljenja (mm) za različite protoke argona i helija</i>	98
<i>Tablica 5.3 Prosječne površine zone taljenja (mm²) za različite protoke argona i helija</i>	99
<i>Tablica 5.4 Vremenske promjene širine i dubine zone taljenja ovisno o stanju površine uzorka</i>	110
<i>Tablica 5.5 Zone taljenja za različite duljine električnog luka i vremena zavarivanja</i>	121
<i>Tablica 5.6 Prosječne širine zone taljenja (mm) i jednadžbe njezine vremenske promjene</i>	121
<i>Tablica 5.7 Prosječne penetracije (mm) i jednadžbe koje opisuju njezinu vremensku promjenu</i>	122
<i>Tablica 5.8 Prosječne površine zone taljenja (mm²) i jednadžbe njezine vremenske promjene</i>	123
<i>Tablica 5.9 Zone taljenja za različite vršne kutove volframove elektrode i vremena zavarivanja; duljina električnog luka 1,5 mm</i>	132
<i>Tablica 5.10 Zone taljenja za različite vršne kutove volframove elektrode i vremena zavarivanja; duljina električnog luka 3 mm</i>	132
<i>Tablica 5.11 Zone taljenja za različite vršne kutove volframove elektrode i vremena zavarivanja; duljina električnog luka 6 mm</i>	132
<i>Tablica 5.12 Prosječne širine zone taljenja (mm) i jednadžbe njezine vremenske promjene</i>	133
<i>Tablica 5.13 Prosječne dubine zone taljenja (mm) i jednadžbe njezine vremenske promjene</i>	133
<i>Tablica 5.14 Prosječne površine zone taljenja (mm²) i jednadžbe njezine vremenske promjene</i>	134

<i>Tablica 5.15 Zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina električnog luka 1,5 mm</i>	<i>143</i>
<i>Tablica 5.16 Zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina električnog luka 3 mm</i>	<i>143</i>
<i>Tablica 5.17 Zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina električnog luka 6 mm</i>	<i>144</i>
<i>Tablica 5.18 Prosječne širine zone taljenja (mm) i jednadžbe njezine vremenske promjene za TIG i P-TIG proces</i>	<i>144</i>
<i>Tablica 5.19 Prosječne dubine zone taljenja (mm) i jednadžbe njezine vremenske promjene za TIG i P-TIG proces</i>	<i>145</i>
<i>Tablica 5.20 Prosječne površine zone taljenja (mm²) i jednadžbe njezine vremenske promjene za TIG i P-TIG proces</i>	<i>146</i>
<i>Tablica 5.21 Maksimalni postignuti D/W omjer zone taljenja za istražene faktore</i>	<i>147</i>

Popis slika

<i>Slika 2.1 Osnovna procesna oprema za TIG zavarivanje</i>	5
<i>Slika 2.2 Pad napona u električnom luku</i>	6
<i>Slika 2.3 Elektro-magnetsko polje i smjer strujanja plazme u električnom luku</i>	7
<i>Slika 2.4 Generiranje i izmjena topline kod TIG zavarivanja</i>	8
<i>Slika 2.5 Prijenos topline u osnovnom metalu i sile koje pokreću konvekciju</i>	11
<i>Slika 2.6 Valni oblik impulsnog TIG zavarivanja i pripadni parametri</i>	14
<i>Slika 2.7 Shematski prikaz ciklusa izmjenične struje kod TIG zavarivanja</i>	14
<i>Slika 2.8 Osjetljivost austenitnih nehrđajućih čelika na pojavu vrućih pukotina [1]</i>	20
<i>Slika 2.9 Pojava pukotina za elektrolučno zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika, [53]</i> . 21	
<i>Slika 2.10 Utjecajni faktori na sklonost pojavi vrućih pukotina, [1] [51]</i>	22
<i>Slika 2.11 Promjena duktilnosti u funkciji temperature, [51]</i>	23
<i>Slika 2.12 Pojava pukotina uzrokovana naknadnom toplinskom obradom (legura 347), [51]</i> 24	
<i>Slika 2.13 Različiti oblici zone taljenja i smjer konvekcije koji na njih utječe, [15]</i>	25
<i>Slika 2.14 Površinska napetost u ovisnosti o temperaturi za leguru 316 [47]</i>	26
<i>Slika 2.15 Utjecaj jakosti struje na toplinsko opterećenje vodom hlađene bakrene anode, [66]</i>	28
<i>Slika 2.16 Utjecaj jakosti struje na omjer dubine penetracije i širine zavora (D/W), [9]</i>	29
<i>Slika 2.17 D/W omjer u ovisnosti o jakosti struje za leguru 304, [47]</i>	29
<i>Slika 2.18 Utjecaj jaskosti struje na D/W omjer, [67] i [10]</i>	30
<i>Slika 2.19 Utjecaj jakosti struje i različitih plinova na dubinu penetracije, [63]</i>	30
<i>Slika 2.20 Utjecaj brzine zavarivanja na D/W omjer, [47]</i>	32
<i>Slika 2.21 Utjecaj brzine zavarivanja na D/W omjer i udio kisika u metalu zavora, [67] i [10]</i>	32
<i>Slika 2.22 Utjecaj duljine električnog luka na omjer dubine penetracije i širine zavora (D/W) za uzorke s različitim udjelom sumpora u kemijskom sastavu, [9]</i>	34
<i>Slika 2.23 Promjena distribucijskog parametra i vrijednosti izmjerenog toplinskog opterećenja u ovisnosti o duljini električnog luka, [66]</i>	34
<i>Slika 2.24 Utjecaj duljine luka na D/W omjer zone taljenja, [47]</i>	35
<i>Slika 2.25 Utjecaj duljine luka na D/W omjer zone taljenja, [67] i [10]</i>	36
<i>Slika 2.26 Utjecaj duljine luka na dubinu penetracije, [72]</i>	36
<i>Slika 2.27 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na dubinu penetracije, [15]</i>	37
<i>Slika 2.28 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na distribuciju topline i električne energije na osnovnom metalu, [66]</i>	38
<i>Slika 2.29 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na geometriju zone taljenja, [47]</i>	38
<i>Slika 2.30 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer zone taljenja, [9]</i>	39

<i>Slika 2.31 Toplinsko opterećenja vodom hlađenje bakrene anode za različite zaštitne plinove, duljina električnog luka a) 2 mm i b) 9 mm, [66]</i>	<i>40</i>
<i>Slika 2.32 Zone taljenja u zaštitnoj atmosferi helija i njegovih mješavina s kisikom, [10].....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 2.33 Utjecaj udjela u Ar i He na dubinu zone taljenja, [10].....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 2.34 Utjecaj udjela kisika i duljine električnog luka na geometriju zone taljenja za plinske mješavine He-30%Ar-O₂ i He-50%Ar-O₂, [45].....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 2.35 Utjecaj kemijskog sastava vanjskog zaštitnog plina na zonu taljenja, [73]</i>	<i>42</i>
<i>Slika 2.36 Utjecaj udjela dušika u zaštitnom plinu argonu na zonu taljenja, [74].....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 2.37 Zone taljenja za (a) konvencionalni TIG proces i b)–d) visokofrekventni impulsni TIG proces s različitim frekvencijama impulsne struje f_H, [78].....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 2.38 Utjecaj jakosti vršne struje kod impulsnog TIG zavarivanja na geometriju zone taljenja i toplinski unos, [71]</i>	<i>46</i>
<i>Slika 2.39 Utjecaj frekvencije impulsne struje na zonu taljenja, [79]</i>	<i>46</i>
<i>Slika 3.1 Eksperimentalni postav korišten u istraživanju</i>	<i>49</i>
<i>Slika 3.2 Uređaj za kontrolu vremena rada izvora struje za zavarivanje.....</i>	<i>50</i>
<i>Slika 3.3 Karakteristične dimenzije zone taljenja</i>	<i>51</i>
<i>Slika 3.4 Termopar zavaren na donjoj strani uzorka.....</i>	<i>51</i>
<i>Slika 4.1 Temperaturni ciklusi na korijenskoj strani zavara</i>	<i>58</i>
<i>Slika 5.1 Mjerenje napona za vrijeme zavarivanja od 21 s</i>	<i>64</i>
<i>Slika 5.2 Toplinska vodljivost argona, helija i zraka u funkciji temperature [83]</i>	<i>65</i>
<i>Slika 5.3 Uobičajen oblik zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s.....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 5.4 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti</i>	<i>66</i>
<i>Slika 5.5 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti</i>	<i>66</i>
<i>Slika 5.6 D/W omjeri zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima</i>	<i>67</i>
<i>Slika 5.7 Površine poprečnog presjeka zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima</i>	<i>67</i>
<i>Slika 5.8 Toplinski ciklusi na sredini donje stane uzorka štíćene Ar i He</i>	<i>68</i>
<i>Slika 5.9 Uobičajen oblik zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 14 s.....</i>	<i>69</i>
<i>Slika 5.10 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti</i>	<i>69</i>
<i>Slika 5.11 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti</i>	<i>70</i>
<i>Slika 5.12 Zone taljenja formirane pod zaštitom korijenske strane zavara Ar i He</i>	<i>70</i>
<i>Slika 5.13 D/W omjeri zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima</i>	<i>71</i>
<i>Slika 5.14 Površine poprečnog presjeka zone taljenja</i>	<i>71</i>
<i>Slika 5.15 Toplinski ciklusi na sredini donje stane uzorka štíćene Ar i He</i>	<i>72</i>
<i>Slika 5.16 Uobičajen oblik zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s.....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 5.17 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti</i>	<i>73</i>
<i>Slika 5.18 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti</i>	<i>74</i>

<i>Slika 5.19 Zone taljenja nastale pod zaštitom korijenske strane zavara Ar i He.....</i>	<i>74</i>
<i>Slika 5.20 D/W omjeri zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima</i>	<i>75</i>
<i>Slika 5.21 Površine poprečnog presjeka zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima ..</i>	<i>75</i>
<i>Slika 5.22 Toplinski ciklusi na sredini donje stane uzorka štíćene Ar i He</i>	<i>76</i>
<i>Slika 5.23 Prikaz vremenske evolucije zone taljenja u intervalu od 7 s do 21 s</i>	<i>76</i>
<i>Slika 5.24 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zavara štíćena argonom</i>	<i>77</i>
<i>Slika 5.25 Promjena površine poprečnog presjeka zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zavara štíćena argonom</i>	<i>78</i>
<i>Slika 5.26 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zavara štíćena helijem</i>	<i>78</i>
<i>Slika 5.27 Promjena površine poprečnog presjeka zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zavara štíćena helijem</i>	<i>79</i>
<i>Slika 5.28 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zavara izložena zraku</i>	<i>80</i>
<i>Slika 5.29 Promjena površine poprečnog presjeka zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zavara izložena atmosferi</i>	<i>80</i>
<i>Slika 5.30 Vremenska evolucija širine zone taljenja za uzorke čija je korijenska strana zavara štíćena argonom, helijem ili izložena atmosferi.....</i>	<i>81</i>
<i>Slika 5.31 Vremenska evolucija dubine zone taljenja za uzorke čija je korijenska strana zavara štíćena argonom, helijem ili izložena atmosferi.....</i>	<i>82</i>
<i>Slika 5.32 Vremenska evolucija površine poprečnog presjeka zone taljenja za uzorke čija je korijenska strana zavara štíćena argonom, helijem ili izložena atmosferi.....</i>	<i>82</i>
<i>Slika 5.33 Širine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara</i>	<i>83</i>
<i>Slika 5.34 Dubine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara</i>	<i>84</i>
<i>Slika 5.35 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara</i>	<i>84</i>
<i>Slika 5.36 Površine poprečnog presjeka zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>85</i>
<i>Slika 5.37 Širine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>85</i>
<i>Slika 5.38 Dubine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>86</i>
<i>Slika 5.39 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>86</i>
<i>Slika 5.40 Površine poprečnog presjeka zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>87</i>
<i>Slika 5.41 Širine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara</i>	<i>87</i>
<i>Slika 5.42 Dubine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara</i>	<i>88</i>
<i>Slika 5.43 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara</i>	<i>88</i>

<i>Slika 5.44 Površine poprečnog presjeka zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>89</i>
<i>Slika 5.45 Širine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>89</i>
<i>Slika 5.46 Dubine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>90</i>
<i>Slika 5.47 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>90</i>
<i>Slika 5.48 Površine poprečnog presjeka zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>91</i>
<i>Slika 5.49 Širine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara</i>	<i>92</i>
<i>Slika 5.50 Dubine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara</i>	<i>92</i>
<i>Slika 5.51 Širine zone taljenja s korijenske strane za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>92</i>
<i>Slika 5.52 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara</i>	<i>93</i>
<i>Slika 5.53 Površine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara... </i>	<i>93</i>
<i>Slika 5.54 Širine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>94</i>
<i>Slika 5.55 Dubine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>95</i>
<i>Slika 5.56 Širine zone taljenja s korijenske strane za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>95</i>
<i>Slika 5.57 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>96</i>
<i>Slika 5.58 Površine poprečnog presjeka zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara.....</i>	<i>96</i>
<i>Slika 5.59 Promjena širine zone taljenja, korijenska strana zavara štíčena argonom.....</i>	<i>97</i>
<i>Slika 5.60 Promjena širine zone taljenja, korijenska strana zavara štíčena helijem.....</i>	<i>97</i>
<i>Slika 5.61 Promjena dubine zone taljenja, korijenska strana zavara štíčena argonom</i>	<i>98</i>
<i>Slika 5.62 Promjena dubine zone taljenja, korijenska strana zavara štíčena helijem.....</i>	<i>98</i>
<i>Slika 5.63 Promjena površine zone taljenja, korijenska strana zavara štíčena argonom</i>	<i>99</i>
<i>Slika 5.64 Promjena površine zone taljenja, korijenska strana zavara štíčena helijem.....</i>	<i>99</i>
<i>Slika 5.65 Zona taljenja za uzorke s površinom u a) izvornom stanju, b) brušenom gornjom stranom i c) brušenom gornjom i donjom stranom; vrijeme zavarivanja 7 s</i>	<i>100</i>
<i>Slika 5.66 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 7 s</i>	<i>101</i>
<i>Slika 5.67 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 7 s.....</i>	<i>101</i>
<i>Slika 5.68 D/W omjeri zone taljenja i njihove srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 7 s .</i>	<i>102</i>
<i>Slika 5.69 Površine poprečnog presjeka zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima, vrijeme zavarivanja 7 s</i>	<i>102</i>
<i>Slika 5.70 Zona taljenja za uzorke s površinom a) u izvornom stanju, b) s brušenom gornjom stranom i c) s brušenom gornjom i donjom stranom; vrijeme zavarivanja 14 s.....</i>	<i>103</i>
<i>Slika 5.71 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 14 s.....</i>	<i>103</i>
<i>Slika 5.72 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 14 s....</i>	<i>104</i>

<i>Slika 5.73 D/W omjeri zone taljenja s njihove srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 14 s</i>	104
<i>Slika 5.74 Površine poprečnog presjeka zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima, vrijeme zavarivanja 14 s</i>	105
<i>Slika 5.75 Toplinski ciklusi na sredini donje strane uzorka za tri različita stanja površine, vrijeme zavarivanja 14 s</i>	105
<i>Slika 5.76 Zona taljenja za uzorke s površinom u a) izvornom stanju, b) brušenom gornjom stranom i c) brušenom gornjom i donjom stranom; vrijeme zavarivanja 21 s</i>	106
<i>Slika 5.77 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 21 s</i>	106
<i>Slika 5.78 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 21 s</i>	107
<i>Slika 5.79 D/W omjeri zone taljenja i njihove srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 21 s</i>	107
<i>Slika 5.80 Površine poprečnog presjeka zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima, vrijeme zavarivanja 21 s</i>	108
<i>Slika 5.81 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, površine uzoraka u izvornom stanju</i>	109
<i>Slika 5.82 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, brušena gornja površina uzorka</i>	109
<i>Slika 5.83 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, brušena gornja i donja površina uzorka</i>	110
<i>Slika 5.84 Vremenska evolucija širine zone taljenja za uzorke s različitim stanjima površine</i>	111
<i>Slika 5.85 Vremenska evolucija dubine zone taljenja za uzorke s različitim stanjima površine</i>	111
<i>Slika 5.86 Pad napona u električnom luku duljine 1,5 mm, 3 mm i 6 mm</i>	112
<i>Slika 5.87 Zone taljenja za tri različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 7 s</i>	113
<i>Slika 5.88 Širina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 7 s</i>	113
<i>Slika 5.89 Dubina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 7 s</i>	114
<i>Slika 5.90 D/W omjer zone taljenja za različite duljine luka, vrijeme zavarivanja 7 s</i>	114
<i>Slika 5.91 Površina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 7 s</i>	115
<i>Slika 5.92 Zone taljenja za tri različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 14 s</i>	115
<i>Slika 5.93 Širina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 14 s</i>	116
<i>Slika 5.94 Dubina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 14 s</i>	116
<i>Slika 5.95 D/W omjer zone taljenja za različite duljine luka, vrijeme zavarivanja 14 s</i>	117
<i>Slika 5.96 Površina zone taljenja za različite duljine luka, vrijeme zavarivanja 14 s</i>	117
<i>Slika 5.97 Zone taljenja za tri različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 21 s</i>	118

<i>Slika 5.98 Širina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 21 s</i>	118
<i>Slika 5.99 Dubina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 21 s</i>	119
<i>Slika 5.100 D/W omjer zone taljenja za različite duljine luka, vrijeme zavarivanja 21 s.....</i>	119
<i>Slika 5.101 Površine zone taljenja za različite duljine luka, vrijeme zavarivanja 21 s</i>	120
<i>Slika 5.102 Vremenska promjena širine zone taljenja za različite duljine električnog luka..</i>	121
<i>Slika 5.103 Vremenska promjena dubine zone taljenja za različite duljine električnog luka</i>	122
<i>Slika 5.104 Vremenska promjena površine zone taljenja za različite duljine električnog luka</i>	123
<i>Slika 5.105 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 1,5 mm</i>	124
<i>Slika 5.106 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 1,5 mm...</i>	124
<i>Slika 5.107 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 3 mm</i>	125
<i>Slika 5.108 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 1,5 mm...</i>	125
<i>Slika 5.109 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 6 mm</i>	125
<i>Slika 5.110 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 6 mm.....</i>	126
<i>Slika 5.111 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 1,5 mm</i>	126
<i>Slika 5.112 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 1,5 mm...</i>	127
<i>Slika 5.113 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 3 mm</i>	127
<i>Slika 5.114 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 3 mm.....</i>	128
<i>Slika 5.115 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 6 mm</i>	128
<i>Slika 5.116 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 6 mm.....</i>	128
<i>Slika 5.117 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 1,5 mm</i>	129
<i>Slika 5.118 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 1,5 mm...</i>	129
<i>Slika 5.119 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 3 mm</i>	130
<i>Slika 5.120 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 3 mm.....</i>	130
<i>Slika 5.121 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 6 mm</i>	131
<i>Slika 5.122 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 6 mm.....</i>	131
<i>Slika 5.123 Vremenska promjena širine zone taljenja za vršni kut volframove elektrode od 20 ° i 45 ° i različite duljine električnog luka</i>	133

<i>Slika 5.124 Vremenska promjena dubine zone taljenja za vršni kut volframove elektrode od 20 ° i 45 ° i različite duljine električnog luka</i>	<i>134</i>
<i>Slika 5.125 Vremenska promjena površine zone taljenja za vršni kut volframove elektrode od 20 ° i 45 ° i različite duljine električnog luka</i>	<i>134</i>
<i>Slika 5.126 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm..</i>	<i>135</i>
<i>Slika 5.127 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm</i>	<i>136</i>
<i>Slika 5.128 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 3 mm</i>	<i>136</i>
<i>Slika 5.129 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 3 mm</i>	<i>136</i>
<i>Slika 5.130 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 6 mm</i>	<i>137</i>
<i>Slika 5.131 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 6 mm</i>	<i>137</i>
<i>Slika 5.132 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm..</i>	<i>138</i>
<i>Slika 5.133 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm</i>	<i>138</i>
<i>Slika 5.134 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 3 mm</i>	<i>138</i>
<i>Slika 5.135 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 3 mm</i>	<i>139</i>
<i>Slika 5.136 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 6 mm</i>	<i>139</i>
<i>Slika 5.137 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 6 mm</i>	<i>140</i>
<i>Slika 5.138 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm..</i>	<i>140</i>
<i>Slika 5.139 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm</i>	<i>141</i>
<i>Slika 5.140 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 3 mm</i>	<i>141</i>
<i>Slika 5.141 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 3 mm</i>	<i>141</i>
<i>Slika 5.142 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 6 mm</i>	<i>142</i>
<i>Slika 5.143 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 6 mm</i>	<i>142</i>
<i>Slika 5.144 Vremenska promjena širine zone taljenja za TIG i P-TIG proces uz različite duljine električnog luka</i>	<i>145</i>
<i>Slika 5.145 Vremenska promjena dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces uz različite duljine električnog luka</i>	<i>145</i>
<i>Slika 5.146 Vremenska promjena površine zone taljenja za TIG i P-TIG proces uz različite duljine električnog luka</i>	<i>146</i>

Popis kratica

Kratica	Značenje
AC	izmjenična struja
AC-TIG	TIG zavarivanje izmjeničnom strujom
A-TIG	TIG zavarivanje podpomognuto aktivnim premazima
B	gustoća magnetskog polja
D	dubina zone taljenja (penetracija)
DC	istosmjerna struja
DCEN-TIG	TIG zavarivanje istosmjernom strujom s negativnim polom na elektrodi
DCEP-TIG	TIG zavarivanje istosmjernom strujom s pozitivnim polom na elektrodi
D/W omjer	omjer penetracije i širine zone taljenja
F	elektromagnetska sila
FZA	površina poprečnog presjeka zone taljenja
HW-TIG	TIG zavarivanje vrućom žicom
I	jakost struje
K-TIG	TIG zavarivanje ključanicom
LTE	stanje lokalne termodinamičke ravnoteže u električnom luku
P-TIG	TIG zavarivanje impulsnom strujom
T	temperatura
TIG	elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
T_s	solidus temperatura
T_l	likvidus temperatura
U	napon električnog luka
W	širina zone taljenja
WT	vrijeme zavarivanja

1. UVOD

1.1. Motivacija

Austenitni nehrđajući čelici spadaju u grupaciju metala koji imaju izvrsnu otpornost na koroziju. Osim toga, dobro podnose visoke i niske temperature zbog čega se često koriste u zahtjevnim radnim okolinama kakvih u modernoj industriji ima sve više. Složenije konstrukcije izrađene od austenitnog nehrđajućeg čelika u pravilu zahtijevaju spajanje sastavnih dijelova zavarivanjem. Iako im je zavarljivost relativno dobra, zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika može uzrokovati niz poteškoća kao što su nastanak pukotina i smanjena otpornost na koroziju u području zavarenog spoja [1].

Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina ili TIG (Tungsten Inert Gas) zavarivanje često se koristi za spajanje nehrđajućih čelika. Pravilnom upotrebom TIG procesa moguće je izbjeći uobičajene poteškoće koje prate zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika i tako ostvariti zavareni spoj odlične kvalitete [2]. Kvalitetan zavareni spoj konstrukciji osigurava ispunjavanje svih tehničkih zahtjeva u pogledu mehaničkih svojstava, zadane geometrije i funkcije koju mora ispunjavati u predviđenim radnim uvjetima. Unatoč prividnoj jednostavnosti TIG zavarivanja, utjecaj zavarivačkih parametara na proces veoma je složen zbog čega još uvijek postoji prostor za daljnje poboljšanje kontrole nad procesom. Konvencionalni TIG proces nažalost karakterizira niska produktivnost što se očituje kroz relativno široku zonu taljenja i malu dubinu penetracije (dubina zone taljenja) [3].

Oblik i dimenzije zone taljenja spadaju u važne karakteristike zavarenog spoja zbog čega su često predmet znanstvenih istraživanja. Postizanje željenog oblika zone taljenja važno je zbog niza razloga. Kontrola nad geometrijom zone taljenja omogućuje formiranje zavarenog spoja propisanih dimenzija i smanjuje mogućnost pojave grešaka u zavarenom spoju. Također, povećanje dubine zone taljenja pozitivno utječe na produktivnost procesa dok povoljnija geometrija zone taljenja smanjuje unos topline i deformacije zavarene konstrukcije. Kontrola nad geometrijom zone taljenja važna je i za napredak modernih aditivnih tehnologija proizvodnje koje koriste zavarivačke procese i iskazuju veliki potencijal za industrijsku primjenu [4]. Treba naglasiti kako je formiranje zone taljenja složen proces na kojeg izravno utječe količina topline koja se generira u električnom luku te dinamika kojom se ta toplota prenosi i širi kroz osnovni metal [5], [6]. Iako je količina rastaljenog metala u pravilu mala, konvektivni prijenos topline unutar taline može imati značajan utjecaj na dimenzije i geometriju zone taljenja, posebno kod metala koji imaju relativno malu toplinsku vodljivost poput austenitnog nehrđajućeg čelika [7], [8].

Istraživanja koja analiziraju zonu taljenja kod TIG procesa često imaju za cilj odrediti kako na oblik i dimenzija zone taljenja utječe odabir osnovnih procesnih zavarivačkih parametara poput jakosti struje, brzine zavarivanja, duljine električnog luka, vršnog kuta volframove elektrode te kemijskog sastava zaštitnog plina [9], [10], [11]. Autori pojedinih istraživanja svoje su napore usmjerili i na pronalazak praktičnih načina kako povećati dubinu penetracije kod TIG zavarivanja. Tako su razvijene i novije inačice TIG procesa poput impulsnog TIG zavarivanja (P-TIG), TIG zavarivanja potpomognutog aktivnim premazima (A-TIG) ili TIG zavarivanja ključanicom (K-TIG) [12], [13], [14]. Treba naglasiti i kako je dokazano da veoma mala odstupanja u količini površinskih aktivnih elemenata poput sumpora i kisika u kemijskom sastavu osnovnog metala mogu rezultirati značajno drugačijim dimenzijama zone taljenja uz jednake TIG zavarivačke parametre što može narušiti procesnu ponovljivost [4], [15]. Velika većina istraživanja koja proučavaju zonu taljenja kod TIG procesa odnose se na zavarivačku

konfiguraciju u kojoj se izvor topline (električni luk) giba brzinom zavarivanja dok je stacionarno zavarivačka konfiguracija znatno manje zastupljena. Međutim, stacionarno djelovanje električnog luka na osnovni metal veoma je važno budući da je prisutno na početku svakog zavarenog spoja u fazi formiranja taline. Štoviše, na stacionarnoj zavarivačkoj konfiguraciji temelji se proces točkastog zavarivanja, a često se koristi i kod pripajanja djelova koji se trebaju zavariti. Sve navedeno upućuje na potrebu za dodatnim istraživanjem u smjeru stacionarnog djelovanja električnog luka kod TIG procesa na osnovni metal.

Motivacija za istraživanje provedeno u sklopu ovog doktorskog rada proizlazi iz činjenice da unatoč velikom napretku na području tehnologije zavarivanja, još uvijek postoji potreba za boljim razumijevanjem TIG zavarivanja, njegove interakcije s osnovnim metalom i procesne ponovljivosti. Složenost TIG procesa proizlazi iz velikog broja procesnih parametara, odnosno njihovog utjecaja na složena fizikalna zbivanja u električnom luku i osnovnom metalu. U istraživanju je za osnovni metal odabran nehrđajući austenitni čelik 316L. Ova odluka motivirana je važnom ulogom austenitnih nehrđajućih čelika u zahtjevnim radnim okolinama moderne industrije te mogućnošću kvalitetnog spajanja TIG zavarivanjem. Istraživanje koje rezultira novim spoznajama o utjecaju zavarivačkih parametara na oblik i dimenzije zone taljenja kod austenitnih nehrđajućih čelika može poboljšati produktivnost i kontrolu nad TIG procesom te omogućiti formiranje kvalitetnijih zavarenih spojeva. Također, analiza vremenske evolucije zone taljenja za stacionarnu TIG konfiguraciju, rijetko zastupljenu u dosadašnjim istraživanjima, može doprinijeti potpunijem razumijevanju ovog zavarivačkog procesa i njegovih učinaka na osnovni metal.

1.2. Hipoteza

Oblik i dimenzije zone taljenja spadaju u važne karakteristike zavarenog spoja, a poznavanje faktora koji na njih utječu poboljšava kontrolu nad procesom zavarivanja i njegovu ponovljivost. Na temelju pregleda dosadašnjih istraživanja u kojima se analizirao oblik i dimenzije zone taljenja kod TIG zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika može se formirati sljedeća hipoteza:

- odabirom odgovarajućih zavarivačkih parametara kod stacionarnog autogenog TIG procesa moguće je postići željeni profil zone taljenja tako da se maksimizira omjer dubine penetracije i širine zone taljenja (D/W omjer) na austenitnom nehrđajućem čeliku 316L.

1.3. Znanstveni doprinos

Znanstveni doprinos u ovoj doktorskoj disertaciji ostvaren je u području istraživanja koje je definirano na temelju detaljnog uvida u postojeću znanstvenu literaturu povezanu s TIG zavarivanjem austenitnih nehrđajućih čelika i provedbe niza preliminarnih eksperimenata. Sistematski pregled dostupne literature ukazao je na nekoliko potencijalno važnih nedostataka u dosadašnjim istraživanjima, a preliminarni eksperimenti potvrdili su izvedivost daljnjeg istraživanja u ovom smjeru.

Prije svega, uočeno je kako stacionarno TIG zavarivanje nije dovoljno zastupljeno u literaturi unatoč neospornoj važnosti ove zavarivačke konfiguracije. Naime, na njoj se temelji proces točkastog zavarivanja, a često se koristi i za pripajanje djelova koji će se zavariti. Osim toga, električni luk u pravilu je stacionaran na početku svakog zavarenog spoja, tijekom faze

formiranja taline. Sukladno navedenom, znanstveni doprinosi u ovoj doktorskoj disertaciji uključuju:

- utvrđivanje odnosa između karakterističnih dimenzija zone taljenja i odabranih zavarivačkih parametara za proces stacionarnog TIG zavarivanja,
- određivanje kombinacije zavarivačkih parametara koji maksimiziraju D/W omjer zone taljenja za proces stacionarnog TIG zavarivanja,
- određivanje utjecaja vrste i protoka plina s korijenske strane zavara na dimenzije zone taljenja,
- određivanje utjecaja stanja površine osnovnog metala na dimenzije zone taljenja i
- usporedba zona taljenja formiranih konvencionalnim TIG i impulsnim TIG (P-TIG) procesima jednake efektivne jakosti struje.

Svi eksperimenti provedeni su na austenitnom nehrđajućem čeliku 316L. Ovakvih podataka za stacionarnu zavarivačku TIG konfiguraciju u postojećoj literaturi nedostaje, budući da se u velikoj većini eksperimentalnih istraživanja analizira zona taljenja nastala pod djelovanjem električnog luka koji nije stacionaran nego se giba brzinom zavarivanja.

1.4. Organizacija disertacije

Ova doktorska disertacija podjeljena je na šest poglavlja. U prvom poglavlju disertacije (*Uvod*) predstavljena je motivacija za istraživanje, postavljena je znanstvena hipoteza i sažeto prikazan znanstveni doprinos.

Kroz drugo poglavlje disertacije (*Pregled područja istraživanja*) detaljno je opisan TIG proces, procesna oprema i električni luk. Pojašnjena je fizika na kojoj se proces temelji i predstavljeni osnovni zavarivački parametri. Potom su opisana svojstva austenitnog nehrđajućeg čelika kojoj pripada i legura 316L (osnovni metal u istraživanju). U nastavku poglavlja sistematizirana je postojeća znanstvena literatura u kojoj je analiziran utjecaj kemijskog sastava osnovnog metala i osnovnih zavarivačkih parametara TIG procesa na geometriju zone taljenja kod austenitnih nehrđajućih čelika. Na osnovi provedene analize definiran je i prostor za istraživanje.

U trećem poglavlju (*Opis metodologije istraživanja*) opisana je metodologija znanstvenog istraživanja primjenjena u ovom doktorskom radu. Opisan je ispitni sustav koji omogućuje kontrolirano djelovanje autogenog stacionarnog TIG procesa na uzorke, postupak mjerenja dimenzija zone taljenja te postupak mjerenja temperature termoparovima. Za svaki od faktora čiji je utjecaj na zonu taljenja istražen predstavljen je i pripadni eksperimentalni plan.

U četvrtom poglavlju disertacije (*Rezultati*) tablično su prikazani svi rezultati mjerenja karakterističnih dimenzija zone taljenja (dubina, širina, površina u poprečnom presjeku). Podpoglavlja su formirana tako da obrađuju faktore čiji je utjecaj na dimenzije zone taljenja istražen.

U petom poglavlju disertacije (*Rasprava*) provedena je detaljna analiza predstavljenih rezultata istraživanja. Pripadna podpoglavlja formirana su također tako da obrađuju faktore čiji je utjecaj na zonu taljenja analiziran: vrsta plina s korijenske strane zavara, protok zaštitnog plina s korijenske strane zavara, stanje površine osnovnog metala, duljina električnog luka, vršni kut volframove elektrode i impulsno TIG zavarivanje (P-TIG).

U završnom odnosno šestom poglavlju disertacije (*Zaključci*) izvedeni su svi zaključci koji su proizašli iz provedenog istraživanja.

2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

2.1 Osnove TIG zavarivanja

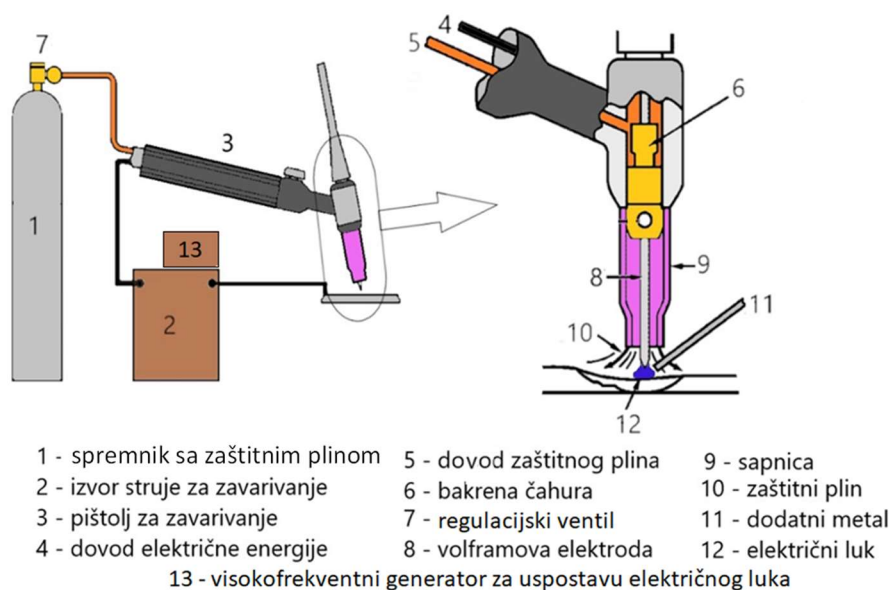
Proces elektrolučnog zavarivanja netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina razvio se početkom Drugog svjetskog rata u Sjedinjenim Američkim Državama za potrebe zavarivanje aluminija i magnezija u zrakoplovnoj industriji. Ovaj proces poznatiji je pod skraćenicama TIG (engl. *Tungsten Inert Gas*), GTAW (engl. *Gas Tungsten Arc Welding*) i na njemačkom govornom području WIG (njem. *Wolfram Inertgas*). Izvorno je nazvan 'Heliarc' jer se u ulozi zaštitnog plina prvotno koristio helij (He), u to vrijeme relativno jeftin i dostupan u Americi. Kasnije, na području Europe, helij je zamjenjen jeftinijim argonom (Ar), a stari naziv procesa postupno je odbačen. TIG proces zahtijeva korištenje inertnog zaštitnog plina (najčešće argon, helij i njihove mješavine) zbog kemijske reaktivnosti volframove elektrode na visokim temperaturama. TIG procesom mogu se zavariti gotovo svi metali, a čest je odabir za spajanje nehrđajućih čelika te legura aluminija, titana, nikla i magnezija. Relativno jednostavno se automatizira, pri čemu je kontrola nad procesom odvojena od kontrole nad dobavom dodatnog metala, što povećava fleksibilnost prilikom odabira zavarivačkih parametara. TIG zavarivanjem moguće je postići iznimno visoku kvalitetu zavarenog spoja, a kao glavni nedostatak ističe se relativno niska produktivnost procesa [2], [3].

Taljenje metala tijekom TIG zavarivanja ostvaruje se pomoću električnog luka koji predstavlja intenzivan izvor topline. Luk nastaje uslijed električnog pražnjenja, odnosno prolaska električne energije kroz ionizirani zaštitni plin između volframove elektrode i osnovnog metala. Elektroda i osnovni metal mogu biti pozitivno ili negativno nabijeni, tj. imati ulogu anode ili katode. Katoda emitira negativno nabijene elektrone, nositelje naboja koji se pod djelovanjem električnog polja gibaju prema pozitivno nabijenoj anodi.

Kako su inertni plinovi na niskim i povišenim temperaturama električni izolatori i ne sadrže slobodne nositelje naboja potrebno ih je ionizirati, odnosno dovesti u električki-vodljivo plazma stanje. Plazma je četvrto agregatno stanje tvari, a definira se kao ionizirani plin koji sadrži dovoljnu količinu nositelja naboja (slobodni elektroni i ioni) zbog čega ima dobru električnu vodljivost. Ionizacija zaštitnog inertnog plina kod TIG zavarivanja može se provesti na dva temeljna načina: emisijom polja ili termoemisijom. Emisija polja ne zahtijeva dodir volframove elektrode i osnovnog metala, a ionizaciju omogućuje struja visoke frekvencije i napona, koja je generirana za potrebe uspostave električnog luka. Termoemisija, s druge strane, zahtijeva kratki spoj ili dodir elektrode i osnovnog metala. Kratki spoj uzrokuje lokalno zagrijavanje u točki dodira što dovodi do ionizacije zaštitnog plina prilikom odvajanja elektrode od osnovnog metala. Nakon formiranja električnog luka, u njemu se neprestano oslobađa toplina koja omogućava održavanje zaštitnog plina u ioniziranom stanju, bez vanjske pobude. Glavnim ili većinskim nositeljima naboja u električnom luku smatraju se primarno elektroni, budući da su zbog manje mase značajno mobilniji od iona.

2.2 Procesna oprema

Oprema za TIG zavarivanje relativno je jeftina, pouzdana i lako prenosiva, a njezini osnovni sastavni dijelovi prikazani su na slici 2.1. Uređaji koji mogu isporučiti veliku jakost struje imaju i sustav vodenog hlađenja koji sprječava pregrijavanje kritičnih dijelova. U slučaju korištenja dodatnog metala, njegova dobava može biti ručna ili mehanizirana.



Slika 2.1 Osnovna procesna oprema za TIG zavarivanje

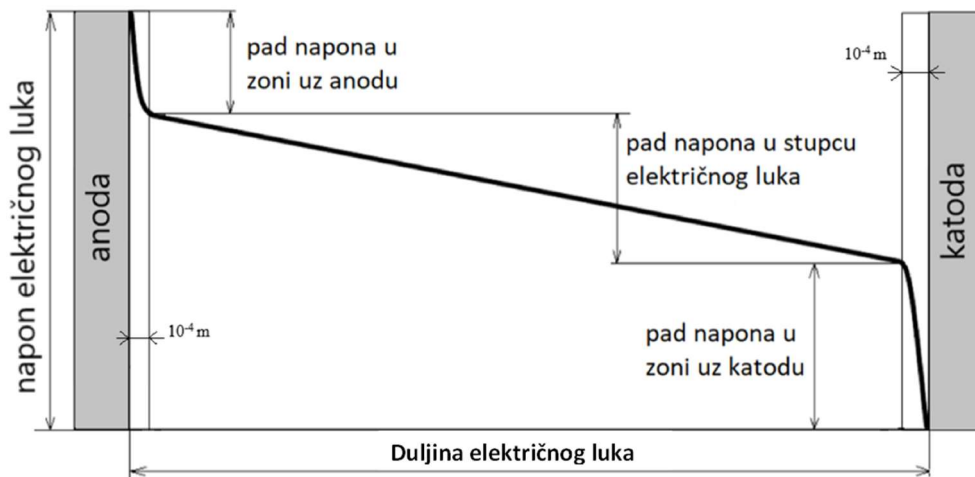
Izvori struje za TIG zavarivanje u pravilu imaju strmo padajuću statičku karakteristiku koja osigurava približno konstantu jakost struje [2]. Industrija uređaja za zavarivanje neprestano je pratila napredak elektronike pa se razvojem poluvodičke tehnologije dogodila prava revolucija izvora struje za zavarivanje. Suvremeni, elektronički kontrolirani uređaji za zavarivanje iskazuju brojne prednosti u odnosu na uređaje starijih generacija: znatno su laganiji i kompaktniji, imaju puno brži dinamički odziv, a često mogu isporučiti istosmjernu (DC) ili izmjeničnu struju [16], [17]. Uz izvor struje za zavarivanje vezuje se nekoliko zavarivačkih parametara poput jakosti struje, vrste struje (istosmjerna ili izmjenična) te valnog oblika isporučene struje. U slučaju korištenja impulsne struje za zavarivanje, na izvoru struje odabire se vrijeme trajanja i intenzitet bazne i vršne jakosti struje.

2.3 Električni luk kod TIG zavarivanja

Električni luk, izvor topline kod TIG zavarivanja, nastaje kao posljedica električnog pražnjenja između anode i katode. Pražnjenje se odvija u plazmi nastaloj ionizacijom zaštitnog plina, a popraćeno je visokim temperaturama i intenzivnim zračenjem. Dobru električnu vodljivost plazme, medija u plinovitom agregatnom stanju, osigurava velika količina slobodnih nositelja naboja (elektroni i pozitivno nabijeni ioni zaštitnog plina) koji se u njoj nalaze. Iako je broj slobodnih elektrona i pozitivno nabijenih iona u plazmi približno jednak, elektroni se smatraju glavnim nositeljima električne energije budući da je njihova pokretljivost značajno veća [5]. Električni luk kod TIG zavarivanja poprima zvonolik oblik jer je uz ravnu plohu osnovnog metala luk relativno širok, a prostorno se sužava uz volframovu elektrodu relativno malog promjera. Kod većine zavarivačkih procesa, pa tako i kod TIG zavarivanja, duljina električnog luka ili udaljenost između anode i katode se obično mjeri u milimetrima tj. reda je veličine 10^{-3} m.

Prolaskom električne energije kroz električni luk, između anode i katode javlja se značajan pad napona. Ovaj pad napona u električnom luku rezultira oslobađanjem Joulove topline, nužne za održavanje zaštitnog plina na visokoj temperaturi, u ioniziranom (plazma) stanju. Temperature koje se pojavljuju u električnom luku TIG procesa mogu prelaziti 20 000 K [18]. Električni luk ima tri karakteristične zone bitno različitih karakteristika: granični sloj uz anodu, granični sloj

uz katodu i stupac električnog luka [19]. Zbroj pripadnih padova napona u svakoj od zona odgovara ukupnom padu napona u električnom luku, slika 2.2. Zone neposredno uz katodu i anodu mogu dodatno podijeliti na nekoliko podzona [20] ali takva analiza ulazi dublje u fiziku plazme, izvan okvira ovog poglavlja.



Slika 2.2 Pad napona u električnom luku

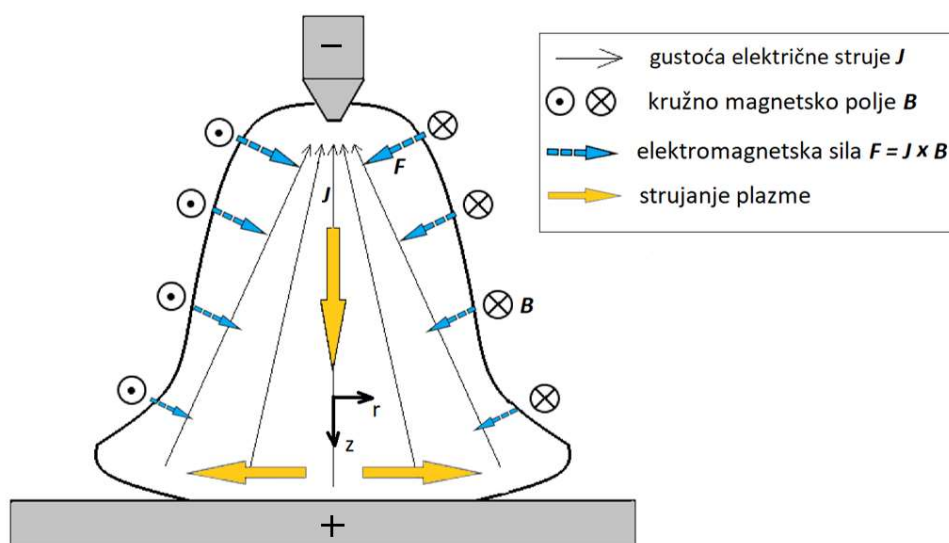
Stupac električnog luka zauzima gotovo cijelu dužinu električnog luka. Ovu zonu obilježava relativno malen pad napona po jedinici duljine, a rezultirajuće električno polje (gradijent napona) ima konstantan intenzitet i znatno je slabije u usporedbi sa zonama neposredno uz katodu i anodu. Ukupan pad napona u stupcu električnog luka ovisi o kemijskom sastavu zaštitnog plina, duljini luka, jakosti struje zavarivanja te geometriji anode i katode. Stupac električnog luka ima neutralan prostorni naboj jer sadržava približno jednak broj negativnih (elektroni) i pozitivnih (ioni) nositelja naboja. Ovdje prisutni elektroni, pozitivni ioni i neutralni atomi imaju približno jednaku temperaturu zbog učestalih međusobnih sudara prilikom kojih intenzivno izmjenjuju energiju — za opisano stanje u stupcu električnog luka kaže se da iskazuje lokalnu termodinamičku ravnotežu (LTE) [5], [6], [21].

U katodnom graničnom sloju, odnosno zoni električnog luka neposredno uz katodu, odvija se emisija elektrona i ionizacija zaštitnog plina. Atomi zaštitnog plina ioniziraju se izbijanjem elektrona iz njihovog elektronskog omotača, a ovo izbijanje uzrokuju elektroni emitirani iz katode koji uslijed ubrzanja u električnom polju velikom brzinom udaraju u atome zaštitnog plina. Mehanizam emisije elektrona iz katode temelji se na emisiji polja i termoemisiji, a koji od njih prevladava ovisi o temperaturi katode. Na nižim temperaturama aktivna je emisija polja, a zagrijavanjem katode na visoke temperature dominaciju preuzima termoemisija. Većina tehničkih metala ne može termoemisijom isporučiti dovoljan broj elektrona za postizanje uobičajenih jakosti struje pri zavarivanju jer je temperatura na kojoj bi to bilo moguće znatno viša od njihovog tališta. Zbog navedenog se većina tehničkih metala svrstava u tzv. hladne katode kod kojih pri emitiranju elektrona prevladava mehanizam emisije polja. Jedna od iznimki je volfram koji zbog visokog tališta ima odličnu sposobnost termoemisije i spada u tzv. vruće katode. Energiju potrebnu za emitiranje elektrona s katodne površine u slučaju emisije polja osigurava snažno električno polje u katodnom graničnom sloju, a u slučaju termoemisije energija proizlazi iz visoke temperature na koju je katoda zagrijana. Intenzitet električnog polja u katodnom graničnom sloju, bez obzira na mehanizam termoemisije, svakako je mnogo veći u usporedbi s intenzitetom električnog polja u stupcu električnog luka. Snažno polje posljedica je neto-pozitivnog prostornog naboja koje prevladava u zoni uz katodnu površinu. Broj

pozitivno nabijenih iona značajno nadmašuje broj prisutnih elektrona zato jer ih privlači negativni naboj katode. U katodnom graničnom sloju temperatura elektrona znatno je veća od temperature iona i neutralnih atoma koji se tu nalaze, tj. ne postoji lokalna termodinamička ravnoteža. Debljina katodnog graničnog sloja reda je veličine 10^{-4} m, a uobičajeni padovi napona koji se javljaju u ovoj zoni iznose od 10 V do 20 V [5], [22].

Elektroni u zadnjoj fazi gibanja kroz električni luk prolaze kroz anodni granični sloj. Općenito, pad napona u ovom području manji je u odnosu na katodni granični sloj, a iznosi od 1 V do 10 V, ovisno o jakosti struje i metalu anode. Debljina anodnog graničnog sloja reda je veličine 10^{-4} m, što u kombinaciji s navedenim padom napona rezultira snažnim električnim poljem. Pozitivno nabijena anoda privlači elektrone, stoga anodni granični sloj iskazuje neto-negativan prostorni naboj uslijed većeg broja elektrona u odnosu na pozitivno nabijene ione zaštitnog plina u ovom području. Temperatura prisutnih elektrona veća je od temperature iona tj. postoji odstupanje od lokalne termodinamičke ravnoteže, slično kao i u katodnom graničnom sloju [5], [6].

Prolaskom električne energije kroz električni luk oko njega se generira kružno magnetsko polje. Pritom na nositelje naboja koji se gibaju kroz električni luk djeluje Lorentzova sila. Statička komponenta Lorentzove sile, uzrokovana električnim poljem, u procesima zavarivanja obično je zanemariva u odnosu na elektromagnetsku komponentu [5]. Elektromagnetska sila vektorski je umnožak gustoće magnetskog polja B i gustoće električne struje J , a djeluje u smjeru okomitom na ravninu koja sadržava vektore B i J , slika 2.3.



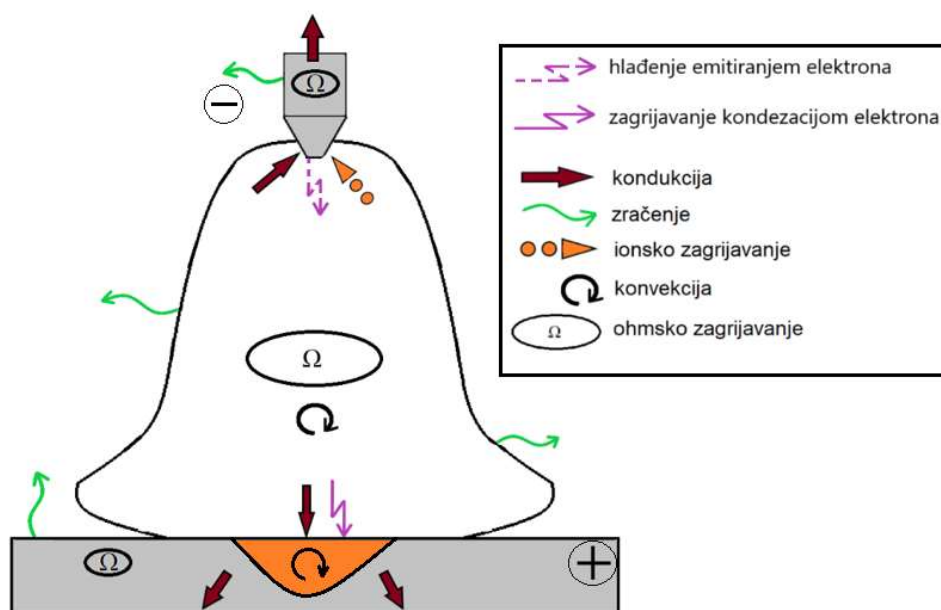
Slika 2.3 Elektro-magnetsko polje i smjer strujanja plazme u električnom luku

Elektromagnetska sila ima snažan utjecaj na električni luk, a kod nekih zavarivačkih procesa i važnu ulogu u prijenosu dodatnog metala. Radijalna komponenta elektromagnetske sile, obično značajno veća od aksijalne, djeluje na električni luk nastojeći ga sažeti prema uzdužnoj osi elektrode. Zbog različite gustoće električne struje intenzitet elektromagnetske sile nije jednak kroz cijeli električni luk — elektromagnetska sila smanjuje se udalžavanjem od volframove elektrode — što rezultira razlikom tlakova u električnom luku. Ova razlika u tlaku pokretač je intenzivnog aksijalnog strujanja plazme iz područja većeg tlaka uz volframovu elektrodu prema području manjeg tlaka uz osnovni metal. Približavajući se osnovnom metalu smjer strujanja plazme mijenja se iz aksijalnog u radijalni, djelujući pritom tlakom na površinu osnovnog

metala. Tlak uslijed strujanja plazme ima približno Gaussovu razdiobu na osnovnom metalu, a naziva se i tlakom električnog luka. Brzina strujanja plazme i tlak električnog luka ovise o duljini električnog luka, obliku vrha volframove elektrode i jakosti struje zavarivanja [5], [8], [23]. Aksijalna brzina strujanja plazme može postići veoma visoke vrijednosti: za vršni kut volframove elektrode od 60° i struju jakosti 200 A izmjerena brzina strujanja plazme u električnom luku iznosi približno 300 m/s [24]. Uz jednak vršni kut volframove elektrode tlak kojim električni luk jakosti 300 A i duljine 8 mm djeluje na osnovni metal nešto je manji od 2000 Pa [25]. Opisano strujanje plazme u električnom luku djeluje na tekući metal na dva načina:

- aksijalno strujanje plazme proizvodi tlak koji uzrokuje deformaciju (depresiju) slobodne površine tekućeg metala,
- radijalno strujanje plazme rezultira silom otpora na površini tekućeg metala koja djeluje od centra prema rubu taline.

Poznavanje osnovnih fizikalnih zbivanja u električnom luku i njegovim zonama preduvjet su za fundamentalno razumijevanje toplinske interakcije između luka, osnovnog metala i volframove elektrode. Pojednostavljena skica generirane topline i njezinog prijenosa u sustavu volframova elektroda-električni luk-osnovni metal za DCEN TIG konfiguraciju prikazan je na slici 2.4.



Slika 2.4 Generiranje i izmjena topline kod TIG zavarivanja

Toplina generirana u električnom luku nastaje kao posljedica intenzivnog ohmskog zagrijavanja. Naime, električni luk pruža otpor prolasku električne energije kroz njega uslijed čega se generira Ohmova toplina. Temperaturno polje koje se razvija u električnom luku pod snažnim je utjecajem konvektivnog prijenosa topline (strujanje plazme), a pripadnu ulogu ima i Thomsonov efekt koji obuhvaća komponentu prijenosa topline uzrokovanu gibanjem elektrona kroz vodič u kojem postoji temperaturni gradijent (električni luk). Dio topline generirane u električnom luku gubi se zračenjem i konvekcijom prema okolini, a dio konduktivnim prijenosom prelazi na stijenke relativno hladne anode i katode [5]. Ukupni gubitci topline iz električnog luka određuju njegovu iskoristivost koja se definira kao omjer topline koja je prenesena u osnovni metal i ukupno generirane topline u električnom luku [19],

[26]. U literaturi je moguće pronaći širok raspon vrijednosti za iskoristivost električnog luka: vrijednosti od 0,36 do 0,9 za DCEN TIG konfiguraciju te od 0,21 do 0,83 za AC TIG konfiguraciju [26], [27].

2.4 Fizika TIG zavarivanja

U ovom podpoglavlju pojašnjene su osnove fizike TIG zavarivanja. Naglasak je stavljen na DCEN TIG konfiguraciju koja se koristi za zavarivanje nehrđajućih čelika. Poznavanje fundamentalnih zbivanja u pozadini TIG procesa važan je temelj za razumijevanje utjecaja zavarivačkih parametara na osnovni metal.

Toplinsko opterećenje volframove elektrode

Kod zavarivačke konfiguracije DCEN, uobičajene za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika, volframova elektroda emitira elektrone termoemisijom. Maksimalne temperature izmjerene na vrhu elektrode, neposredno uz električni luk, dosežu gotovo 4500 °C za elektrodu od tehnički čistog volframa. Legiranjem volframa malim količinama različitih oksida vršna temperatura snižava se na vrijednost oko 3500 °C [28]. Na ovako visokim temperaturama, sukladno Richardson-Dushmanovom zakonu, volfram može termoemisijom emitirati dovoljno elektrona za postizanje električnog toka uobičajenog za elektrolučno zavarivanje [5].

Na slici 2.4 shematski su prikazana tri temeljna mehanizma zagrijavanja volframove elektrode u DCEN konfiguraciji:

- konduktivni prijenos topline iz električnog luka,
- ionsko zagrijavanje i
- ohmsko zagrijavanje.

Konduktivni prijenos topline uzrokuje razlika u temperaturi između električnog luka neposredno uz elektrodu i površine elektrode s kojom je luk u dodiru. Ionsko zagrijavanje posljedica je oslobađanja energije uslijed neutralizacije pozitivnih iona zaštitnog plina na negativno nabijenoj katodnoj površini. Elektroda se također zagrijava elektrootporno, toplinom koja se razvija kao posljedica prolaska električne energije kroz elektrodu relativno malog promjera [29].

Toplina koja tijekom zavarivanja u DCEN konfiguraciji prelazi na volframovu elektrodu s nje se odvodi na tri načina:

- kondukcijom prema hladnijem dijelu elektrode,
- zračenjem prema okolini i
- emitiranjem elektrona s katodne površine.

Kondukcija je posljedica temperaturnog gradijenta unutar same elektrode, a prijenos topline zračenjem rezultat je razlike u temperaturi elektrode i njene okoline. Emitiranje elektrona s katodne površine dominantan je mehanizam njezinog hlađenja. Naime, svaki elektron emitiran s vruće katode termoemisijom na sebe preuzima količinu energije (topline) koja odgovara njegovom izlaznom radu. Izlazni rad definiran je kao minimalna količina energije koju je potrebno uložiti kako bi elektron napustio površinu materijala u čvrstom agregatnom stanju. Izražava se u elektronvoltima (eV), a za većinu tehničkih čistih metala iznosi od 4 eV do 5 eV [5]. Dodavanjem male količine različitih oksida u tehnički čisti volfram, izlazni rad elektrona snizuje se s 4 eV na 2,5 eV što rezultira poboljšavanjem termoemijskih svojstava elektrode [30], [31].

Toplinsko opterećenje osnovnog metala

Poznavanje intenziteta i distribucije toplinskog opterećenja kojim električni luk djeluje na površinu metala od primarne je važnosti za analizu i razumijevanje toplinskog polja koje se razvija u osnovnom metalu. Kao i kod volframove elektrode, toplinsko opterećenje osnovnog metala tijekom TIG zavarivanja ovisi o odabranoj konfiguraciji, odnosno odabranom polaritetu elektrode i osnovnog metala.

DCEN kao najčešće korištena TIG konfiguracija rezultira stabilnijim električnim lukom i manjim toplinskim opterećenjem volframove elektrode. Međutim, kod ove konfiguracije izostaje efekt katodnog čišćenja na osnovnom metalu što onemogućava zavarivanje metala poput aluminija i magnezija koji formiraju stabilan i temperaturno otporan oksidni sloj na svojoj površini. Toplinsko opterećenje kojim DCEN-TIG zavarivanje djeluje na osnovni metal ima približno Gaussovu raspodjelu i može se podijeliti na tri različita mehanizma koji mu doprinose:

- kondenzacija elektrona,
- kondukcija topline iz električnog luka i
- zračenje topline iz električnog luka [29], [32].

Kondenzacija elektrona najznačajnija je komponenta toplinskog opterećenja osnovnog metala u DCEN-TIG konfiguraciji [33]. Konduktivni prijenos topline iz električnog luka ima značajan udio u toplinskom opterećenju, dok na prijenos topline zračenjem otpada od 1 % do 10 % ukupnog toplinskog opterećenja [32], [34].

Tok topline u osnovnom metalu

Toplina koju električni luk isporuči u osnovni metal širi se kroz njega konduktivnim i konvektivnim prijenosom topline. Konduktivni prijenos topline djeluje kao jedini mehanizam prijenosa topline sve do trenutka u kojem se pojavi lokalizirano taljenje osnovnog metala. Iako je količina rastaljenog metala u pravilu mala, konvektivni prijenos topline unutar taline može imati značajan utjecaj na dimenzije i geometriju zone taljenja ali i druga svojstva zavarenog spoja [8], [35], [7], [36]. Odnos količine topline koja se u talini prenosi konvekcijom u odnosu na kondukciju definiran je bezdimenzionalnim Pécletovim brojem:

$$Pe = \frac{u\rho C_p L}{k} \quad 2.1$$

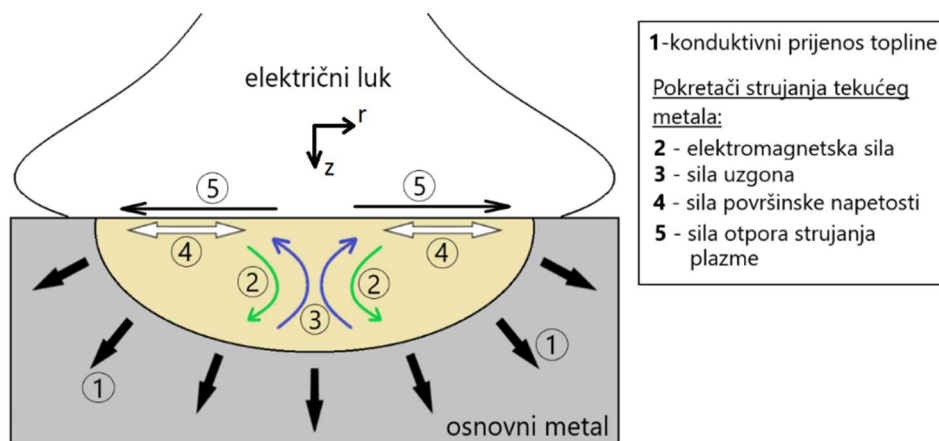
gdje je u brzina strujanja taline, ρ gustoća, C_p specifični toplinski kapacitet taline, L karakteristična duljina (radijus taline) i k koeficijent toplinske vodljivosti taline. Vrijedi pravilo da u tekućem metalu za velike vrijednosti Péclet broja ($\gg 1$) prevladava konvektivni prijenos topline, dok za mali Péclet broj ($\ll 1$) prevladava konduktivni prijenos topline [19]. Pécletov broj može se izraziti i preko umnoška Reynoldsovog i Prandtlovog broja:

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{u\rho L}{\mu} \cdot \frac{C_p \mu}{k} \quad 2.2$$

gdje je μ dinamički viskozitet taline.

Smjer konduktivnog prijenosa topline kroz osnovni metal u čvrstom agregatnom stanju te smjerovi konvektivnog strujanja s pripadnim pokretačkim silama tijekom TIG zavarivanja

prikazani su na slici 2.5. Električni luk je stacionaran pa se prikazana konfiguracija može smatrati osnosimetričnom. Površina tekućeg metala je ravna tj. tlak kojim električni luk djeluje na nju je zanemaren, što je prihvatljiva pretpostavka za niže jakosti struje. Naglasak ove skice stavljen je na sile koje uzrokuju konvektivno strujanje tekućeg metala.



Slika 2.5 Prijenos topline u osnovnom metalu i sile koje pokreću konvekciju

Toplina se konduktivnim prijenosom odvodi u smjeru suprotnom od temperaturnog gradijenta, prema hladnijim dijelovima osnovnog metala. Intenzitet konduktivnog prijenosa topline ovisi o temperaturnom gradijentu i toplinskoj vodljivosti metala. Iako je količina taline kod TIG zavarivanja relativno mala, konvektivni prijenos topline svakako može biti značajan faktor koji utječe na razvoj zone taljenja, posebno kod metala s manjom toplinskom vodljivošću. Konvektivni prijenos topline unutar tekućeg metala ponekad je vrlo intenzivan jer brzine strujanja mogu dosegnuti i 1 m/s [8]. Sile koje utječu na konvekciju su: elektromagnetska (Lorentzova) sila, sila uzgona, sila površinske napetosti (Marangonijeva konvekcija) i sila otpora strujanju plazme. Rezultirajuće gibanje tekućeg metala ovisi o smjeru i intenzitetu navedenih sila, odnosno njihovoj rezultanti.

Budući da električni tok u pravilu divergira nakon ulaska u metal, intenzitet elektromagnetske sile smanjuje se udaljavanjem od površine tekućeg metala zbog smanjenja gustoće električne struje. Ukoliko bi u tekućem metalu djelovala samo elektromagnetska sila, ona bi uzrokovala kružno strujanje koje bi pregrijanu talinu prenosilo prema dnu tekućeg metala povećavajući tako dubinu penetracije [21]. Brzine strujanja uzrokovane elektromagnetskom silom, ovisno o jakosti struje iznose od 2 cm/s do 20 cm/s [8], [21].

Sila uzgona (prirodna konvekcija) nastaje zbog temperaturne razlike unutar tekućeg metala. Metal na višoj temperaturi ima manju gustoću zbog povećanja volumena uzrokovanog toplinskim širenjem. Sila uzgona djeluje suprotno od sile gravitacije te u položenoj poziciji zavarivanja na slici 2.5. nastoji uspostaviti kružno gibanje koje djeluje tako da povećava širinu zone taljenja. Brzine strujanja uzrokovane silom uzgona relativno se male, od 1 cm/s do 3 cm/s [8], [21].

Gradijent površinske napetosti tekućeg metala smatra se dominantnim pokretačem konvektivnog strujanja u talini. Gradijent površinske napetosti nastaje kao posljedica temperaturnog gradijenta na površini tekućeg metala — temperatura na samom rubu taline odgovara likvidus temperaturi osnovnog metala dok je temperatura u centru taline značajno viša. Kako je vrijednost površinske napetosti ovisna o temperaturi, navedeni temperaturni gradijent rezultira i gradijentom površinske napetosti. Općenito, ukoliko na površini tekućine

postoji razlika u površinskoj napetosti, tekućina se giba iz područja manje površinske napetosti prema području veće površinske napetosti. Ta pojava je poznata pod nazivom Marangonijeva konvekcija ili Marangonijev efekt. Iako se površinska napetost tekućeg metala obično smanjuje s povećanjem temperature, dokazano je kako relativno mali udio površinski aktivnih elemenata kao što su sumpor i kisik može rezultirati suprotnim ponašanjem [21], [9], [37]. Obzirom na navedeno, može se očekivati da Marangonijeva konvekcija nastoji uspostaviti površinsko strujanje tekućeg metala prema centru ili prema rubu taline, ovisno o ponašanju površinske napetosti s promjenom temperature. Strujanje prema centru formiralo bi kružno gibanje koje potiče dublju penetraciju, dok bi strujanje prema rubu taline povećavalo širinu zone taljenja, slika 2.5. Brzine strujanja uzrokovane Marangonijevom konvekcijom kreću se između 20 cm/s i 100 cm/s [8], [21].

Sljedeća sila koja utječe na gibanje tekućeg metala posljedica je strujanja plazme uz njegovu površinu. U jednostavnoj osnosimetričnoj konfiguraciji prema slici 2.5, plazma struji u radijalnom smjeru neposredno nad tekućim metalom, od centra taline prema njezinom rubu. Zbog razlike u brzini gibanja površine tekućeg metala i plazme nad njim stvara se odgovarajuća sila otpora koja nastoji pokrenuti radijalno strujanje na površini tekućeg metala. Ona u pravilu djeluje od centra taline prema njezinom rubu jer plazma ima veću brzinu od tekućeg metala. Dakle, sila otpora strujanja plazme nastoji formirati kružno gibanje koje bi pregrijani tekući metal prenosilo prema rubu taline, što bi širilo zonu taljenja. Brzine strujanja uzrokovane silom otpora strujanja plazme iznose do 50 cm/s [8], [21].

Osim opisanih mehanizama prijenosa topline koji djeluju unutar osnovnog metala, toplina se također prenosi s osnovnog metala na okolinu. U pravilu se radi o hlađenju prirodnom konvekcijom i zračenjem, a do izmjene topline može doći i na mjestima gdje osnovni metal ostvaruje toplinski kontakt s okolnim materijalima (radni stol, naprave za učvršćavanje i sl.).

2.5 Zavarivački parametri TIG procesa

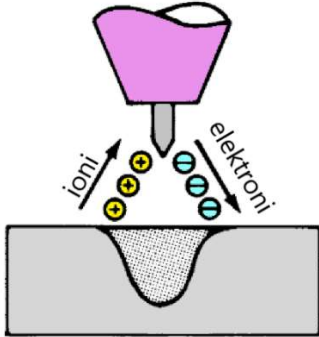
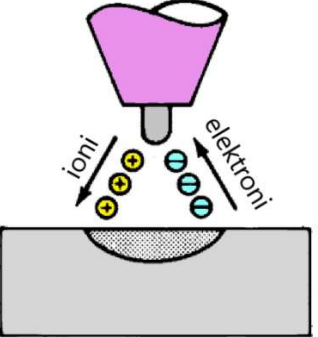
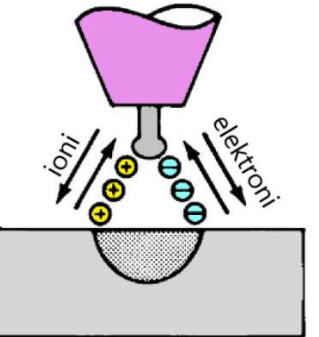
Kako bi se postigla kontrola nad TIG procesom nužno je poznavati pripadne zavarivačke parametre, njihovo međudjelovanje i njihov utjecaj na distribuciju i količinu topline razvijene u električnom luku [30]. Pravilan odabir zavarivačkih parametara ima presudan utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja. U nastavku ovog podpoglavlja detaljnije su pojašnjeni glavni zavarivački parametri TIG procesa.

2.5.1 Strujni parametri

Pod strujne parametre TIG procesa ubrajaju se jakost struje, odabrani polaritet (konfiguracija) procesa te parametri vezani uz impulsnu struju za zavarivanje. Jakost struje djeluje izravno na količinu razvijene topline u luku. Međutim, samo dio topline generirane u električnom luku prelazi u osnovni metal, što ovisi o njegovoj iskoristivosti. Jakost struje također izravno mijenja intenzitet i distribuciju toplinskog opterećenja na osnovnom metalu što rezultira promjenama dimenzija i volumena zone taljenja.

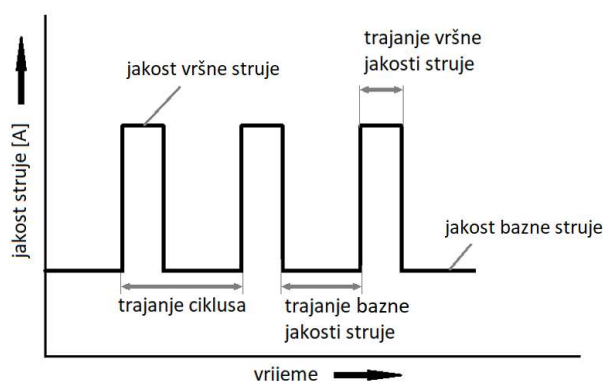
Kada je riječ o polaritetu, kod TIG zavarivanja moguće su tri konfiguracije: elektroda negativnog polariteta (DCEN), elektroda pozitivnog polariteta (DCEP) ili elektroda promjenjivog polariteta (AC-TIG). Osnovne karakteristike navedenih konfiguracija prikazane su u tablici 2.1.

Tablica 2.1 Karakteristike različite vrste struje kod TIG zavarivanja [2]

Vrsta struje	Istosmjerna - DCEN	Istosmjerna - DCEP	Izmjenična - AC uravnotežena
Polaritet elektrode	negativan	pozitivan	-
Smjer gibanja elektrona i pozitivno nabijenih iona			
Oblik zone taljenja			
Efekt katodnog čišćenja oksida	ne	da	da, tijekom DCEP poluperiode
Raspodjela generirane topline	70 % osnovni metal 30 % elektroda	30 % osnovni metal 70 % elektroda	50 % osnovni metal 50 % elektroda
Dimenzije zone taljenja	veća penetracija manja širina zavora	manja penetracija veća širina zavora	penetracija i širina zavora prosječne
Strujna opteretivost elektrode	visoka	niska	dobra

TIG proces obično koristi istosmjernu struju s negativnim polom na volframovoj elektrodi (DCEN). U ovoj konfiguraciji volframova elektroda emitira elektrone koji se, pod utjecajem električnog polja, gibaju kroz električni luk prema osnovnom metalu (anodi). Približno 70 % razvijene topline prenosi se na anodu, a ostatak od 30 % na katodu čime se postiže dobra penetracija uz sprječavanje toplinskog preopterećenja volframove elektrode [2], [19]. DCEN konfiguracija koristi se za zavarivanje konstrukcijskih i nehrđajućih čelika.

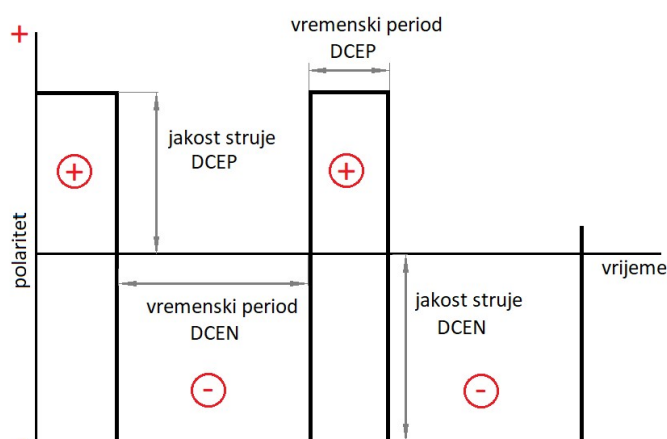
Osim korištenja konstantne jakosti struje, moderniji uređaji imaju mogućnost impulsnog zavarivanja. Ovakvo zavarivanje često se smatra posebnom inačicom TIG procesa, a naziva se impulsno TIG zavarivanje (P-TIG), slika 2.6. Pri impulsnom zavarivanju jakost struje periodički se izmjenjuje između dvije odabrane razine (bazne i vršne), što smanjuje unos topline u osnovni metal u odnosu na korištenje kontinuirane jakosti struje, povećava kontrolu nad tekućim metalom, smanjuje deformacije uzrokovane zavarivanjem i poboljšava mikrostrukturne karakteristike metala zavora [38], [39]. Impulsni radni režim u pravilu otvara mogućnost izbora dodatnih parametara: frekvencije impulsne struje, jakosti bazne struje, jakosti vršne struje, vremena njihova trajanja.



Slika 2.6 Valni oblik impulsnog TIG zavarivanja i pripadni parametri

DCEP konfiguracija kod TIG zavarivanja ne koristi se često zbog velikog toplinskog opterećenja volframove elektrode. Pri željenoj jakosti struje potrebno je koristiti elektrodu znatno većeg promjera u odnosu na DCEN konfiguraciju. Značajna prednost DCEP konfiguracije je intenzivno čišćenje površinskih oksida koji otežavaju zavarivanje metala kao što su aluminij i magnezij. Ova pojava, poznata kao efekt procesnog ili katodnog čišćenja, ima značajan utjecaj na proces zavarivanja, a točan fizikalni mehanizam njezinog odvijanja još uvijek nije u potpunosti razjašnjen [40], [41], [42].

Kako bi se objedinile prednosti DCEN polariteta s katodnim čišćenjem tijekom DCEP faze, logičnim se nametnulo korištenje izmjenične struje (AC-TIG). Na ovaj način postiže se zadovoljavajuće čišćenje stabilnog površinskog oksidnog sloja (tijekom DCEP faze), uz zadržavanje relativno dobre penetracije (tijekom DCEN faze). Izvor izmjenične struje za zavarivanje može omogućavati i podešavanje vremena trajanja i jakosti struje tijekom DCEN, odnosno DCEP faze, slika 2.7. Ovi parametri neizravno određuju frekvenciju izmjenične struje i vremenski omjer DCEN i DCEP faze kojim se regulira intenzitet čišćenja površinskog oksida. Dulje vrijeme trajanja DCEP faze rezultira boljim katodnim čišćenjem ali povećava toplinsko opterećenje volframove elektrode i obratno. Osim navedenog, pojedini izvori struje za zavarivanje nude mogućnost izbora različitih valnih oblika struje, kao što su sinusoidni, pravokutni, trapezoidni itd. Izmjenična struja se u pravilu koristi za TIG zavarivanje aluminija, magnezija i njihovih legura.



Slika 2.7 Shematski prikaz ciklusa izmjenične struje kod TIG zavarivanja

2.5.2 Duljina električnog luka

Duljina električnog luka spada u važnije zavarivačke parametre TIG procesa, a izravno djeluje na pad napona u električnom luku. Pad napona povećava se s porastom duljine električnog luka što povećava količinu topline oslobođene u luku. Pad napona u luku također ovisi o vrsti zaštitnog plina u kojem se luk ionizacijom formira, intenzitetu električne energije koja kroz njega prolazi te o odabiru tipa, promjera i oblika vrha volframove elektrode [5], [31]. Duljina električnog luka utječe i na brzinu strujanja plazme u luku, veličinu površine na osnovnom metalu na kojoj luk djeluje te na iskoristivost električnog luka [9]. Sve navedeno rezultira složenim utjecajem duljine luka na TIG proces zavarivanja.

2.5.3 Zaštitni plin

Inertni zaštitni plin kod TIG zavarivanja sprječava nepoželjne kemijske reakcije između metala na povišenoj temperaturi (volframova elektroda, osnovni metal, dodatni metal) i okolne atmosfere. Osim toga, zaštitni plin, kao medij u kojem nastaje električni luk, ima snažan utjecaj na proces zavarivanja [30], [43]. Vrsta i protok zaštitnog plina predstavljaju značajne zavarivačke parametre. Načesto korišteni zaštitni plinovi kod TIG zavarivanja su argon, helij i njihove mješavine, a ponekad im se dodaju manje količine kisika, helija, dušika i drugih plinova, obično u svrhu povećanja penetracije. Fizikalna i kemijska svojstva zaštitnog plina mijenjaju karakteristike električnog luka, što izravno utječe na intenzitet razvijene topline i njezinu distribuciju prema osnovnom metalu [10], [44]. Najvažnija svojstva zaštitnog plina su njegova gustoća, specifični toplinski kapacitet, toplinska i električna vodljivost, te energija ionizacije. Energija ionizacije je mjera za količinu energije potrebne za izbijanje elektrona iz izoliranoga atoma ili molekule plina.

Helij je inertni, monoatomni plin gustoće $0,1786 \text{ kg/m}^3$ pri standardnim uvjetima. Najznačajnije karakteristike helija, kao zaštitnog plina pri TIG zavarivanju, njegova su visoka toplinska vodljivost i visoka energija ionizacije (24,6 eV za prvu energiju ionizacije). Zahvaljujući navedenom, električni luk nastao ionizacijom helija pri jednakim uvjetima prenosi više topline u osnovni metal i zahtijeva viši napon u odnosu na električni luk u atmosferi argona [19], [43].

Argon također spada u monoatomne inertne plinove, a pri standardnim uvjetima gustoća mu iznosi $1,664 \text{ kg/m}^3$. U odnosu na helij, argon je dostupniji i jeftiniji, a pri zavarivanju legura aluminija i magnezija njegovo korištenje rezultira intenzivnijim čišćenjem površinskih oksida. Također, električni luk u argonu je stabilniji i lakše ga je uspostaviti [2], [19], [45].

2.5.4 Volframova elektroda

Elektroda za TIG zavarivanje nalazi se u izravnom kontaktu s električnim lukom i provodi električnu energiju koja kroz njega prolazi. Zbog visokog toplinskog opterećenja izrađena je od tehnički čistog volframa (talište $3410 \text{ }^\circ\text{C}$) ili njegovih legura [31], [28]. Elektroda kod TIG zavarivanja, ovisno o odabranom polaritetu, može biti katoda ili anoda. Kod izmjenične struje polaritet je vremenski promjenjiv, u skladu s odabranom frekvencijom. Elektroda za TIG zavarivanje predstavlja značajan zavarivački parametar ovisno o promjeru, vrsti i geometriji njezinog vrha [46].

U DCEN konfiguraciji volframova elektroda je vruća katoda i emitiranje elektrona provodi se mehanizmom termoemisije. Naime, volframova elektroda ugrijava na visoku temperaturu termoemisijom može emitirati dovoljno elektrona za postizanje uobičajenih jakosti struje koje

se koriste za zavarivanje. Emitirani elektroni također sprječavaju toplinsko preopterećenje elektrode, odvođeći s nje toplinu koja odgovara njihovom izlaznom radu [5].

Prilikom zavarivanja u DCEP konfiguraciji volframova elektroda je anoda. Privučeni pozitivnim nabojem, na anodu pristižu elektroni otpuštajući višak energije koji sadrže i uzrokuju intenzivno zagrijavanje volframove elektrode [5]. Jakost struje koja će toplinski preopteretiti elektrodu kada je proces zavarivanja u DCEP konfiguraciji nekoliko je puta manja u odnosu na DCEN konfiguraciju. To je jedan od razloga zašto se kontinuirano DCEP TIG zavarivanje ne koristi često.

Veća jakost struje oslobađa više topline u električnom luku što zahtijeva povećanje promjera volframove elektrode ukoliko dolazi do prekoračenja njezine strujne opteretivosti, tablica 2.2 (zaštitni plin argon).

Tablica 2.2 Preporučene jakosti struje ovisno o promjeru volframove elektrode, [2]

Promjer elektrode / mm	Preporučena jakost DCEN struje / A <i>*W+Th elektroda</i>	Preporučena jakost DCEP struje / A <i>*W+Th elektroda</i>	Preporučena jakost AC struje / A (uravnotežena) <i>* W elektroda</i>
0,25	do 15	-	do 15
0,5	5–20	-	10–20
1,0	15–80	-	20–30
1,6	70–150	10–20	30–80
2,4	150–250	15–30	60–130
3,2	250–400	25–40	100–180
4,0	400–500	40–55	160–240
4,8	500–750	55–80	190–300
6,4	750–1100	80–125	325–450

Kad je riječ o tipu elektrode, osim elektrode od tehnički čistog volframa, dodavanjem male količine torijevog, cerijevog, lantanovog ili cikonijevog oksida volframu razvijene su i druge legure pogodne za izradu elektroda kod TIG zavarivanja [31]. One su iskazale još bolje operativne karakteristike, kao što su povećana strujna opteretivost i snižena radna temperatura. Elektrode različitog tipa iskazuju i različite karakteristike obzirom na lakoću uspostave i stabilnost električnog luka. Osim promjera i tipa elektrode, geometrijski oblik vrha elektrode ima značajan utjecaj na karakteristike električnog luka. Općenito, elektroda s konusnim vrhom koristi se za istosmjernu struju (DCEN), a odabrani vršni kut smatra se jednim od zavarivačkih parametara. Za razliku od DCEN konfiguracije, elektroda koja se koristi za AC-TIG zavarivanje zbog velikog toplinskog opterećenja tijekom DCEP poluperiode ne može zadržati konusnu geometriju. Zbog ovoga se za AC-TIG zavarivanje koriste elektrode sa zaobljenim vrhom [2].

2.5.5 Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja izravno je povezana s količinom topline unesene u osnovni metal po jedinici duljine (J/m). Povećanje brzine zavarivanja rezultira manjim unosom topline u osnovni metal. Povećanje brzine zavarivanja također smanjuje vršnu temperaturu tekućeg metala i temperaturni gradijent na njegovoj površini [47]. Sve navedeno ima utjecaj na geometriju i volumen zone taljenja te na mikrostrukturne promjene koje se događaju u zoni zavarenog spoja.

2.5.6 Ostali zavarivački parametri

Od ostalih zavarivačkih parametara TIG procesa treba spomenuti nekoliko njih povezanih s dodatnim metalom. Budući da kod TIG zavarivanja dodatni metal nije dio zavarivačkog strujnog kruga njegova dobava nije izravno povezana uz odabrane strujne parametre, što procesu omogućava dodatnu fleksibilnost u odnosu na druge elektrolučne procese. Uz dodatni metal vezuje se nekoliko zavarivačkih parametara: kemijski sastav dodatnog metala, promjer žice i brzina dobave žice (ukoliko je dobava mehanizirana). Svi navedeni parametri imaju značajan utjecaj na geometriju i mikrostrukturu zone taljenja, te mehanička i kemijska svojstva zavarenog spoja. Općenito, kemijski sastav dodatnog metala približno odgovara osnovnom metalu, a promjer žice i brzina njezine dobave proporcionalni su jakosti struje zavarivanja [2].

2.6 Osnovna svojstva austenitnih nehrđajućih čelika

Upravo svojstva austenitnih nehrđajućih čelika objašnjavaju zašto ove legure zauzimaju najveći udio u ukupnoj količini proizvedenih nehrđajućih čelika [1]. U ovom podpoglavlju pojašnjen je kemijski sastav i uloga legirnih elemenata koji se nalaze u austenitnom nehrđajućem čeliku. Prikazana su njihova osnovna fizikalna, mehanička i kemijska svojstva te uspoređena sa standardnim konstrukcijskim čelikom.

2.6.1 Kemijski sastav

Otpornost na koroziju austenitnih nehrđajućih čelika primarno je u funkciji količine kroma kojeg u kemijskom sastavu ima od 16 % do 26 %, ovisno o leguri. Također, udio nikla kreće se u rasponu od 3,5 % do 37 %, a udio ugljika u rasponu od 0,015 % do 0,25 %. Dodatak ugljika, mangana i dušika (serija 2xx), te nikla u različitim količinama potiče prisutnost austenitne faze u mikrostrukturi. Kemijski sastav odabranih austenitnih nehrđajućih čelika prikazan je u tablici 2.3. Osim legirnih elemenata, u kemijskom sastavu legura prisutne su i nečistoće poput sumpora i fosfora. Iako je udio ovih elemenata vrlo malen, oni mogu imati značajan utjecaj na neka svojstva.

Tablica 2.3 Kemijski sastav austenitnih nehrđajućih čelika, [48]

Legura	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	ostalo
301	0,15	2,00	1,00	16,0-18,0	6,0-8,0	0,045	0,03	-
304	0,08	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-10,5	0,0456	0,03	-
304H	0,04-0,10	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-11,0	0,045	0,03	-
304L	0,03	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-12,0	0,045	0,003	-
310	0,25	2,00	1,50	14,0-26,0	19,0-22,0	0,045	0,03	-
316	0,08	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0 Mo

Detaljan pregled utjecaja pojedinih legirnih elemenata na legure austenitnog nehrđajućeg čelika vidljiv je u tablici 2.4.

Tablica 2.4 Utjecaj legirnih elemenata na legure nehrđajućih čelika, [48]

Element	Legura	Utjecaj
Ugljik	sve	Gamageni element, potiče formiranje austenita. Može tvoriti karbide s kromom što dovodi do intergranularne korozije
Krom	sve	Alfageni element, potiče formiranje ferita. Povećava otpornost na oksidaciju i koroziju
Nikal	sve	Gamageni element, potiče formiranje austenita. Povećava čvrstoću na povišenim temperaturama, otpornost na koroziju i duktilnost
Dušik	xxxN	Gamageni element, potiče formiranje austenita. Povećava čvrstoću, (posebno na niskim temperaturama) i otpornost na rupičastu koroziju.
Niobij	347	Niobij se spaja s ugljikom i tako smanjuje sklonost intergranularnoj koroziji. Smanjuje veličinu kristalnog zrna. Potiče formiranje ferita (alfageni element). Povećava čvrstoću ali smanjuje duktilnost pri uvjetima koji izazivaju puzavost. Na sobnoj temperaturi djeluje kao gamageni, a na povišenim kao alfageni element.
Mangan	2xx	Ima veliki afinitet prema sumporu i zato smanjuje mogućnost vrućih pukotina prilikom zavarivanja
Molibden	316, 317	Alfageni element, potiče formiranje ferita. Povećava čvrstoću na visokim temperaturama. Poboljšava otpornost na koroziju u reducirajućem okolišu.
Selen ili sumpor	303, 303Se	Poboljšavaju strojnu obradivost ali uzrokuju nastanak vrućih pukotina tijekom zavarivanja. Malo pogoršava otpornost na koroziju. Sumpor djeluje na dubinu penetracije kod zavarivanja mijenjajući površinsku napetost tekućeg metala.
Silicij	302B	Povećava otpornost na oksidaciju. Alfageni element (promovira formiranje ferita). Izraziti afinitet prema kisiku (deoksidirajuće djelovanje). Poboljšava fluidnost tekućeg metala.
Titan	321	Reagira s ugljikom tvoreći karbide i tako smanjuje vjerojatnost intergranularne korozije. Smanjuje veličinu kristalnog zrna. Alfageni element (promovira formiranje ferita).

2.6.2 Fizikalna svojstva

Neka od osnovnih fizikalnih svojstava austenitnih nehrđajućih čelika prikazana su u tablici 2.5. Za usporedbu su u istoj tablici prikazana i fizikalna svojstva konstrukcijskog čelika. Navedene vrijednosti mogu varirati, ovisno o kemijskom sastavu, mikrostrukturi (prisutnim fazama, njihovim udjelima te obliku i veličini kristalnog zrna), te toplinskoj i mehaničkoj povijesti legure. Gustoća i modul elastičnosti austenitnog nehrđajućeg čelika slični su onima kod ugljičnih čelika. Relativno visok koeficijent toplinskog širenja i prilično niska toplinska vodljivost austenitnih čelika mogu uzrokovati velike deformacije (i zaostala naprezanja) prilikom zavarivanja. Električni otpor austenitnih nehrđajućih čelika značajno je viši u odnosu na konstrukcijski čelik, što dolazi do izražaja kod elektrotopnog zavarivanja. Nehrđajući austenitni čelik iskazuje paramagnetična svojstva ukoliko u leguri uz austenit ne postoji feritna ni martenzitna faza koje mogu nastati u određenim slučajevima.

Tablica 2.5 Usporedba odabranih svojstva austenitnog i niskougljičnog čelika, [48]

Svojstvo	Austenitni nehrđajući čelik	Ugljični čelik
Gustoća / kg/dm ³	7,8–8,0	7,8
Modul elastičnosti / GPa	193–200	200
Srednji koeficijent toplinskog širenja (od 0 °C do 538 °C) / μm/m°C	17,0–19,2	11,7
Toplinska vodljivost pri 100 °C / W/m°C	18,7–22,8	60
Električni otpor / Ωm	6,9–10,2 x 10 ⁻⁷	1,2 x 10 ⁻⁷
Interval taljenja / °C	1400–1450	1425–1538

2.6.3 Mehanička svojstva

Austenitni nehrđajući čelici imaju relativno dobru čvrstoću koju zadržavaju i na visokim temperaturama — ovo posebno vrijedi za legure s oznakom 'H' (visoki udio ugljika). Iako pojedine legure imaju zadovoljavajuću čvrstoću i iznad 1000 °C, radne temperature u pravilu ne prelaze 760 °C zbog smanjene otpornosti na koroziju, [1]. Također, na temperaturama iznad 815 °C, zbog stvaranja karbida i intermetalnih spojeva, dolazi do pada duktilnosti i žilavosti. Iako ne spadaju u toplinski očvrstive legure, austenitni nehrđajući čelici mogu se očvrstnuti deformiranjem u hladnom stanju. Austenitni čelici iskazuju bolju otpornost na puzavost od feritnih, martenzitnih i niskougljičnih čelika. Zahvaljujući plošno centriranoj kubnoj rešetki, imaju odličnu duktilnost i žilavost, te nisu podložni naglom prelasku u krto stanje na niskim temperaturama za razliku od legura koje kristaliziraju u prostorno centriranoj kubnoj rešetci. Neka od osnovnih mehaničkih svojstava odabranih legura austenitnih nehrđajućih čelika (304, 304L, 316, i 316L) u omekšanom stanju prikazana su u tablici 2.6.

Tablica 2.6 Mehanička svojstva austenitinih nehrđajućih čelika, odžareno stanje [49]

Legura	R _m / MPa	R _{p0,2} / MPa	Produljenje / %	Tvrdoća / HRB
304	515	75	40	50
304L	450	65	40	50
316	515	75	40	50
316L	450	65	40	50

2.6.4 Otpornost na koroziju

Osim što imaju dobra mehanička i tehnološka svojstva, jedan od glavnih razloga za primjenu austenitnih nehrđajućih čelika upravo je njihova otpornost na koroziju. Mehanizam zaštite sličan je kao i kod ostalih nehrđajućih čelika. Na površini legure formira se pasivni zaštitni film kromovog oksida koji štiti metal od korozivnog propadanja. Austenitni nehrđajući čelici iskazuju dobru otpornost na koroziju u različitim medijima do temperatura od 650 °C. Pri standardnim atmosferskim uvjetima opće korozivno propadanje ovih legura praktički je zanemarivo, u slatkoj vodi iznosi približno $2,5 \times 10^{-5}$ mm/god što je također izrazito sporo [48]. Ipak, nešto su osjetljiviji u kloridnim atmosferama poput morske vode. Ozbiljnije poteškoće s korozivnim propadanjem mogu nastupiti u slučajevima rupičaste, intergranularne i galvanske korozije te korozije u procjepu i korozije potpomognute naprezanjem. Također, metalurške promjene koje u leguri nastaju kao posljedica zavarivanja mogu ozbiljno narušiti otpornost na koroziju u zoni zavarenog spoja.

2.6.5 Zavarljivost i pojava pukotina

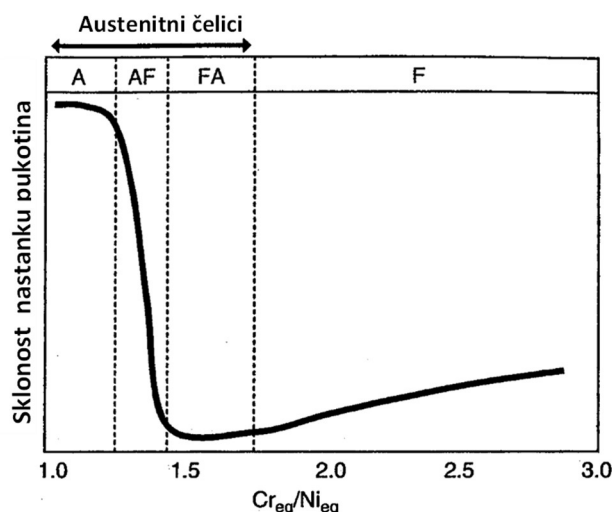
Zavarljivost se definira kao tehnološko svojstvo materijala da se zavarivanjem uz prihvatljive troškove ostvari spoj primjerene kvalitete koji će udovoljiti svim predviđenim radnim uvjetima tijekom životnog vijeka konstrukcije [50]. Austenitni nehrđajući čelici imaju relativno dobru zavarljivost, međutim, za definiranje prikladnog postupka zavarivanja koji neće značajno narušiti svojstva osnovog metala potrebno je poznavati poteškoće koje zavarivanje može uzrokovati. Metalurške promjene koje nastaju kao posljedica lokalnog toplinskog unosa mogu ozbiljno narušiti svojstva zavarenog spoja, posebno njegove otpornosti na koroziju. Lokalni unos topline, nužan za taljenje metala, može rezultirati nastankom različitih vrsta pukotina u području zavarenog spoja.

Sklonost nastajanju pukotina kod nehrđajućih austenitnih čelika usko je povezana s kemijskim sastavom osnovnog i dodatog metala, a posebno s razinom nečistoća koje se u njima nalaze. Općenito, pukotine nastaju uslijed djelovanja toplinskog naprežanja u područja zavora u kojima istovremeno dolazi do pada duktilnosti zbog prisutnosti tekuće faze u obliku tankog filma duž granica kristalnog zrna ili pak zbog fenomena koji smanjuje duktilnost legure, a pojavljuje se nešto iznad polovice solidus temperature. Pukotine se međusobno razlikuju po mehanizmu koji ih uzrokuje ali i po mjestu nastanka. Tako se razlikuju vruće pukotine u metalu zavora, vruće pukotine u djelomično protaljenoj zoni i zoni utjecaja topline (ZUT), pukotine uzrokovane naglim padom duktilnosti (DDC pukotine, engl. Ductility-Dip Cracking), te pukotine nastale naknadnim zagrijavanjem zavarenog spoja [51].

Vruće pukotine u metalu zavora

Vruće pukotine u metalu zavora javljaju se neposredno pred kraj skrućivanja, trenutak prije potpunog prelaska metala zavora u čvrsto agregatno stanje. Vrijedi pravilo kako se sklonost legure pojavi ovih pukotina povećava ukoliko je temperaturni interval skrućivanja širok te ukoliko se povećava količina eutektičke mješavine prisutne pri prijelazu taline u čvrsto agregatno stanje. Prisutnost nečistoća poput sumpora i fosfora također povećava vjerojatnost pojave vrućih pukotina u metalu zavora budući da se ovi elementi tijekom skrućivanja izlučuju po granicama zrna tvoreći eutektičku mješavinu niskoga tališta. Ako je spomenuta eutektička mješavina distribuirana u obliku kontinuiranog tankoga filma između kristalnih zrna ona se u prisutnosti naprežanja mogu razdvojiti i tako formirati pukotinu [51], [52].

Najučinkovitijim načinom za sprječavanje pojave vrućih pukotina kod austenitnih nehrđajućih čelika pokazala se kontrola nad udjelom ferita u metalu zavora. Udio feritne faze kreće se između 0 FN do 30 FN, gdje mjerna jedinica FN predstavlja feritni broj. Odličnu otpornost na pojavu pukotina iskazali su metali zavora s udjelom ferita od 3 FN do 20 FN. Udio ferita koji se formira u metalu zavora pod snažnim je utjecajem kemijskog sastava legure, a kao primaran faktor pokazao se omjer Cr_{eq}/Ni_{eq} . Cr_{eq} je ekvivalentni udio kroma, a Ni_{eq} ekvivalentni udio nikla u leguri. Zavarivanje legura austenitnog nehrđajućeg čelika kod kojih Cr_{eq}/Ni_{eq} iznosi približno 1,5 rezultira povoljnijim udjelom ferita u metalu zavora, što značajno smanjuje vjerojatnost pojave pukotina, slika 2.8.



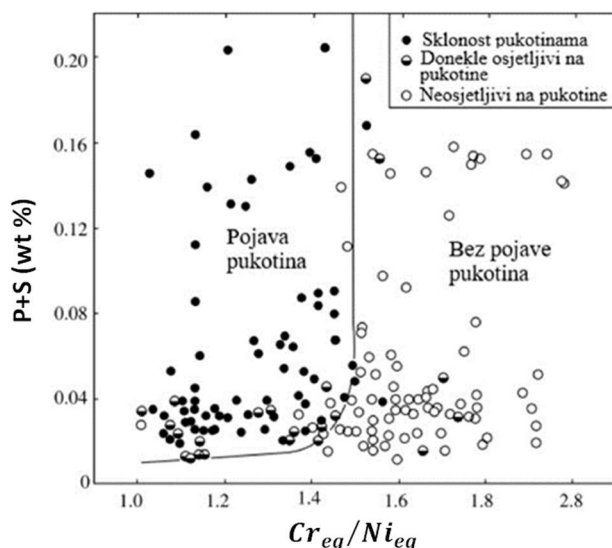
Slika 2.8 Osjetljivost austenitnih nehrđajućih čelika na pojavu vrućih pukotina [1]

Smatra se da postoji nekoliko temeljnih razloga zašto prisutnost ferita ima ovako povoljan utjecaj na spriječavanje vrućih pukotina u metalu zavora:

- veća otopivost nečistoća poput S i P u feritu smanjuje njihovo izlučivanje, a time i količinu taline duž granica zrna,
- granice zrna između feritne i austenitne faze nisu ravne nego imaju vijugav oblik, što otežava pojavu kontinuiranog filma taline između zrna i
- vijugavi oblik granice između ferita i austenita efektivno zaustavlja širenje pukotine ukoliko i dođe do njezina početka.

Unatoč navedenim prednostima pojave ferita u metalu zavora austenitnih nehrđajućih čelika, potrebno je napomenuti kako u slučaju udjela ferita većeg od 10 FN može uzrokovati poteškoće s mehaničkim svojstvima zavarenog spoja na veoma niskim ili visokim radnim temperaturama gdje zbog ferita dolazi do gubitka duktilnosti i pada žilavosti.

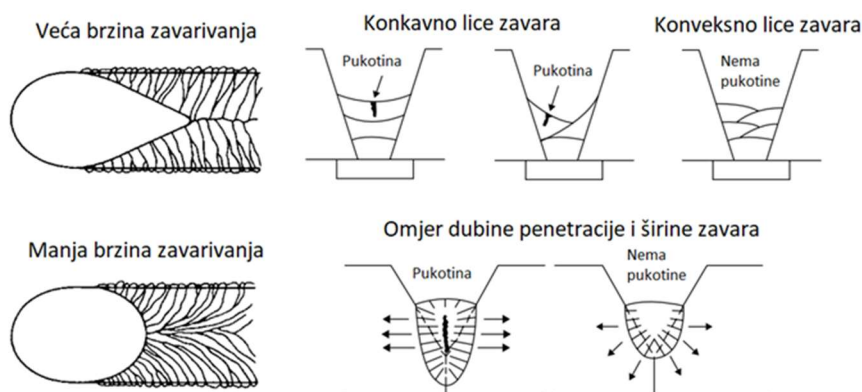
Dosta napora uloženo je na razvoj dijagrama kojima se pokušava predvidjeti pojavu vrućih pukotina u metalu zavora nehrđajućih čelika. Jedan od najčešće korištenih takvih dijagrama (Suutala dijagram), koji u obzir uzima pokazatelj Cr_{eq}/Ni_{eq} ali i zbroj masenog udjela fosfora i sumpora u kemijskom sastavu, prikazan je na slici 2.9.



Slika 2.9 Pojava pukotina za elektrolučno zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika, [53]

U dijagramu je vidljivo kako omjer Cr_{eq}/Ni_{eq} ima snažan utjecaj na sklonost nastanku pukotina, a može se uočiti i povoljan utjecaj smanjenjenog udjela nečistoća poput sumpora i fosfora u kemijskom sastavu. Međutim, utjecaj fosfora i sumpora nije tako značajan, a proizvodnja legura s izrazito niskim udjelom nečistoća u kemijskom sastavu je skupa. Utjecaj zavarivačkih parametara na pojavu vrućih pukotina kod austenitnih nehrđajućih čelika značajno je manji u odnosu na utjecaj kemijskog sastava legure. Međutim, svakako je poželjno poštivati nekoliko temeljnih preporuka koje mogu smanjiti vjerojatnost nastanka pukotina. Općenito vrijedi da proces zavarivanja i njemu pripadne parametre treba odabrati tako da se smanji unos topline u osnovni metal. Kako bi se smanjila toplinska naprezanja koja tijekom zavarivanja uzrokuju pukotine, upetost konstrukcije koja se zavaruje treba svesti na najmanju moguću mjeru. Također treba nastojati da metal zavora ima relativno malu površinu poprečnog presjeka jer se tako smanjuje intenzitet zaostalih naprezanja. Nekoliko preporuka vezanih za brzinu zavarivanja i geometriju zone taljenja vidljivo je na slici 2.10. Iako manje brzine zavarivanja nepovoljno djeluju na produktivnost i toplinski unos, zona tekućeg metala poprima eliptičan

oblik što usmjerava kristalizaciju u smjeru povoljnijem za sprječavanje nastanka pukotina. Lice zavora konveksnog oblika poželjnije je od konkavnog oblika jer zaostala naprezanja imaju tlačno umjesto vlačnog djelovanja, što opet povoljno djeluje na sprječavanje vrućih pukotina. Ukoliko je moguće, treba težiti manjem omjeru dubine penetracije u odnosu na širinu zavora jer zavari s dubokom penetracijom imaju nepovoljniji smjer kristalizacije koji može lakše rezultirati nastankom pukotina [1], [51]. Tijekom zavarivanja uvijek je potrebno osigurati kvalitetnu zaštitnu atmosferu, a kod austenitnih nehrđajućih čelika posebno je važno spriječiti prisutnost dušika jer on ima snažno gamageno djelovanje i može smanjiti ciljani udio ferita u metalu zavora [52].



Slika 2.10 Utjecajni faktori na sklonost pojavi vrućih pukotina, [1] [51]

Pukotine u djelomično protaljenoj zoni i ZUT-u

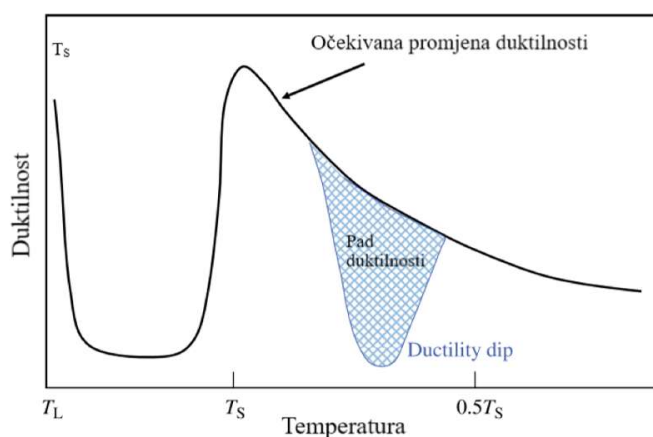
Austenitni nehrđajući čelici mogu biti skloni pojavi vrućih pukotina u djelomično protaljenoj zoni i ZUT-u. Ove pukotine pojavljuju se uslijed istovremene prisutnosti zavarivanjem uzrokovanih naprezanja i lokaliziranog tekućeg agregatnog stanja. Obično se javljaju duž granica kristalnog zrna jer se upravo ovdje nalaze izlučene nečistoće niskog tališta, poput fosfora ili još štetnijeg sumpora koje se relativno lako rastale. Ukoliko se zavarivanje provodi u više prolaza, ove se pukotine mogu pojaviti i u metalu zavora koji je formiran u nekom od prethodnih prolaza. Pukotine u djelomično protaljenoj zoni i ZUT-u često su vrlo malih dimenzija zbog čega ih je teško uočiti, a ponekad se nazivaju mikro-pukotine.

Kao najučinkovitija metoda za izbjegavanje nastanka ovih pukotina pokazala se kontrola kemijskog sastava osnovnog metala. Naime, legure koji imaju sklonost nastajanju ferita u ZUT-u su prilično otporne na nastanak pukotina u ovoj zoni. Ukoliko je kemijski sastav legure takav da ne rezultira nastankom feritne faze u ZUT-u, vjerojatnost pojave pukotina može se minimizirati tako da udio nečistoća u kemijskom sastavu bude što je moguće manji. Veličina kristalnog zrna u ZUT-u također ima bitan utjecaj na pojavu pukotina. Sitnozrnata mikrostruktura je u pravilu poželjnija jer povećava ukupnu površinu granica zrna i tako distribuira neželjenu talinu na veće područje. Veća površina granice zrna rezultira i lokalnim smanjenjem naprezanja po jedinici površine što povoljno djeluje na sprječavanje pojave pukotina [1], [51].

Iako odabir pravilnog postupka za zavarivanja ima relativno ograničen utjecaj na pojavu vrućih pukotina u djelomično protaljenoj zoni i ZUT-u, preporuka je pridržavati se istih smjernica kao kod sprječavanja pojave vrućih pukotina u metalu zavora: smanjiti upetost zavarivane konstrukcije, smanjiti unos topline te postići pravilnu veličinu i oblik presjeka zavarenog spoja.

DDC pukotine

DDC pukotine spadaju u pukotine koje nastaju u čvrstom agregatnom stanju (ispod solidus temperature). Uočene su kod mnogih metala koje kristaliziraju u plošno centriranoj kubnoj rešetci poput austenitnog nehrđajućeg čelika te legura na bazi nikla i bakra. Ove pukotine najčešće se pojavljuju kod zavarivanja u više prolaza, a šire se duž granica kristalnog zrna, i smještene su u metalu zavara ili ZUT-u. Nastanak DDC pukotina povezuje se s padom duktilnosti u relativno uskom temperaturnom intervalu, približno od 60 % do 90 % solidus temperature (T_s), slika 2.11.



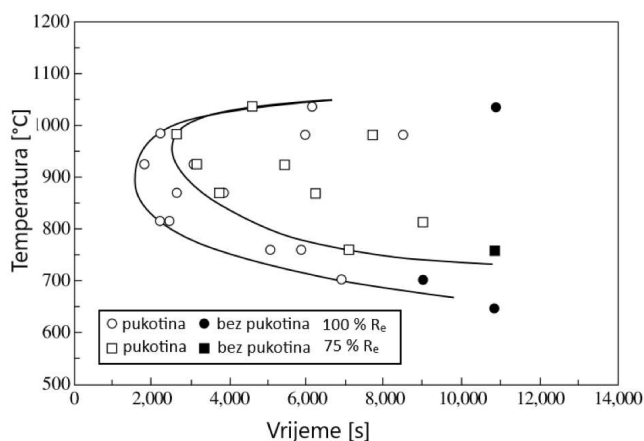
Slika 2.11 Promjena duktilnosti u funkciji temperature, [51]

Slično kao i kod vrućih pukotina, prisutnost ferita ima pozitivno djelovanje na sprječavanje DDC pukotina kod austenitnih nehrđajućih čelika. Naime, granice zrna između ferita i austenita nemaju ravan nego vijugav oblik što omogućuje mehaničko sidrenje i blokiranje klizanja te sprječava nastanak DDC pukotina pod utjecajem naprezanja. Odabirom osnovnog i dodatnog metala koji rezultiraju stvaranjem manje količine ferita u metalu zavara i ZUT-u moguće je u znatnoj mjeri spriječiti pojavu DDC pukotina. Mehanizam pojave DDC pukotina još nije potpuno objašnjen ali su donekle poznati faktori koji utječu na njihovu pojavu [51]. Osim kontrole nad udjelom ferita u zavarenom spoju, važno je smanjiti upetost konstrukcije koja se zavaruje. Smanjenje udjela nečistoća (P i S) u kemijskom sastavu austenitnog nehrđajućeg čelika nema značajniji utjecaj na pojavu DDC pukotina. Vodik u zaštitnom plinu treba izbjeći jer on povećava vjerojatnost nastanka pukotina. Odabir zavarivačkih parametara koji rezultiraju manjim toplinskim unosom i povoljnom geometrijom poprečnog presjeka metala zavara ima donekle povoljan utjecaj na sprječavanje DDC pukotina.

Pukotine nastale naknadnim zagrijavanjem

Pukotine nastale naknadnim zagrijavanjem zavarenog spoja mogu nastati kod zavarivanja u više prolaza ali obično nastaju tijekom toplinske obrade zavarenog spoja. Naknadna toplinska obrada smanjuje zaostala naprezanja i uzrokuje kontrolirane mikrostrukturne promjene u zavarenom spoju osiguravajući mu tražena svojstva. Pukotine nastale naknadnim zagrijavanjem zavarenog spoja, kao i DDC pukotine, nastaju u čvrstom agregatnom stanju, a pojavljuju se u metalu zavara ili ZUT-u. Austenitni nehrđajući čelici legirani s Nb i Ti (npr. legure 347 i 321) te legure s oznakom 'H' posebno su sklone formiranju pukotina ovoga tipa. Mehanizam nastanka pukotina koje nastaju naknadnim zagrijavanjem zavarenog spoja događa se u dvije faze. U prvoj fazi, na visokim temperaturama koje se tijekom zavarivanja pojavljuju u ZUT-u, raspadaju se i otapaju u matrici prisutni karbidi. Metal zavara također sadrži ugljik i karbidotvorne elemente (Nb, Ti). U drugoj fazi, tijekom naknadnog zagrijavanja zavarenog

spoja, dolazi do ponovne precipitacije karbida u metalu zavora i ZUT-u. Nastali precipitati značajno povećaju čvrstoću ali smanjuju duktilnost zavarenog spoja. Ukoliko se uz navedeni pad duktilnosti u zavarenom spoju istovremeno pojavljuju značajnije lokalne deformacije (uslijed popuštanja zaostalih naprezanja) može se očekivati pojava pukotina. Dinamika precipitacije i sklonost austenitnog nehrđajućeg čelika pojavi pukotina tijekom naknadne toplinske obrade iskazuje oblik C-krivulje u dijagramu vrijeme–temperatura–precipitacija. Primjer za leguru 347 vidljiv je na slici 2.12. Ispitivanje je provedeno za uzorke opterećene s 100 % i 75 % granice razvlačenja, što su realistične vrijednosti naprezanja koja mogu zaostati u zavarenom spoju. Pojava pukotina može se očekivati ukoliko krivulja temperaturnog ciklusa u zavarenom spoju tijekom naknadnog zagrijavanja presiječe C-krivulju.



Slika 2.12 Pojava pukotina uzrokovana naknadnom toplinskom obradom (legura 347), [51]

Sprječavanje pojave pukotina uslijed naknadne toplinske obrade kod legura koje su im sklone nije jednostavan zadatak. Općenito vrijedi da povećani udio nečistoća u kemijskom sastavu povećava vjerojatnost pojave ovih pukotina jer slabi veze između kristalnih zrna. Sitnozrnata struktura u ZUT-u i manji toplinski unos imaju povoljan utjecaj na sprječavanje pojave ovih pukotina. Poželjan utjecaj imaju i sve druge radnje koje smanjuju intenzitet zaostalih naprezanja u zavarenom spoju: postizanje odgovarajuće geometrije poprečnog presjeka metala zavora; izbjegavanje pojave koncentracije naprezanja (oštri prijelazi s metala zavora na osnovni metal, uključine troske, nepotpuno protaljivanje i penetracija); mehaničko očvršćavanje površine zavora.

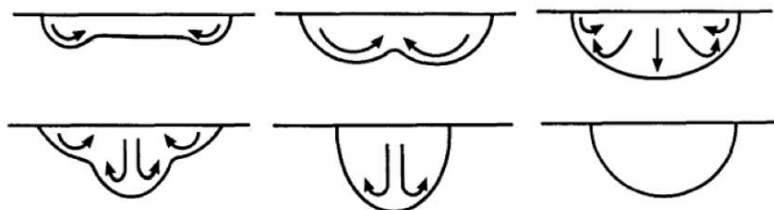
2.7 TIG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika — zona taljenja

Zona taljenja kod TIG zavarivanja nastaje kao posljedica lokalnog djelovanja električnog luka na osnovni metala. Postizanje željenog oblika zone taljenja važno je iz više razloga:

- omogućuje ostvarivanje zavarenog spoja zadovoljavajuće kvalitete,
- smanjuje mogućnosti pojave pogrešaka u zavarenom spoju,
- povećanje dubine zone taljenja pozitivno utječe na produktivnost procesa,
- povoljnija geometrija zone taljenja smanjuje unos topline i deformacije zavarene konstrukcije.

Kontrola nad geometrijom zone taljenja važna je i za napredak aditivnih tehnologija proizvodnje koje koriste zavarivačke procese i iskazuju veliki potencijal za industrijsku primjenu. Šest osnovnih oblika zone taljenja prikazani su na slici 2.13. Kod svih prikazanih

oblika osim zadnjeg, konvekcija u tekućem metalu (smjer označen strelicama) može imati bitan utjecaj na prijenos topline i razvoj oblika zone taljenja.



Slika 2.13 Različiti oblici zone taljenja i smjer konvekcije koji na njih utječe, [15]

Kao karakteristične dimenzije zone taljenja kod nepotpune penetracije obično se uzimaju njezina dubina (dubina penetracije) i širina. Često se potom izračunava njihov omjer dijeljenjem dubine penetracije sa širinom zone taljenja (D/W omjer). Vrijednost D/W omjera općeprihvaćena je mjera koja karakterizira geometriju zone taljenja. Kod potpune penetracije, uobičajeno je za karakteristične dimenzije zone taljenja uzeti njezinu širinu sa strane lica i njezinu širinu sa strane korijena.

Konačan oblik i geometrija zone taljenja ovise o čitavom nizu faktora koji mogu izravno ili neizravno utjecati na količinu topline koja se generira u električnom luku, prenosi u osnovni metal, a potom i širi kroz metal [15], [8], [54]. Kod metala koji imaju nisku toplinsku vodljivost, poput austenitnog nehrđajućeg čelika, konvektivni prijenos topline u tekućem metalu može imati bitan utjecaj na formiranje zone taljenja. Smjer i intenzitet sila koje pokreću ovo strujanje ovisi o odabranim zavarivačkim parametrima koji na taj način neizravno utječu na granicu taljenja [30], [4], [21], [35]. Tlak električnog luka također je pod utjecajem zavarivačkih parametara, a može izazvati depresiju slobodne površine tekućeg metala i tako utjecati na prijenos topline u osnovni metal [25], [55].

Zbog složenih zbivanja koja se odvijaju tijekom elektrolučnog zavarivanja čak i suptilne promjene mogu rezultirati zonama taljenja čija se geometrija međusobno bitno razlikuje. Ovu problematiku za TIG proces zavarivanja detaljno su obradili Mills i Keene [15]. Ustanovljeno je kako i mala razlika u kemijskom sastavu metala zavara može dovesti do formiranja značajno različite zone taljenja, na što posebno djeluju površinski aktivni elementi (sumpor, kisik, selen i dr.) zbog njihovog utjecaja na površinsku napetost tekućeg metala. U cilju povećanja dubine penetracije razvijeni su i posebni aktivni premazi koji se nanose na osnovni metal prije TIG zavarivanja, a njihovo djelovanje također se povezuje s promjenom površinske napetosti tekućeg metala, [56]. Velik broj autora posvetio je istraživanje upravo ovoj problematici [57], [13], [58], [59], [60].

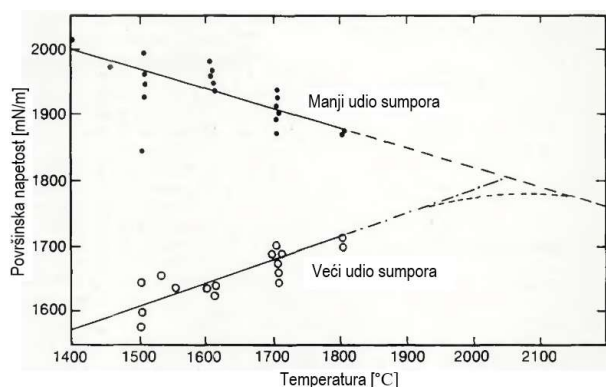
U nastavku poglavlja obrađen je pregled literature u kojoj je analiziran utjecaj kemijskog sastava osnovnog metala i osnovnih zavarivačkih parametara TIG procesa na značajke zavarenog spoja kod austenitnih nehrđajućih čelika s naglaskom na geometriju zone taljenja.

2.7.1 Utjecaj kemijskog sastava osnovnog metala na zonu taljenja

Jedan od glavnih razloga za odstupanje dimenzija zona taljenja pod jednakim zavarivačkim parametrima obično je vrlo mala promjena u kemijskom sastavu metala koji se zavaruje. Konačan oblik zone taljenja osobito je osjetljiv na udio površinskih aktivnih elemenata poput sumpora, kisika, selena i aluminija u metalu, [15], [61]. Naime, navedeni elementi mogu dovesti do promjene smjera konvektivnog strujanja tekućeg metala utječući na njegovu površinsku

napetost, odnosno Marangonijevu konvekciju. Konvekcija može biti dominantan mehanizam prijenosa topline u talini, osobito kod metala koji imaju relativno malen koeficijent toplinske vodljivosti — pokazatelj omjera konvektivnog i konduktivnog prijenosa topline u fluidu (tekući metal) je bezdimenzionalni Pécletov broj. Ovdje je važno naglasiti da razlika u geometriji zone taljenja između dva osnovna metala s različitim udjelom površinskih aktivnih elemenata ne mora nužno nastupiti. Naime, nastupanje navedene razlike uvelike ovisi o zavarivačkim parametrima koji neizravno utječu na Pécletov broj, što je detaljno istraženo u znanstvenom radu Pitscheneder i ostali [62]. Autori su utvrdili kako očekivana razlika u geometriji zone taljenja između uzoraka s različitim udjelom sumpora neće biti ostvarena ukoliko su brzina strujanja tekućeg metala i dimenzije taline relativno male. U takvim slučajevima dolazi do smanjenja vrijednosti Pécletovog broja.

Burgard i Heiple [47] pokazali su kako relativno male razlike u količini sumpora i selena u autenitnom nehrđajućem čeliku (legura 304) mogu uzrokovati značajno drugačiji odnos između zavarivačkih parametara i geometrije zone taljenja. Eksperimenti su provedeni na tri različita uzorka: standardnoj leguri 304 s 20 ppm sumpora u kemijskom sastavu, leguri 304 koja je pretaljivanjem ciljano dopirana s 76 ppm sumpora te leguri 304 koja je pretaljivanjem dopirana s 47 ppm selena. Nakon autogenog TIG zavarivanja i metalografske analize uočene su znatne razlike u D/W omjeru zone taljenja za tri uzorka. Autori pojašnjavaju kao su upravo male količine površinskih aktivnih elemenata poput sumpora i selena uzrokovale promjenu površinske napetosti tekućeg metala, te tako utjecale na intenzitet i smjer Marangonijeve konvekcije u talini, i u konačnici izmijenile oblik zone taljenja. Na slici 2.14 nalazi se prikaz površinske napetosti u ovisnosti o temperaturi za austenitni nehrđajući čelik 316 u tekućem stanju s različitim udjelom sumpora u kemijskom sastavu. Razlika u udjelu sumpora je svega 160 ppm ali zona taljenja kod uzorka s većim udjelom sumpora ima značajno veći D/W omjer nakon zavarivanja.



Slika 2.14 Površinska napetost u ovisnosti o temperaturi za leguru 316 [47]

Shirali i Mills [9] također su proučavali kako na oblik zone taljenja kod TIG zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika (legure 304 i 316) utječe udio sumpora u osnovnom metalu. Uzorci na kojima su provedeni eksperimenti imali su nizak udio sumpora (do 15 ppm), srednje visok udio sumpora (od 50 ppm do 75 ppm) i visok udio sumpora (od 95 ppm do 130 ppm) u kemijskom sastavu. Opažanja autora Shirali i Mills u skladu su s istraživanjem Burgard i Heiple [47].

Utjecaj manje količine aluminija na strujanje tekućeg metala uzrokovano gradijentom površinske napetosti istražili su Heiple i Roper [61]. Pokazali su kako u pojedinim slučajevima, kad je prisutnost sumpora veoma mala, aluminij također može imati indirektan utjecaj na površinsku napetost taline. Naime, aluminij ima snažan afinitet prema kisiku zbog čega se s

njim spaja i tako utječe na udio kisika u tekućem metalu. Budući da je kisik površinski aktivan element, zbog smanjenja njegovog udjela u talini uslijed vezivanja s aluminijem, talini se mijenja površinska napetost. Rezultirajuća Marangonijeva konvekcija pod utjecajem aluminija ima smjer strujanja od centra taline prema njezinom rubu, što smanjuje dubinu penetracija, a povećava širinu zone taljenja (smanjenje D/W omjera) — upravo suprotno u odnosu na efekt koji uzrokuje povećana prisutnost sumpora u talini.

Hsieh i ostali [37] također potvrđuju kako povećanje udjela sumpora i kisika u tekućem metalu u pravilu uzrokuje povećanje D/W omjera zone taljenja. Autori također dokazuju kako prisutnost aluminija smanjuje D/W omjer zone taljenja, što je u skladu s istraživanjem Heiple i Roper [61]. Utvrđeno je i kako manje promjene udjela silicija (Si) i fosfora (P) u kemijskom sastavu osnovnog metala nemaju značajniji utjecaj na D/W omjer. Istraživanje koje su proveli Rodrigues i Loureiro [63] također se jednim dijelom odnosi na utjecaj kemijskog sastava osnovnog metala na oblik zone taljenja. Analizom je utvrđeno kako je rasipanje karakterističnih geometrijskih vrijednosti zone taljenja (dubina penetracije, širina zone taljenja i njihov omjer) kod uzoraka iz iste proizvodne šarže manje u odnosu na uzorke iz različitih šarži. Autori također napominju kako bi element kalcij mogao imati utjecaj na geometriju zone taljenja budući da je rasipanje širine i dubine zone taljenja vrijednosti uočeno i kod uzoraka s jednakim udjelom sumpora i kisika u kemijskom sastavu.

U tablici 2.7 zbirno je prikazano kako promjena udjela nekog od elemenata (sumpor, selen, fosfor, silicij, aluminij, bizmut) prisutnog u kemijskom sastavu osnovnog metala utječe na geometrijske značajke zone taljenja kod TIG zavarivanja. Utjecaj sumpora i kisika najsnažnije je izražen ali njega treba promatrati u okviru drugih prisutnih elemenata — primjerice, količina aluminija može odrediti utjecaj sumpora na D/W omjer zone taljenja (vidjeti istraživanje Pollard [64]).

Tablica 2.7 Utjecaj količine površinskih aktivnih elemenata na oblik zone taljenja

Istraživanje	TIG varijanta	Zaštitni plin	Osnovni metal	Utjecajni element / promatrani raspon [ppm] ili [%]	D/W omjer	Dubina penetracije [mm]	Širina zone taljenja [mm]
Burgard i	TIG	Ar	304	S / 20–76 ppm	↑	↑	-
Heiple [47]	TIG	Ar	304	Se / 0–47 ppm	↑	↑	-
Shirali i	TIG	Ar	316	S / 75–130 ppm	↑	↑	-
Mills [9]	TIG	Ar	316	S / 15–75 ppm	↑	↑	-
	TIG	Ar	304	P / 65–260 ppm	=	-	-
	TIG	Ar	304	Si / 340–690 ppm	=	-	-
Hsieh i ostali [37]	TIG	Ar	304	S / 30–140 ppm	↑	↑	-
	TIG	Ar+5%H ₂	304	S / 30–140 ppm	↑	↑	-
	TIG	Ar+1%O ₂	304	S / 30–140 ppm	↓	↓	-
	TIG	Ar	304	Al / 50–90 ppm	↓	↓	-
Takeuchi i ostali [65]	TIG	Ar	304	Bi / 0,04–0,14 %	↑	↑	↓
	TIG	Ar	304	Al / 10–310 ppm	↓=	↓=	-
	TIG	Ar	304	Si / 0–0,92 %	↑↓	↑↓	-
Pollard [64]	TIG	Ar	304	Mn / 0,05–2,05 %	↑↓	↑↓	-
	TIG	Ar	304	P / 50–190 ppm	=	=	-
	TIG	Ar	304	S / 40–180 ppm	=*	=*	-
	TIG	Ar	304	S / 40–510	↑=**	↑=**	-

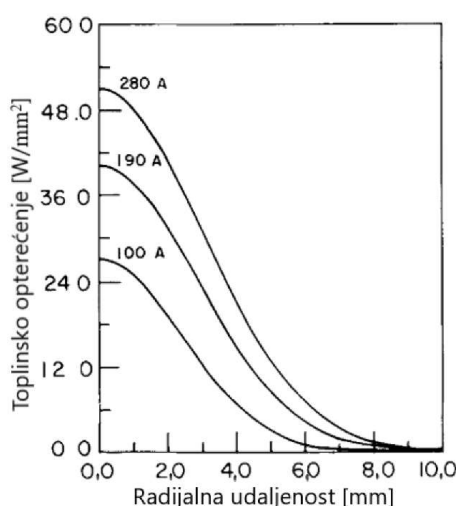
* za uzorke s udjelom Al < 0,004 %; **za uzorke 0,02 % < Al < 0,04 %

↑ povećanje vrijednosti u promatranom intervalu; ↓ smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu;
 = nema značajne promjene vrijednosti u promatranom intervalu; - podatak nepoznat
 Moguća je i kombinacija simbola npr. ↑↓ koji znači povećanje, a zatim smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu ili
 ↑= koji znači povećanje, a potom nema značajnije promjene vrijednosti

2.7.2 Utjecaj jakosti struje na zonu taljenja

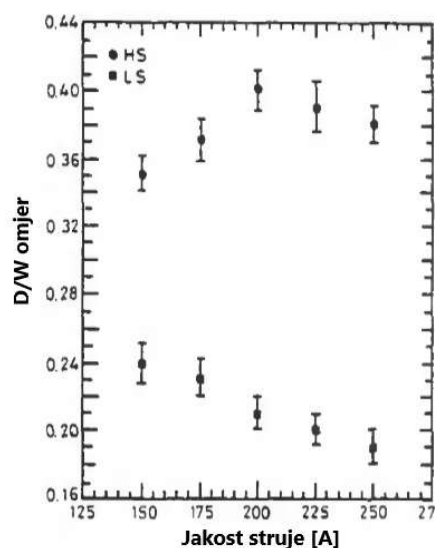
Smatra se kako je jakost struje zavarivanja varijabla koja najsnažnije utječe na oblik i veličinu zone taljenja. Povećanje jakosti struje povećava snagu električnog luka i količinu topline koja se unosi u osnovni metal, što za posljedicu ima povećanje volumena zone taljenja. Međutim, veća jakost struje ne mora se nužno odraziti na povećanje dubine penetracije kojoj se često teži. Ovo ovisi o smjeru i intenzitetu strujanja tekućeg metala na koje snažno utječe Marangonijeva konvekcija koju kontroliraju površinski aktivni elementi poput kisika, sumpora ili selena.

Izravna mjerenja toplinskog opterećenja kojim električni luk djeluje na vodom hlađenu bakrenu anodu za različite jakosti struje proveli su Tsai i Eagar [66], slika 2.15. Potrebno je napomenuti kako se izmjerene vrijednosti na korištenom eksperimentalnom uređaju vjerojatno značajnije razlikuju u odnosu na stvarnu situaciju kad se u procesu zavarivanja pojavljuju talina i metalne pare. Unatoč tome, ovakva mjerenja imaju kvalitativnu vrijednost kojom ukazuju kako se ponaša distribucija toplinskog opterećenja s promjenom jakosti struje — veća jakost struje rezultira povećanjem vršne vrijednosti toplinskog opterećenja ali i proširuje zonu na koju toplina djeluje (povećanje distribucijskog parametra). Integracijom izmjerenih distribucija autori su izračunali kako se za njihov eksperimentalni postav iskoristivost električnog luka smanjuje s povećanjem jakosti struje.



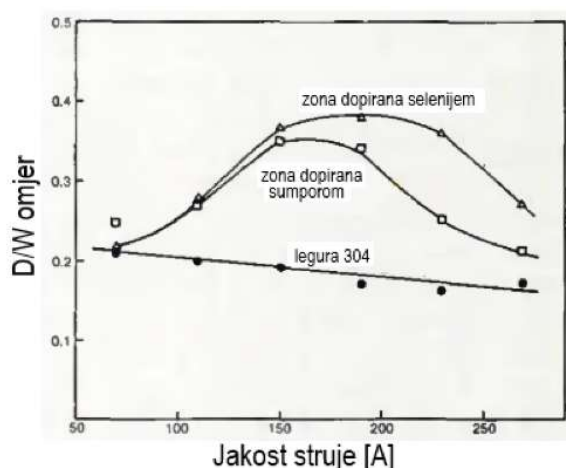
Slika 2.15 Utjecaj jakosti struje na toplinsko opterećenje vodom hlađene bakrene anode, [66]

Autori Shirali i Mills [9] analizirali su kako na geometriju zone taljenja (D/W omjer) utječe jakost struje zavarivanja za austenitni nehrđajući čelik (legura 316) s relativno niskim (LS, 15 ppm) i visokim (HS, od 95 ppm do 130 ppm) udjelom sumpora u kemijskom sastavu, slika 2.16. Smatra se kako Marangonijeva konvekcija za LS uzorke uzrokuje strujanje tekućeg metala od centra taline prema njezinim rubovima što rezultira plitkom i širokom zonom taljenja (nizak D/W omjer). Za HS uzorke smjer Marangonijeve konvekcije je suprotan (tekući metal struji od ruba taline prema njezinom centru) zbog čega se povećava dubina i smanjuje širina zone taljenja (veći D/W omjer). Zanimljivo je kako povećanje jakosti struje uzrokuje povećanje penetracije kod HS uzoraka, dok kod LS uzoraka ima suprotno djelovanje tj. smanjuje dubinu penetracije. Autori ovu pojavu obrazlažu povećanjem intenziteta Marangonijeve konvekcije na većoj jakosti struje uslijed većeg temperaturnog gradijenta koji se javlja u zoni tekućeg metala. Maksimalni D/W omjer za HS uzorke utvrđen je za jakost struje od 200 A, što je slično kao u istraživanju Burgardta i Heiplea [47], a vjerojatan uzrok je prekoračenje kritične temperature od 2050 °C iznad koje Marangonijeva konvekcija mijenja svoj smjer.



Slika 2.16 Utjecaj jakosti struje na omjer dubine penetracije i širine zavora (D/W), [9]

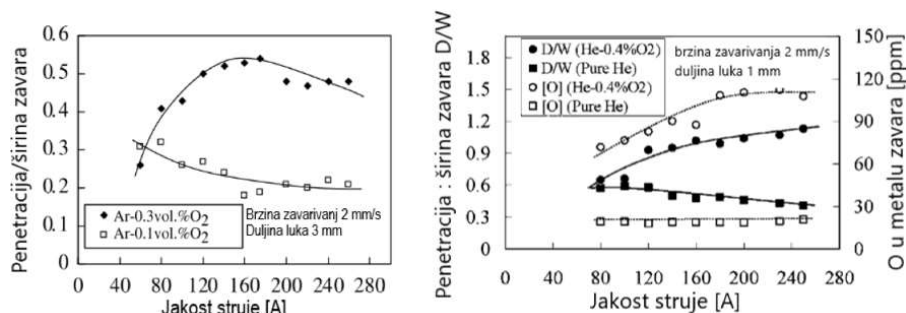
Burgardt i Heiple [47] utvrdili su kako se D/W omjer zone taljenja blago smanjuje u rasponu jakosti struje od 70 A do 270 A za autogeno TIG zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika (legura 304). Međutim, značajna promjena D/W omjera uočena je u zonama osnovnog metala koje su bile ciljano dopirane sa 76 ppm sumpora, odnosno 47 ppm selen, slika 2.17. Naime, elementi S i Se spadaju u površinski aktivne elemente koji mijenjaju površinsku napetost tekućeg metala a koja pak određuje smjer i intenzitet Marangonijeve konvekcije. Autori su smanjenje D/W omjera za zone dopirane selenom i sumporom iznad približno 180 A obrazložili prekoračenjem kritične temperature od 2050 °C iznad koje Marangonijeva konvekcija mijenja smjer.



Slika 2.17 D/W omjer u ovisnosti o jakosti struje za leguru 304, [47]

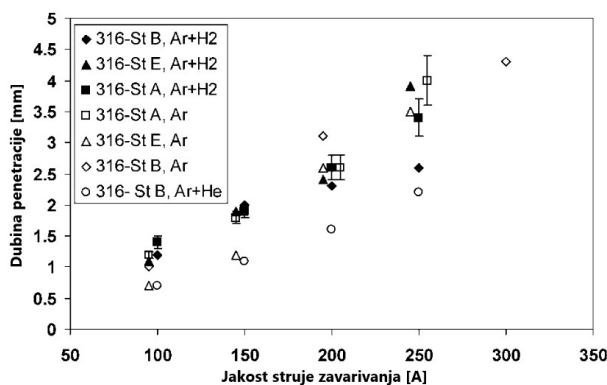
Sličan odnos D/W omjera i jakosti struje primijetili su Lu et. al [67] i [10] kod istraživanja provedenog na leguri austenitnog nehrđajućeg čelika 304 uz korištenje više različitih zaštitnih plinova (mješavine Ar-O₂ i He-O₂ i tehnički čisti He), slika 2.18. Autori zaključuju da kombinacija udjela kisika (površinski aktivnog elementa) i temperaturnog gradijenta na površini taline kontrolira smjer i intenzitet Marangonijevog konvekcije u tekućem metalu, što snažno utječe na oblik zone taljenja. Kisik iz zaštitnog plina reagira s metalom zavora i ulazi u

njegov kemijski sastav, a njegov udio u zoni taljenja izmjeren je nakon zavarivanja kako bi se analizirao utjecaj na geometriju zone taljenja. Kod udjela kisika u kemijskom sastavu tekućeg metala iznad približno 100 ppm Marangonijeva konvekcija ima smjer od ruba prema centru taline (za vrijednosti ispod 100 ppm O₂ u talini smjer Marangonijeve konvekcije je obratan) što povećava D/W omjer zone taljenja.



Slika 2.18 Utjecaj jakosti struje na D/W omjer, [67] i [10]

Utjecaj jakosti struje (od 100 A do 300 A), tri različita zaštitna plina (čisti Ar, mješavina Ar-5%H i mješavina Ar-50%He) i dva različita aktivna premaza koji poboljšavaju taljenje osnovnog metala na geometriju zone taljenja istražili su Rodrigues i Loureiro [63]. Autori su eksperimente proveli na tri različite šarže autenitnog nehrđajućeg čelika 316, a kemijskom analizom utvrđena su manja odstupanja u njihovom kemijskom sastavu. Uočeno je kako je rasipanje vrijednosti dubine penetracije veće između eksperimenata provedenih na različitim šaržama nego unutar iste šarže. Poznato je da na ovu pojavu mogu utjecati različiti udjeli sumpora i kisika u osnovnom metalu, ali budući da su oni bili jednaki u dvije šarže, autori pretpostavljaju da je element kalcij uzrok navedenog rasipanja. Utjecaj jakosti struje na dubinu penetracije uz korištenje različitih zaštitnih plinova prikazan je na slici 2.19. Jasno je vidljivo povećanje dubine penetracije za sve uzorke i različite zaštitne plinove.



Slika 2.19 Utjecaj jakosti struje i različitih plinova na dubinu penetracije, [63]

Utjecaj jakosti struje na geometriju zone taljenja kod TIG zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika za pregledanu literaturu zbirno je prikazan u tablici 2.8. Iz rezultata je vidljivo kako povećanje jakosti struje u pravilu povećava dubinu penetracije i širinu zone taljenja — iznimka je istaživanje Shirali i Mills [9] u kojem su autori uočili smanjenje penetracije u promatranom rasponu jakosti struje kod uzoraka s malim udjelom sumpora u kemijskom sastavu. S druge strane, D/W omjer zone taljenja može iskazati različitu ovisnost o povećanju jakosti struje, što implicira kako kemijski sastav osnovnog metala i ostali zavarivački parametri (koji se u istraživanjima razlikuju) također utječu na ovaj odnos.

Tablica 2.8 Utjecaj povećanja jakosti struje na geometriju zone taljenja

Istraživanje	TIG varijanta	Zaštitni plin	Osnovni metal	Istraženi raspon [A]	D/W omjer	Dubina penetracije [mm]	Širina zone taljenja [mm]
Burgard i Heiple [47]	TIG	Ar	304	70–270	↓	-	-
			304 S*	70–270	↑↓	-	-
			304 Se*	70–270	↑↓	-	-
			* osnovni metal dopiran sa sumporom (76 ppm), odnosno selenom (47 ppm)				
Feng i ostali [14]	K-TIG	Ar	316L	410–530	↑	↑	↑
Huang i ostali [68]	TIG	Ar	304	100–200	↑↓	↑	↑
	A-TIG	Ar	304	100–200	↓	↑	↑
Jamshid i ostali [69]	TIG	Ar	304	110–200	↓	↑	↑
Lu i ostali [10]	TIG	He	304	80–250	↓	-	-
	TIG	He+0,4%O ₂	304	80–250	↑	-	-
Lu i ostali [67]	TIG	Ar+0,1%O ₂	304	60–260	↑↓	-	-
	TIG	Ar+0,3%O ₂	304	60–260	↓	-	-
Mohan i ostali [58]	TIG	Ar	321	120–220	↑	↑	↑
	A-TIG		321	120–220	↑	↑	↑
Rodrigues i Loureiro [63]	TIG	Ar	316*	100–300	↓↑/↑/↑	↑	-
	TIG	Ar+5%H	316*	100–300	=/↑↓↑/↑↓	↑	-
	TIG	50%Ar+50%He	316	100–300	=	↑	-
* tri uzorka iz različitih šarži (kemijski sastav uzoraka malo se razlikuje)							
Shirali i Mills [9]	TIG	Ar	316 HS*	150–250	↓↑	↑	↑
	TIG	Ar	316 LS*	150–250	↓	↓	↑
* uzorak HS sadrži 95–130 ppm, a uzorak LS 15 ppm sumpora u kemijskom sastavu							
Stadler i ostali [11]	TIG	70%He+30%Ar	304L	100–150	↓↑*	↑	↑
* stacionaran luk, D/W omjer ovisi o vremenu zavarivanja							
Vasudevan [70]	TIG	Ar	304LN	60–200	↓	↑	↑
	A-TIG	Ar	304LN	60–200	↑↓	↑	↑
	TIG	Ar	316LN	60–240	↓	↑	↑
	A-TIG	Ar	316LN	60–240	↑↓	↑	↑

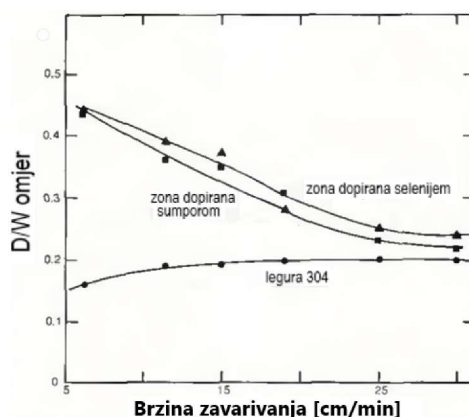
↑ povećanje vrijednosti u promatranom intervalu; ↓ smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu;
 = nema značajne promjene vrijednosti u promatranom intervalu; - podatak nepoznat
 Moguća je i kombinacija simbola npr. ↑↓ koji znači povećanje, a zatim smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu ili ↑= koji znači povećanje, a potom nema značajnije promjene vrijednosti

2.7.3 Utjecaj brzine zavarivanja na zonu taljenja

Brzina zavarivanja ima direktan utjecaj na količinu topline po jedinici duljine (J/m) koja se tijekom zavarivanja unese u osnovni metal. Također vrijedi da se volumen taline, temperaturni gradijent i maksimalna temperatura na površini tekućeg metala smanjuju s povećanjem brzine zavarivanja. Navedeno može imati važne posljedice na oblik zone taljenja, posebno kad Marangonijev konvektivni prijenos topline dominira u tekućem metalu.

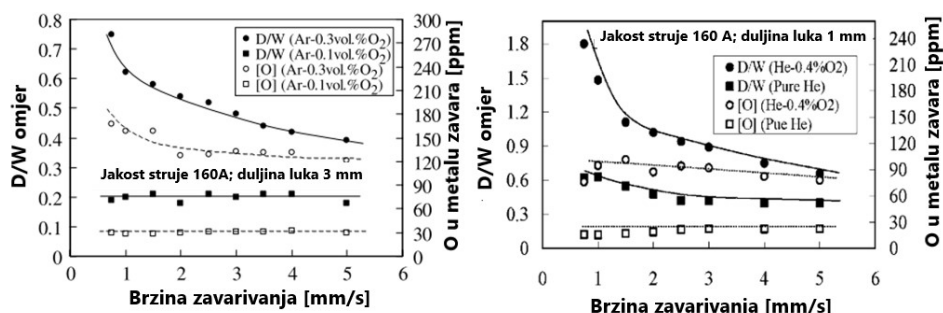
Utjecaj brzine zavarivanja na geometriju zone taljenja (D/W omjer) istraživali su Burgardt i Heiple [47]. Autori su primjetili kako D/W omjer kod standardnog austenitnog nehrđajućeg čelika (legura 304) ne ovisi značajnije o brzini zavarivanja. Međutim, za eksperimente kod kojih su uzorci legure 304 dopirani sa sumporom ili selenom, D/W omjer se znatno smanjio s povećanjem brzine zavarivanja, slika 2.20. Autori su ovo objasnili smanjenjem temperaturnog gradijenta na površini tekućeg metala pri većim brzinama zavarivanja. Naime, manji

temperaturni gradijent uzrokuje smanjenje intenziteta Marangonijeve konvekcije koja kod osnovnog metala dopiranog sumporom i selenom pokreće intenzivno strujanje tekućeg metala od ruba taline prema njezinom centru — navedeno u konačnici smanjuje dubinu penetracije, odnosno D/W omjer. Smanjenje temperaturnog gradijenta na površini tekućeg metala sa standardnim kemijskim sastavom (i smjerom Marangonijeve konvekcije od njezina centra prema rubu) kompenzirano je smanjenjem širine zone taljenja pa D/W omjer u konačnici nije značajnije promjenjen [10].



Slika 2.20 Utjecaj brzine zavarivanja na D/W omjer, [47]

Lu et. al [67] i [10] istražili su kako brzina zavarivanja utječe na geometriju zone taljenja ali i sadržaj kisika u metalu zavara kod TIG zavarivanja austenitnog nehrđajućeg čelika 304. Utvrđeno je kako se D/W omjer smanjuje s porastom brzine zavarivanja pod zaštitnim plinom Ar-0,3%O₂, ali ostaje približno konstantan kod korištenja zaštitne plinske mješavine Ar-0,1%O₂. Ova pojava se za mješavinu Ar-0,3%O₂ može pojasniti smanjenjem temperaturnog gradijenta na površini tekućeg metala pri većoj brzini zavarivanja — manji temperaturni gradijent smanjuje intenzitet Marangonijeve konvekcije koja ima smjer od ruba taline prema njezinoj centru (udio kisika veći od kritičnih 100 ppm). Međutim, smanjenje intenziteta Marangonijeve konvekcije koja kod zaštitne mješavine Ar-0,1vol%O₂ ima smjer od centra taline prema njezinom rubu (udio kisika manji od kritičnih 100 ppm) nije se dogodilo — potencijalni pad temperaturnog gradijenta na površini tekućeg metala kompenziran je smanjenjem širine zone taljenja pa D/W omjer ostaje približno jednak. Analogno objašnjenje autori su ponudili i za objasniti odnos brzine zavarivanja i D/W omjera kod korištenja tehnički čistog helija i mješavine He-0,4%O₂.



Slika 2.21 Utjecaj brzine zavarivanja na D/W omjer i udio kisika u metalu zavara, [67] i [10]

Utjecaj brzine zavarivanja na geometriju zone taljenja kod TIG zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika za pregledanu literaturu zbirno je prikazan u tablici 2.9. Može se uočiti kako

povećanje brzine zavarivanja rezultira smanjenjem dubine penetracije i širine zone taljenja. U većini istraživanja došlo do pada D/W omjera s povećanjem brzine zavarivanja. Međutim ovaj odnos ovisi o intenzitetu i smjeru Marangonijske konvekcije a ona je pak u složenom odnosu s kemijskim sastavom tekućeg metala te temperaturom i temperaturnim gradijentom na njegovoj površini.

Tablica 2.9 Utjecaj povećanja brzine zavarivanja na geometriju zone taljenja

Istraživanje	TIG varijanta	Zaštitni plin	Osnovni metal	Istraženi raspon [cm/min]	D/W omjer	Dubina penetracije [mm]	Širina zone taljenja [mm]
Burgard i Heiple [47]	TIG	Ar	304	6,3–30	↑=	-	-
			304 Se	6,3–30	↓	-	-
			304 S	6,3–30	↓	-	-
<i>* osnovni metal dopiran sa sumporom (76 ppm), odnosno selenom (47 ppm)</i>							
Feng i ostali [14]	K-TIG	Ar	316L	31–49	↓	↓	↓
Jamshid i ostali [69]	TIG	Ar	304	10–15	↓↑	↓	↓
Lu i ostali [10]	TIG	He	304	4,5–30	↓	-	-
Lu i ostali [10]	TIG	He+0,4%O ₂	304	4,5–30	↓	-	-
Lu i ostali [67]	TIG	Ar+0,1%O ₂	304	4,5–30	↓=	-	-
Lu i ostali [67]	TIG	Ar+0,3%O ₂	304	4,5–30	↓	-	-
Mohan i ostali [58]	TIG	Ar	321	12–18	↓	↓	↓
	A-TIG		321	12–18	↓	↓	↓
Shirali i Mills [9]	TIG	Ar	316 HS*	7,5–22,5	↓	↓	↓
	TIG	Ar	316 LS*	7,5–22,5	↓	↓	↓
<i>* uzorak HS sadrži 95-130 ppm, a uzorak LS 15 ppm sumpora u kemijskom sastavu</i>							
Vasudevan [70]	TIG	Ar	304LN	6–21	-	↓	-
	A-TIG	Ar	304LN	6–21	-	↓	-
	TIG	Ar	316LN	6–21	-	↓	-
	A-TIG	Ar	316LN	6–21	-	↓	-
Giridharan i Murugan [71]	P-TIG	Ar	304L	11–19	↓	↓	↓

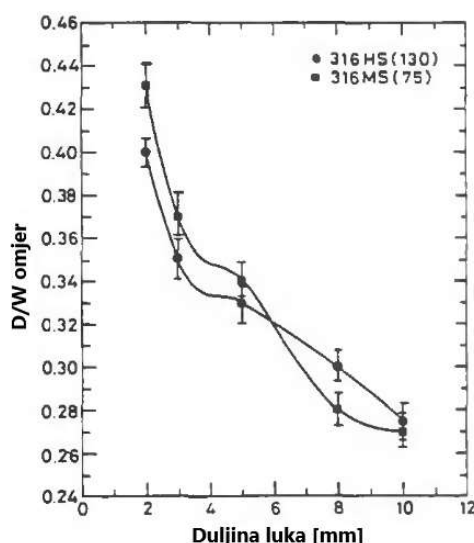
↑ povećanje vrijednosti u promatranom intervalu; ↓ smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu;
= nema značajne promjene vrijednosti u promatranom intervalu; - podatak nepoznat
Moguća je i kombinacija simbola npr. ↓↑ koji znači povećanje, a zatim smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu ili ↑= koji znači povećanje, a potom nema značajnije promjene vrijednosti

2.7.4 Utjecaj duljine električnog luka na zonu taljenja

Prema Shirali i Millsu [9] promjena duljine luka kod TIG zavarivanja ima nekoliko djelovanja na proces: utječe na brzinu strujanja plazme, mijenja veličinu anodne površine na osnovnom metalu (DCEN TIG konfiguracija), utječe na iskoristivost električnog luka i rezultira promjenom pada napona kroz stupac električnog luka. Rezultati eksperimenata navedenih autora ukazuju na smanjenje dubine penetracije s povećanjem duljine luka u rasponu od 2 mm do 10 mm (slika 2.22.), a povećava se i oksidacija metala zbog mješanja zraka i zaštitne atmosfere.

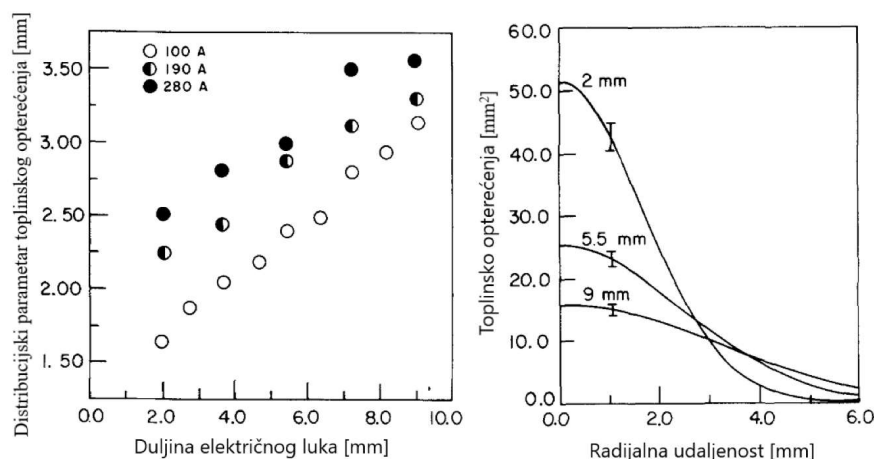
Autori Mills i Keene [15] naglašavaju kako je vjerojatno najvažnija značajka povećanja duljine električnog luka porast sile otpora strujanja plazme koja se javlja na površini tekućeg metala u radijalnom smjeru od centra taline prema njezinom rubu. Iz ovoga razloga, u pravilu se s

povećanjem duljine električnog luka očekuje povećanje širine zone taljenja, odnosno smanjenje D/W omjera.



Slika 2.22 Utjecaj duljine električnog luka na omjer dubine penetracije i širine zavora (D/W) za uzorke s različitim udjelom sumpora u kemijskom sastavu, [9]

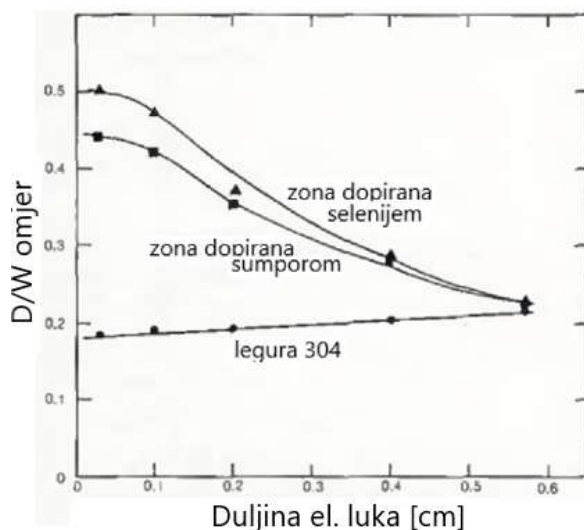
Tsai i Eagar [66] proveli su zanimljiva mjerenja toplinskog opterećenja vodom hlađene bakrene anode pod utjecajem različite duljine električnog luka kod DCEN-TIG zavarivanja. U eksperimentalnom uređaju koji su autori razvili ne dolazi do taljenja (niti pojave metalnih para) tako da se izmjerene vrijednosti kod stvarnog procesa vjerojatno razlikuju, ali provedena mjerenja donose vrijedne kvalitativne informacije. Utvrđeno je kako povećanje duljine električnog luka proširuje distribuciju toplinskog opterećenja — dolazi do povećanja vrijednosti distribucijskog parametra tj. polumjera na kojem toplinsko opterećenje djeluje. Također, povećanje duljine električnog luka smanjuje vršnu vrijednost toplinskog opterećenja na anodi, slika 2.23.



Slika 2.23 Promjena distribucijskog parametra i vrijednosti izmjerenog toplinskog opterećenja u ovisnosti o duljini električnog luka, [66]

Burgardt i Heiple [47] također su analizirali odnos između duljine luka i oblika zone taljenja kod austenitnog nehrđajućeg čelika 304. Ustanovili su da uzorci na kojima se postiže manja

penetracija (standardna legura 304) iskazuju blagi porast D/W omjera s povećanjem duljine električnog luka. Međutim, uzorci s dobrom penetracijom (dopirani sumporom i selenom) pokazali su značajan pad D/W omjera za povećanu duljinu luka, slika 2.24. Produljenje luka ima suprotan učinak na uzorke s malim i velikim početnim D/W omjerom što ide u prilog tvrdnji kako na oblik zone taljenja kod austenitnih nehrđajućih čelika uvelike utječe složeni konvektivni prijenos topline u tekućem metalu. Autori tvrde kako bi dominacija konduktivnog prijenosa topline rezultirala smanjenjem D/W omjera kod svih uzoraka.

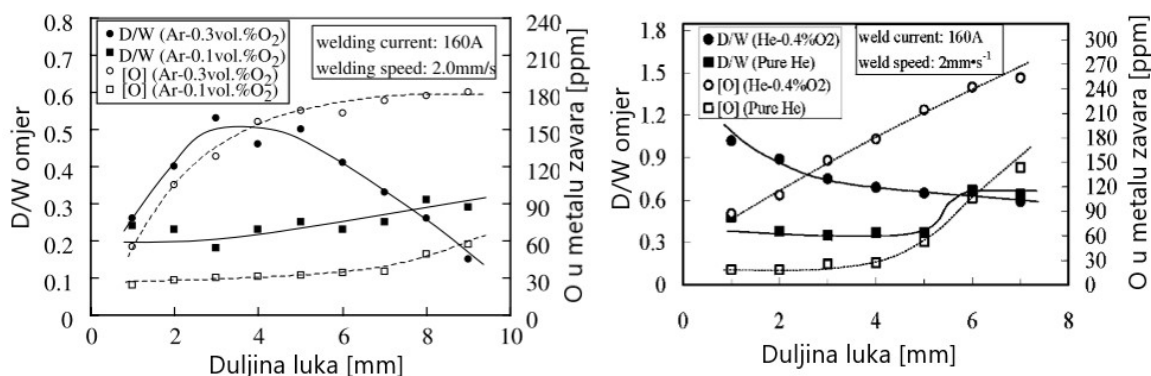


Slika 2.24 Utjecaj duljine luka na D/W omjer zone taljenja, [47]

Lu i ostali [67] i [10] istraživali su utjecaj duljine električnog luka (u rasponu od 1 mm do 9 mm) na geometriju zone taljenja kod austenitnog nehrđajućeg čelika (legura 304) uz korištenje zaštitnih plinskih mješavina na bazi Ar i He s manjim dodatcima kisika, slika 2.25 (lijevo). U zoni taljenja izmjerena je i udio kisika nakon zavarivanja. Utvrđeno je kako se pod zaštitom plinske mješavine Ar-0,3% O_2 omjer D/W u početku povećavao, a zatim se s daljnjim povećanjem duljine električnog luka smanjivao. Autori početno povećanje D/W omjera obrazlažu povećanjem udjela kisika u metalu zavora iznad kritičnih 100 ppm kod povećanja duljine električnog luka (intenzivnija disocijacija O_2 , a potom ulazak u tekući metal) što uzrokuje smjer Marangonijeve konvekcije od ruba prema centru taline (povećana penetracija). Naknadni pad D/W omjera kod plinske mješavine Ar-0,3% O_2 vjerojatno je uzrokovan padom temperaturnog gradijenta na površini tekućeg metala pri većim duljinama luka što smanjuje intenzitet Marangonijeve konvekcije. Omjer D/W pod zaštitom mješavine Ar-0,1% O_2 nije toliko osjetljiv na duljinu električnog luka u usporedbi s mješavinom Ar-0,3% O_2 . Naime, udio kisika u metalu zavora kod upotrebe mješavine Ar-0,1% O_2 ispod je kritičnih 100 ppm i Marangonijeva konvekcija ima smjer od centra prema rubu taline te nije toliko ovisna o duljini luka — smanjenje temperaturnog gradijenta na većim duljinama luka kompenzirano je istovremenim smanjenjem širine zone taljenja.

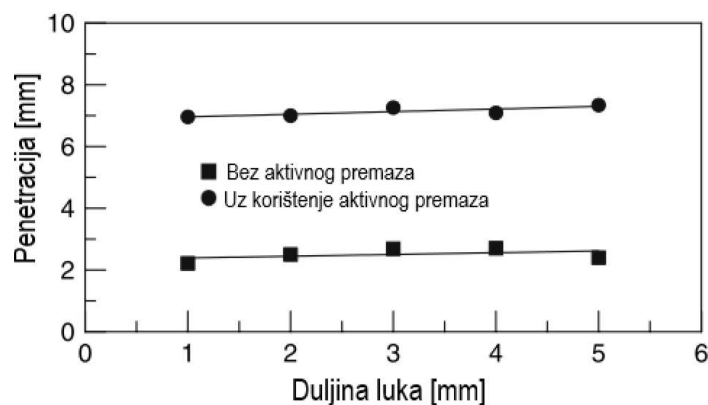
Zavisnost D/W omjera o duljini luka autori su analizirali i pod zaštitom tehnički čistog helija i plinske mješavine He+0,4% O_2 , slika 2.25 (desno). Ova opažanja se također mogu objasniti promjenama smjera i intenziteta Marangonijeve konvekcije — za udio kisika iznad kritičnih 100 ppm u metalu zavora Marangonijeva konvekcija ima smjer strujanja od ruba taline prema njezinom centru i povećava dubinu penetracije. To se primjerice dogodilo kod upotrebe tehnički čistog helija na duljini luka od 6 mm gdje se naglo povećanje D/W omjera obrazlaže povećanjem udjela kisika u talini, vjerojatno uslijed mješanja zaštitne i okolne atmosfere. Pod

zaštitom $\text{He}+0,4\%\text{O}_2$ omjer D/W blago se smanjuje tijekom povećanja duljine električnog luka zbog pada temperaturnog gradijenta na površini tekućeg metala što smanjuje intenzitet Marangonijeve konvekcije.



Slika 2.25 Utjecaj duljine luka na D/W omjer zone taljenja, [67] i [10]

U istraživanju Shyu i ostalih [72], orijentiranom na detaljnu analizu TIG procesa potpomognutog aktivnim premazima na površini osnovnog metala (austenitni nehrđajući čelik, legura 304) također se može pronaći utjecaj duljine električnog luka na dubinu penetracije, slika 2.26. Odabrana jakost struje bila je 150 A, brzina zavarivanja 150 mm/min, a kao zaštitni plin korišten je argon uz protok od 10 l/min. Vidljivo je kako povećanje duljine električnog luka u promatranom rasponu (od 1 mm do 5 mm) nema značajniji utjecaj na dubinu penetracije. Također, TIG zavarivanje uz korištenje aktivnog zaštitnog premaza očekivano je rezultiralo značajno većom penetracijom pri jednakoj duljini električnog luka.



Slika 2.26 Utjecaj duljine luka na dubinu penetracije, [72]

U tablici 2.10 zbirno je prikazan utjecaj povećanja duljine električnog luka na geometriju zone taljenja za austenitne nehrđajuće čelike. Autori su eksperimentima utvrdili različite zavisnosti, što upućuje na zaključak kako promjena duljine električnog luka ima složeno djelovanje na prijenos topline u osnovnom metalu. Očito je da na odnos duljine električnog luka i geometrije zone taljenja utjecaj imaju kemijski sastav osnovnog metala ali i odabir ostalih zavarivačkih parametara koji u pregledanoj literaturi nisu jednaki.

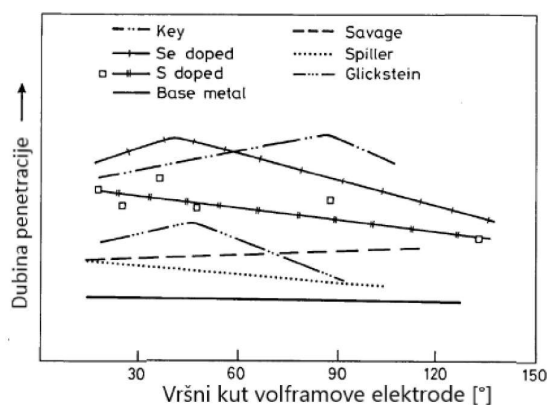
Tablica 2.10 Utjecaj povećanja duljine električnog luka na geometriju zone taljenja

Istraživanje	TIG varijanta	Zaštitni plin	Osnovni metal	Istraženi raspon [mm]	D/W omjer	Dubina penetracije [mm]	Širina zone taljenja [mm]
Burgard i Heiple [47]	TIG	Ar	304	0,3–3,7	↑	-	-
	TIG	Ar	304 Se*	0,3–3,7	↓	-	-
	TIG	Ar	304 S*	0,3–3,7	↓	-	-
* osnovni metal dopiran sa sumporom (76 ppm), odnosno selenom (47 ppm)							
Feng i ostali [14]	K-TIG	Ar	316L	2–3,5	↑↓	↑↓	↑
Lu i ostali [10]	TIG	He	304	1,0–7,0	=↑	-	-
	TIG	He+0,4%O ₂	304	1,0–7,0	↓	-	-
Lu i ostali [67]	TIG	Ar+0,1%O ₂	304	1,0–9,0	↑	-	-
	TIG	Ar+0,3%O ₂	304	1,0–9,0	↑↓	-	-
Mohan i ostali [58]	TIG	Ar	321	3,0–5,0	↓	↓	↓
	A-TIG	Ar	321	3,0–5,0	=↓	↓	↓
Shirali i Mills [9]	TIG	Ar	316 HS*	2,0–10,0	↓	-	-
	TIG	Ar	316 LS*	2,0–10,0	↓	-	-
* uzorak HS sadrži 95-130 ppm, a uzorak LS 15 ppm sumpora u kemijskom sastavu							
Shyu i ostali [72]	TIG	Ar	304	1,0–5,0	-	=	-
	A-TIG	Ar	304	1,0–5,0	-	=	-
Stadler i ostali [11]	TIG	30%Ar+70%He	304L	3,0–5,0	↑	↑	↑

↑ povećanje vrijednosti u promatranom intervalu; ↓ smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu;
 = nema značajne promjene vrijednosti u promatranom intervalu; - podatak nepoznat
 Moguća je i kombinacija simbola npr. ↑↓ koji znači povećanje, a zatim smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu ili ↑= koji znači povećanje, a potom nema značajnije promjene vrijednosti

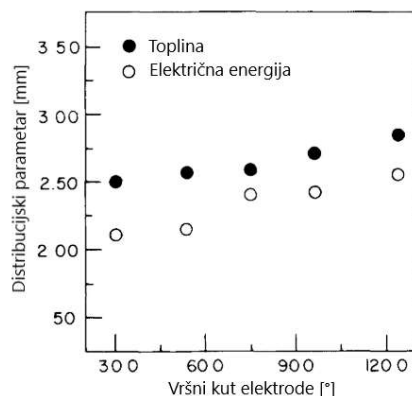
2.7.5 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na zonu taljenja

U znanstvenoj zajednici ne postoji konsenzus o odnosu između vršnog kuta volframove elektrode i geometrije zone taljenja. Naime, ovaj odnos zasigurno je složen i ovisi o odabiru drugih zavarivačkih parametara te može imati nekoliko bitnih fizikalnih djelovanja na TIG proces zavarivanja poput promjene distribucije i intenziteta toplinskog opterećenja na osnovnom metalu, promjene brzine strujanja plazme, a time i tlaka električnog luka koji djeluje na osnovni metal [15], [25]. Rezultati nekoliko različitih istraživanja utjecaja vršnog kuta volframove elektrode na dubinu penetracije prikazani su na slici 2.27.



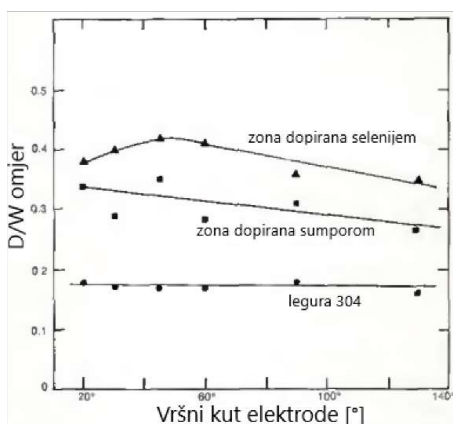
Slika 2.27 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na dubinu penetracije, [15]

Izravno mjerenje toplinskog opterećenja TIG procesa na vodom hlađenu bakrenu anodu za različite vršne kutove volframove elektrode proveli su Tsai i Eagar [66]. Mjerenja su provedena za jakost struje od 100 A i duljinu električnog luka od 5,5 mm. Odnos vršnog kuta i distribucijskog parametra koji definira radijus površine kroz koju toplina, odnosno električna energija prelazi u osnovni metal vidljiv je na slici 2.28. Iz provedenih mjerenja može se zaključiti kako povećanje vršnog kuta elektrode s 30 ° na 120 ° uzrokuje blago povećanje distribucijskog parametra što bi značilo da toplina djeluje na većoj površini osnovnog metala.



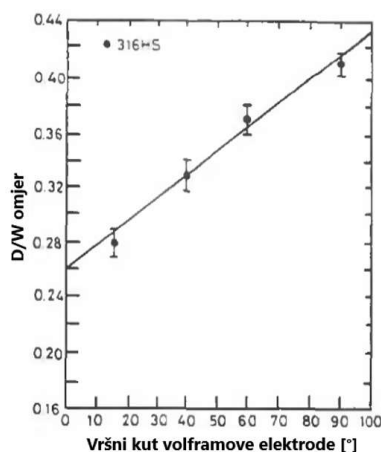
Slika 2.28 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na distribuciju topline i električne energije na osnovnom metalu, [66]

Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode u rasponu od 20 ° do 130 ° na D/W omjer zone taljenja analizirali su Burgardt i Heiple [47]. Kao osnovni metal korišten je austenitni nehrđajući čelik (legura 304), a pojedine zone osnovnog metala kontrolirano su dopirane selenom i sumporom. Navedeni elementi spadaju u površinski aktivne elemente (mijenjaju površinsku napetost tekućeg metala) i značajno utječu na oblik zone taljenja. Rezultati istraživanja (slika 2.29) ukazuju da kod uzoraka koji imaju manju penetraciju (malen D/W omjer) ne dolazi do značajnije promjene oblika zone taljenja s povećanjem vršnog kuta volframove elektrode. Međutim, kod uzoraka dopiranih sumporom uočeno je značajno smanjenje D/W omjera zone taljena pri povećanju vršnog kuta elektrode. Kod uzoraka dopiranih selenom maksimalni D/W omjer postignut je kod vršnog kuta od 45 °. Autori zaključuju kako kemijski sastav osnovnog metala očito ima značajnu ulogu u složenom odnosu između vršnog kuta volframove elektrode i geometrije zone taljenja.



Slika 2.29 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na geometriju zone taljenja, [47]

U istraživanju Shirali i Mills [9] ustanovljeno je povećanje dubine penetracije kod povećanja vršnog kuta volframove elektrode za leguru austenitnog nehrđajućeg čelika 304 s povećanim udjelom sumpora u kemijskom sastavu, slika 2.30. Autori napominju kako su navedeni rezultati u izravnoj suprotnosti s tvrdnjom da povećanje vršnog kuta elektrode povećava širinu toplinske distribucije na osnovnom metalu (smanjuje Lorentzovu silu i toplinski gradijent) — šira toplinska distribucija rezultirala bi smanjenjem D/W omjera zone taljenja.



Slika 2.30 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer zone taljenja, [9]

Rezultati znanstvenih istraživanja koji su analizirali odnos geometrije zone taljenja i vršnog kuta volframove elektrode zbirno su prikazani u tablici 2.11. Iz rezultata pregledane literature vidljivo je kako su autori dolazili do bitno različitih zavisnosti vršnog kuta elektrode i geometrije zone taljenja što upućuje na zaključak kako kemijski sastav i odabir drugih zavarivačkih parametara također utječu na rezultate istraživanja. Ukoliko je vrh elektrode oblika krnjeg stošca, veličina njegove gornje baze također utječe na karakteristike električnog luka [15], a treba voditi računa i o smjeru brušenja prilikom pripreme elektrode. Ovi detalji često nisu navedeni u znanstvenim radovima, a možda mogu djelomično objasniti razlike između istraživanja.

Tablica 2.11 Utjecaj vršnog kuta volframove electrode na geometriju zone taljenja

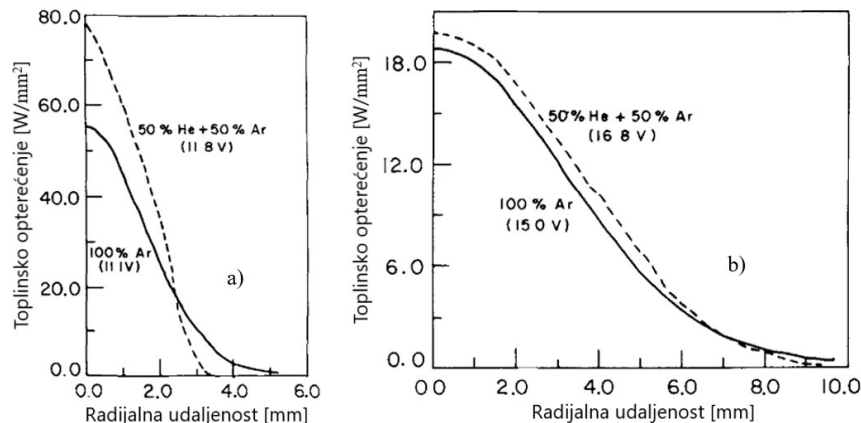
Istraživanje	TIG varijanta	Zaštitni plin	Osnovni metal	Istraženi raspon [°]	D/W omjer	Dubina penetracije [mm]	Širina zone taljenja [mm]
Burgard i Heiple [47]	TIG	Ar	304	20–30	=	-	-
	TIG	Ar	304 Se*	20–30	↑↓	-	-
	TIG	Ar	304 S*	20–30	↓	-	-
* osnovni metal dopiran sa sumporom (76 ppm), odnosno selenom (47 ppm)							
Shirali i Mills [9]	TIG	Ar	316 HS*	15–90	↑	-	-
* uzorak HS sadrži 95–130 ppm sumpora u kemijskom sastavu							
Stadler i ostali [11]	TIG	30%Ar+70%He	304L	30–60	↓	↓	=
	TIG	He	304L	30–60	↓	↓	↓
Key [46]	TIG	Ar	304	15–180	↑	↑	↓

↑ povećanje vrijednosti u promatranom intervalu; ↓ smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu;
 = nema značajne promjene vrijednosti u promatranom intervalu; - podatak nepoznat
 Moguća je i kombinacija simbola npr. ↑↓ koji znači povećanje, a zatim smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu ili ↑= koji znači povećanje, a potom nema značajnije promjene vrijednosti

2.7.6 Utjecaj zaštitnog plina na zonu taljenja

Kemijski sastav zaštitnog plina kod TIG zavarivanja ima značajan utjecaj na proces zavarivanja, odnosno geometriju zone taljenja. Fizikalna svojstva zaštitnog plina poput njegove energije ionizacije, toplinske i električne vodljivosti, gustoće i specifičnog toplinskog kapaciteta određuju karakteristike električnog luka. Također, reaktivni kemijski elementi koji se mogu nalaziti u zaštitnom plinu ulaze u kemijske reakcije s tekućim metalom mijenjajući njegovu površinsku napetost i tako utječu na konvektivni prijenos topline u talini (intenzitet i smjer Marangonijeve konvekcije). Protok zaštitnog plina također može u nešto manjoj mjeri utjecati na geometriju zone taljenja. Svakako ga je preporučljivo zadržati u preporučenim granicama jer prenizak protok ne osigurava kvalitetnu zaštitu, dok previsok uzrokuje intenzivnije hlađenje tekućeg metala i turbulentno strujanje koje opet narušava zaštitu od okolne atmosfere.

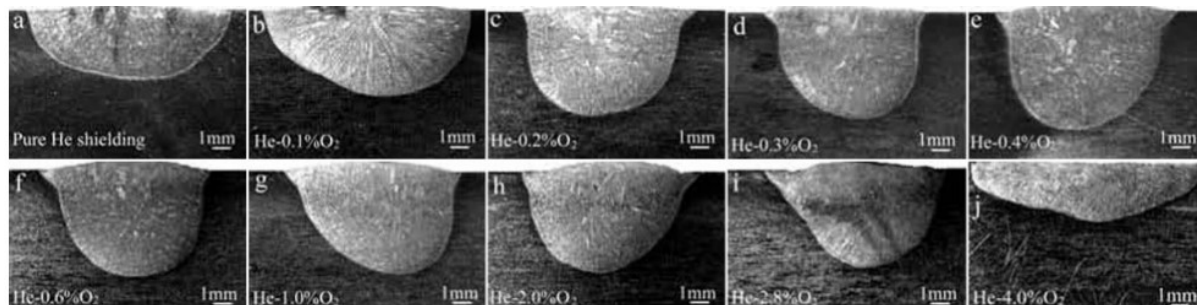
Tsai i Eagar [66] proveli su izravna mjerenja toplinskog opterećenja vodom hlađene bakrene anode za stacionarnu DCEN-TIG konfiguraciju koristeći tehnički čisti Ar i mješavinu Ar-50%He kao zaštitne plinove. Rezultati provedenih mjerenja za dvije različite duljine električnog luka (2 i 9 mm) prikazani su na slici 2.31. Ovakva mjerenja smatraju se vrlo indikativnima, ali se kod stvarnog zavarivanja pojavljuju tekuća i parna faza osnovnog metala što može značajno utjecati na karakteristike električnog luka. U ovakvom eksperimentalnom postavu to nije slučaj, tj. ne dolazi do taljenja mjerne bakrene anode pod utjecajem električnog luka. Iz rezultata je vidljivo da je utjecaj zaštitnog plina na toplinsko opterećenje ovisan o duljini električnog luka: kod dužeg luka razlika između toplinskog opterećenja za promatrane plinove nije velika; kod kraćeg luka toplinsko opterećenje pod zaštitom plinske mješavine Ar-50%He ima bitno užu distribuciju i veću maksimalnu vrijednost.



Slika 2.31 Toplinsko opterećenje vodom hlađenje bakrene anode za različite zaštitne plinove, duljina električnog luka a) 2 mm i b) 9 mm, [66]

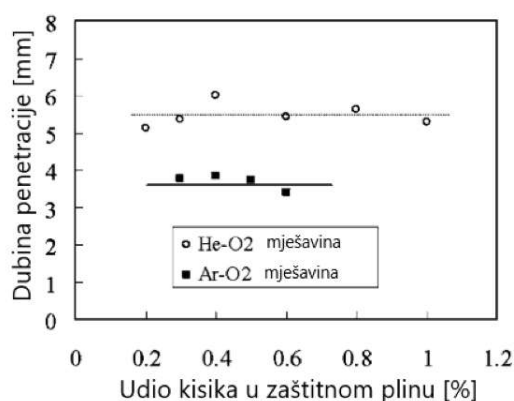
Opsežna istraživanja u cilju analize utjecaja zaštitnog plina na oblik zone taljenja i udio kisika u njezinom kemijskom sastavu za TIG zavarivanja nehrđajućeg austenitnog čelika (legura 304) proveli su Lu i ostali [67], [10], [45], [73]. Utjecaj dodatka kisika u zaštitni plin helij analiziran je u [10]. Rezultirajuće zone taljenja za jakost struje od 160 A, brzinu zavarivanja od 2 mm/s, duljinu luka od 3 mm i različite udjele kisika u heliju prikazane su na slici 2.32. Uočene promjene geometrije zone taljenja mogu se objasniti utjecajem kisika na površinsku napetost tekućeg metala. Naime, udio kisika u tekućem metalu poveća se iznad kritičnih 100 ppm za udjele kisika od 0,2–2 % u heliju, zbog čega tekući metal na višoj temperaturi (u centru taline) ima veću površinsku napetost. Tad se zbog razlike u površinskoj napetosti javlja strujanje

metala od ruba taline prema njezinom centru (Marangonijeva konvekcija) što značajno povećava dubinu penetracije te omjer dubine penetracije i širine zone taljenja. Daljnje povećanje udjela kisika u heliju ($> 2\%$) dovodi do povećanja udjela kisika u tekućem metalu iznad 400 ppm gdje tekući metal na višoj temperaturi ima manju površinsku napetost — smjer Marangonijeve konvekcije se mijenja, tekući metal sad struji od centra prema rubu taline, zbog čega se mijenja i geometrija zone taljenja.



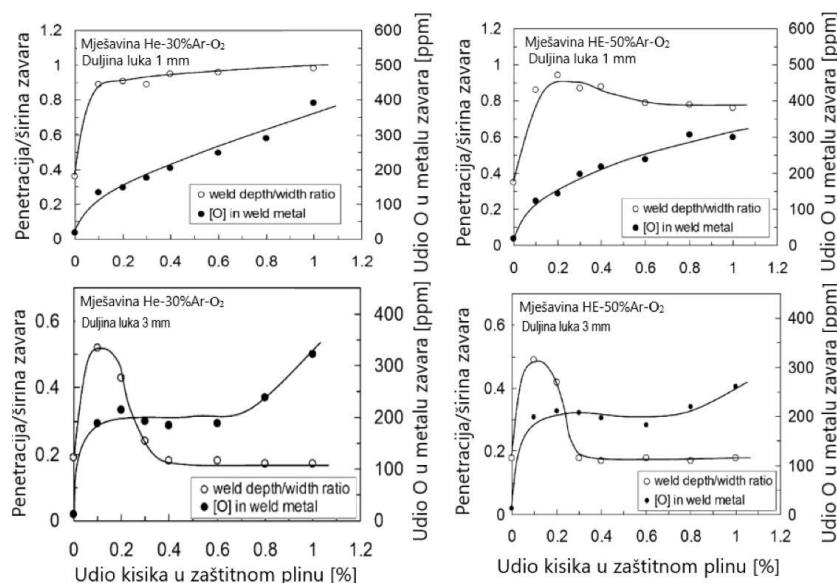
Slika 2.32 Zone taljenja u zaštitnoj atmosferi helija i njegovih mješavina s kisikom, [10]

Autori Lu i ostali [10] također su utvrdili kako zavarivanje pod zaštitom plinske mješavine He-O₂ rezultira dubljom penetracijom u odnosu na plinsku mješavinu Ar-O₂, slika 2.33.



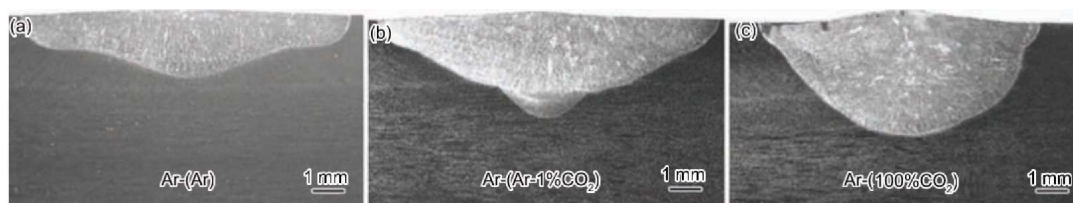
Slika 2.33 Utjecaj udjela u Ar i He na dubinu zone taljenja, [10]

Utjecaj dodatka kisika u mješavinu zaštitnog plina helija i argona na zonu taljenja kod nehrđajućeg čelika (legura 304, debljina 10 mm) analiziran je u istraživanju Lu i ostali [45]. Autori su analizirali i maksimalnu udaljenost volframove elektrode od osnovnog metala pri kojoj je moguće uspostaviti električni luk (veća udaljenost ukazuje na lakšu uspostavu električnog luka). Pokazano je kako povećanje udjela argona u plinskoj mješavini baziranoj na heliju olakšava uspostavu električnog luka zbog manje energije ionizacije argona. Utvrđeno je i snažno djelovanje udjela kisika u plinskoj mješavini argona i helija na geometriju zone taljenja, slično kao u istraživanju [10], slika 2.34. Vidljivo je kako i relativno mala količina kisika u zaštitnom plinu dovodi do promjene odnosa između dubine i širine zone taljenja. Razlog je intenzivno površinsko strujanje tekućeg metala (Marangonijeva konvekcija) prema centru taline uzrokovano promjenom odnosa površinske napetosti i temperature za koncentracije kisika u tekućem metalu iznad 100 ppm.



Slika 2.34 Utjecaj udjela kisika i duljine električnog luka na geometriju zone taljenja za plinske mješavine He-30%Ar-O₂ i He-50%Ar-O₂, [45]

Inačica TIG procesa koja koristi dva zasebna zaštitna plina (unutrašnji i vanjski) korištena je u istraživanju Lu i ostali [73]. Kod ove inačice TIG-a kao unutrašnji zaštitni plin koristi se argon koji struji neposredno uz volframovu elektrodu štiteći je od oksidacije. Kao vanjski zaštitni plin, koji struji koaksijalno oko unutarnjeg (Ar), koristi se mješavinu Ar-CO₂ ili čisti CO₂. Autori su istražili utjecaj zaštitnih plinova na zonu taljenja i udio kisika u metalu zavara kod austenitnog nehrđajućeg čelika 304. Utvrđeno je kako se trošenje i oksidacija volframove elektrode te oksidacija osnovnog metala mogu spriječiti pravilnim podešavanjem protoka unutarnjeg zaštitnog plina (čisti argon). Korištenjem plinske mješavine Ar-CO₂ ili čistog CO₂ kao vanjskog zaštitnog plina moguće je značajnije povećati produktivnost TIG procesa zbog povoljnije geometrije zone taljenja (veći D/W omjer), slika 2.35.



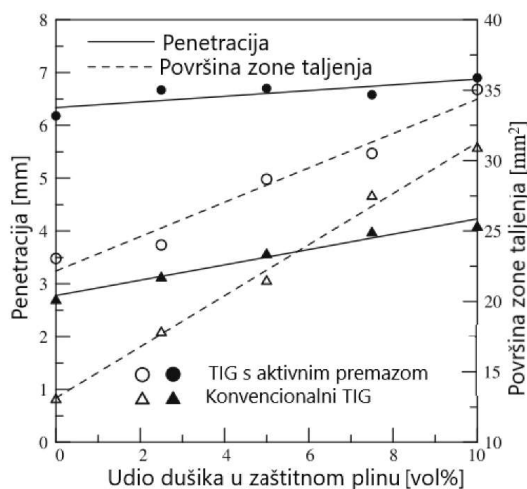
Slika 2.35 Utjecaj kemijskog sastava vanjskog zaštitnog plina na zonu taljenja, [73]

Mehanizam navedene pojave opet je povezan s udjelom kisika u tekućem metalu koji utječe na njegovu površinsku napetost i smjer Marangonijeve konvekcije na površini taline. Granična koncentracija kisika u tekućem metalu iznad koje se smjer strujanja na površini taline mijenja iz radijalnog prema rubu taline u radijalni prema centru taline iznosi 70 ppm. Izvor kisika koji reagira s tekućim metalom je disocijacija molekule CO₂ pri visokim temperaturama u električnom luku. Iako prisutnost kisika može imati poželjan učinak na geometriju zone taljenja, svakako je važno da njegova koncentracija bude relativno niska kako ne bi došlo do značajnije oksidacije metala ili stvaranja oksidnog sloja na talini.

Durgutlu [44] je u svom istraživanju utvrdio utjecaj udjela vodika u zaštitnom plinu na bazi argona na zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika 316L. Uspoređena je razlika u mikrostrukтури, penetraciji i mehaničkim svojstvima zavarenog spoja za tri različita zaštitna

plina: tehnički čisti argon, mješavinu argona s 1,5 % vodika, i mješavinu argona s 5 % vodika. Autor je utvrdio kako povećanje udjela vodika rezultira povećanjem širine zavora i dubine penetracije. Točni razlozi ove pojave nisu detaljnije pojašnjeni ali vjerojatan uzrok je povećanje toplinske vodljivosti ili specifične topline zaštitnog plina zbog dodatka vodika [21], [43]. Rezultati ovog istraživanja donekle su kontradiktorni u odnosu na istraživanje Rodrigues i Loureiro [63] provedeno na leguri 316 koja ima veći udjel ugljika u kemijskom sastavu. Naime, utvrđena je veća dubina penetracije prilikom korištenja čistog argona u odnosu na mješavinu argona i 5 % helija. Ipak, ostali zavarivački parametri u ova dva istraživanja nisu identični tako da istraživanja nisu u potpunosti usporediva.

Utjecaj zaštitnog plina na TIG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika (SUS 304) proučavao je i autor Huang [74]. Odabran je zaštitni plin na bazi argona, a promatran je utjecaj udjela dušika (2,5 %, 5 %, 7,5 %, i 10 %) na oblik i dimenzije zone taljenja, veličinu kutne deformacije, udio ferita u mikrostrukturi, mehanička svojstva (tvrdoća i čvrstoća) i pojavu pukotina. Rezultati (dubina penetracije i površina presjeka zone taljenja) za konvencionalni TIG proces uspoređeni su s njegovom inačicom koja koristi aktivne premaze na osnovnom metalu za poboljšano taljenje, slika 2.36. Vidljivo je kako povećanje udjela dušika u zaštitnom plinu rezultira povećanjem zone taljenja i penetracije (veći unos topline). Slične rezultate za legure 304 i 310 dobili su Tseng i Chou [75] u svom istraživanju. Razlog povećanja unosa topline u osnovni metal prilikom povećanja udjela dušika u argonu može se pripisati povećanju specifične topline zaštitnog plina i posljedičnom sužavanju električnog luka, [43]. Također, dušik ima alfa-geno djelovanje i njegova količina u metalu zavora utječe na količinu feritne faze i dinamiku kristalizacije te na taj način može neizravno utjecati na oblik zone taljenja, [76].



Slika 2.36 Utjecaj udjela dušika u zaštitnom plinu argonu na zonu taljenja, [74].

Hsieh i ostali [37] istražili su utjecaj dodavanja manje količine vodika i kisika u zaštitni plin argon. Istraživanje je provedeno na leguri austenitnog nehrđajućeg čelika 304. Slično kao i autor Durgutlu [44], utvrđeno je kako se dodavanjem 5 % vodika u argon povećava omjer dubine penetracije i širine zone taljenja (za standardan udio sumpora u austenitnom nehrđajućem čeliku od 0,003 wt%). Također, autori su pokazali kako manji dodatak kisika u argon (1 %) ima još snažniji utjecaj na povećanje omjera dubine penetracije i širine zone taljenja ali potiče oksidaciju volframove elektrode i može joj smanjiti vijek trajanja. U slučaju dodavanja vodika u argon, navedena opažanja obrazložena su velikom toplinskom vodljivošću vodika koja kao posljedicu ima poboljšanje prijenosa topline u osnovni metal. Ovo je u skladu s objašnjenjem autora Tanaka i Lowke [21]. Prisutnost kisika u zaštitnom plinu može utjecati na površinsku

napetost taline, a potom i na konvektivno strujanje tekućeg metala i tako promijeniti geometriju zone taljenja, [21].

Zbirni rezultati znanstvenih istraživanja o utjecaju kemijskog sastava zaštinog plina na geometriju zone taljenja prikazani su u tablici 2.12. Eksperimentalni uvjeti u različitim istraživanjima nisu u potpunosti jednaki što je utjecalo na razlike u uočenim odnosima između kemijskog sastava zaštinog plina i geometrije zone taljenja. Iz pregleda literature svakako je vidljivo da relativno mali dodatak pojedinih plinova (O₂, H₂, N₂, CO₂, SO₂) u zaštinu plin na bazi argona, helija ili njihove mješavine može bitno utjecati na geometriju zone taljenja. Ovaj utjecaj obično se reflektira na povećanje dubine penetracije i površine poprečnog presjeka zone taljenja što ima povoljan utjecaj na povećanje produktivnosti TIG procesa. Međutim, količina plinova koji se dodaju u zaštinu plin mora se pažljivo kontrolirati kako ne bi došlo do negativnih utjecaja na zavareni spoj, poput prekomjerne oksidacije.

Tablica 2.12 Utjecaj zaštinog plina kod TIG zavarivanj na geometriju zone taljenja

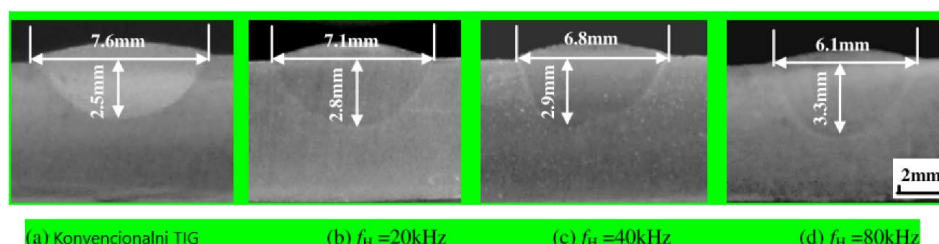
Istraživanje	TIG varijanta	Osnovni metal	Zaštin plin baza+(dodatak)	Udio dodatka [vol. %]	D/W omjer	Dubina penetracije [mm]	Širina zone taljenja [mm]
Burgard i Heiple [47]	TIG	304	Ar+(He)	0–100	↓	-	-
	TIG	304 Se	Ar+(He)	0–100	↑	-	-
	TIG	304 S	Ar+(He)	0–100	↑	-	-
<i>* osnovni metal dopiran sa sumporom (76 ppm), odnosno selenom (47 ppm)</i>							
Durgutlu [44]	TIG	316L	Ar+(H ₂)	1,5–5	-	↑	↑
Hsieh i ostali [37]	TIG	304	Ar+(H ₂)	0 i 5	↑	-	-
	TIG	304	Ar+(O ₂)	0 i 1	↑	-	-
Huang [74]	TIG	304	Ar+(N ₂)	2,5–10	↑	↑	↑
	A-TIG	304	Ar+(N ₂)	2,5–10	↑	↑	↑
Lu i ostali [10]	TIG	304	He+(O ₂)	0–4	↑↓	-	-
	TIG	304	He+(O ₂)	0 i 0,4	↑	↑	↓
Lu i ostali [45]	TIG	304	He+30%Ar+(O ₂)	0–1	↑= *	-	-
	TIG	304	He+50%Ar+(O ₂)	0–1	↑↓= **	-	-
	TIG	304	He+30%Ar+(O ₂)	0–1	↑↓ *	-	-
	TIG	304	He+30%Ar+(O ₂)	0–1	↑↓= **	-	-
<i>*duljina luka 1 mm **duljina luka 3 mm</i>							
Lu i ostali [67]	TIG	304	Ar+(O ₂)	0,1 i 0,3	↑	↑	-
	TIG	316	Ar+(H ₂)	0 i 5	↓	↓	↑
Rodrigues i Loureiro [63]	TIG	316	Ar+(He)	0 i 50	↓	↓	-
	A-TIG	316	Ar+(H ₂)	0 i 5	↑	↑	↓
Stadler i ostali [11]	A-TIG	316	Ar+(He)	0 i 50	↑	↑	↓
	TIG	304L	He+(Ar)	0 i 30	↑	↑	↑
Shirali i Mills [9]	TIG	316 HS*	Ar+(O ₂)	0 i 1	↓	↓	-
	TIG	316 HS*	Ar+(SO ₂)	0 i 1	↓	↓	-
<i>* uzorak HS sadrži 95–130 ppm sumpora u kemijskom sastavu</i>							
Tathgir i ostali [77]	A-TIG	304	Ar+(H ₂)	0 i 5	↑	↑	-
	A-TIG	316	Ar+(H ₂)	0 i 5	↑	↑	-

↑ povećanje vrijednosti u promatranom intervalu; ↓ smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu;
 = nema značajne promjene vrijednosti u promatranom intervalu; - podatak nepoznat
 Moguća je i kombinacija simbola npr. ↑↓ koji znači povećanje, a zatim smanjenje vrijednosti u promatranom intervalu ili ↑= koji znači povećanje, a potom nema značajnije promjene vrijednosti

2.7.7 Impulsno TIG zavarivanje

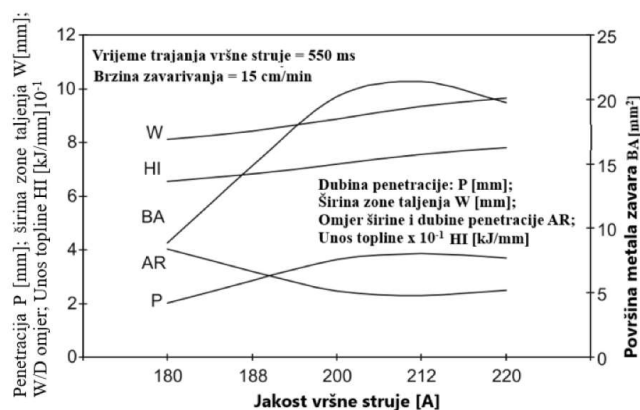
Impulsno TIG zavarivanje (P-TIG) često se primjenjuje za zavarivanje nehrđajućih čelika budući da pruža dobru kontrolu nad tekućim metalom, smanjuje unos topline u osnovni metal i poboljšava mikrostrukturne karakteristike zavarenog spoja, [39], [48]. Ova varijanta TIG zavarivanja ima nekoliko specifičnih zavarivačkih parametara koje konvencionalni TIG proces nema. To su vrijednosti bazne i vršne struje te vremenski omjer njihovog trajanja, frekvencija impulsne struje, a pojedini izvori struje za zavarivanje pružaju mogućnost odabira tipa valnog oblika (pravokutni, trapezoidni, sinusni) impulsne struje.

Utjecaj impulsnog TIG zavarivanja visoke frekvencije (visokofrekventni TIG) na zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika istražili su Qi i ostali [78]. Autori su usporedili zone taljenja formirane koristeći konvencionalni TIG proces i visokofrekventni TIG proces s frekvencijom impulsne struje od 20 kHz, 40 kHz, 60 kHz i 80 kHz, slika 2.37. Odabrana brzina zavarivanja i protok zaštitnog plina (argon) za oba procesa bili su 120 mm/min, odnosno 12 l/min. Konvencionalni TIG koristio je jakost struje od 100 A dok su vrijednosti bazne i vršne jakosti struje za impulsni TIG odabrane tako da izračunata efektivna vrijednost impulsne jakosti struje također bude 100 A. Visokofrekventni TIG proces rezultirao je suženjem električnog luka, a ovaj efekt postajao je sve izraženiji s porastom frekvencije impulsne struje. Suženje električnog luka ima nekoliko učinaka koji povećavaju dubinu penetracije: povećava specifičnu snagu luka, povećava tlak u luku (veća depresija tekućeg metala) te povećava elektromagnetsku silu u talini zbog veće gustoće električnog toka. Autori su uz eksperimentalno istraživanje razvili i numerički model procesa u kojem se efekt suženja električnog luka s porastom visokofrekventne struje reflektirao na smanjenje efektivnog radijusa koji definira toplinsko opterećenje na osnovnom metalu.



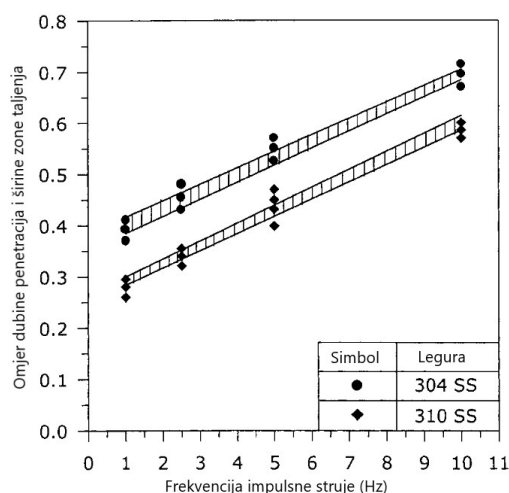
Slika 2.37 Zone taljenja za (a) konvencionalni TIG proces i b)–d) visokofrekventni impulsni TIG proces s različitim frekvencijama impulsne struje f_H , [78]

Autori Giridharan i Murugan [71] proveli su istraživanje u cilju optimizacije parametara impulsnog TIG zavarivanja kako bi ostvarili željenu geometriju zone taljenja uz potpunu penetraciju osnovnog metala od austenitnog nehrđajućeg čelika debljine 3 mm. U prvom koraku istraživanja, na temelju plana pokusa, izrađen je model procesa kojim se povezao utjecaj ulaznih zavarivačkih parametara (vrijeme trajanja i jakost vršne struje, brzina zavarivanja) s željenim odzivnim parametrima (dubina penetracije, širina i površina poprečnog presjeka zone taljenja, omjer širine i dubine penetracije, i unos topline). Utjecaj jakosti vršne struje na izlazne parametre prikazan je na slici 2.38. U drugom koraku istraživanja, optimizacija geometrije zone taljenja je uspješno provedena na temelju dobivenog modela.



Slika 2.38 Utjecaj jakosti vršne struje kod impulsnog TIG zavarivanja na geometriju zone taljenja i toplinski unos, [71]

Utjecaj impulsnog TIG zavarivanja na austenitni nehrđajući čelik (legure 304 i 310) istražili su Tseng i Chou [79]. Iako je središnji problem istraživanja bio odrediti utjecaj zavarivačkih parametara na kutnu deformaciju uzoraka, promatran je i njihov utjecaj na zonu taljenja. Utvrđeno je kako povećanje frekvencije impulsne struje povećava gustoću toplinskog toka na osnovnom metalu (električni luk se sužava) i tako povećava D/W omjer zone taljenja, slika 2.39. Povećanje frekvencije impulsne struje te povećanje omjera intenziteta i omjera vremenskog trajanja bazne i vršne struje smanjuje kutnu deformaciju nastalu zavarivanjem.



Slika 2.39 Utjecaj frekvencije impulsne struje na zonu taljenja, [79]

Orbitalno impulsno TIG zavarivanje, često korišteno za zavarivanje cijevi od nehrđajućeg čelika, bilo je predmetom istraživanja Lothongkuma i ostalih [76]. Autori su istražili kako parametri orbitalnog impulsnog zavarivanja utječu na geometriju zone taljenja i količinu ferita u metalu zavara za različite pozicije zavarivanja (6, 8, 9, 10 i 12 sati) na leguri 316L debljine 3mm. Dio zavarivačkih parametara — bazna struja (61 A), frekvencija impulsne struje (5 Hz), i vremenski udio impulsne struje u jednoj periodi (65 %) — zadržan je na konstantnoj vrijednosti, a brzina zavarivanja (od 2 mm/s do 6 mm/s), udio dušika u argonu (od 0 % do 4 %) i vrijednost vršne struje (od 138 A do 252 A) podešavani su tako da geometrija zone taljenja udovolji standardu DIN 8563 class BS. Utvrđeno je kako povećanje brzine zavarivanja zahtijeva povećanje vršne jakosti struje, dok je povećanje udjela dušika u argonu zahtijevalo manju vršnu struju za postizanje željenog oblika zone taljenja. Uočena je i potreba za

podešavanjem jakosti vršne struje s promjenom pozicije zavarivanja kako bi zavareni spoj zadržao potrebnu geometriju. Lothongkuma i ostali proveli su slično istraživanje za impulsno TIG zavarivanje u položenoj, vertikalnoj i nadglavnoj poziciji na leguri 304L debljine 3 mm. Pokazano je da se zadržavanjem jednog dijela zavarivačkih parametara na konstantnoj vrijednosti uz istovremenu kompezaciju drugim parametrima (jakost bazne i vršne struje) može postići geometrija zavrenog spoja zahtijevana stanardom DIN 8563.

U tablici 2.13 zbirno su prikazani rezultati nekolicine istraživanja u kojima je analiziran utjecaj parametara karakterističnih za P-TIG proces na geometrijske karakteristike zone taljenja kod austenitnih nehrđajućih čelika.

Tablica 2.13 Utjecaj zavarivačkih parametara P-TIG procesa na geometriju zone taljenja

Istraživanje	Osnovni metal	P-TIG parametar	Istraženi raspon	D/W omjer	Dubina penetracije [mm]	Širina zone taljenja [mm]
Qi i ostali [78]	0Cr18Ni9Ti	f_P	0–90 kHz	↑	↑	↓
Giridharan i Murugan [71]	304L	I_P	180–220 A	↓=	↑=	↑
Tseng i Chou [79]	304	t_P	45–65 % t_P	↓=	↑=	↑=
	310	f_P	1–10 Hz	↑	-	-
	304	f_P	1–10 Hz	↑	-	-
Leitner i ostali [38]	304	t_P	25–75 % t_P	↑	↑	-
	304	f_P	1–5 Hz	↓	↓	-
	304	I_B	20–80 % I_P	↑	↑	-
Abu-Aesh i ostali [12]	304L	t_P	15–90 % t_P	↑	↑	↓
	304L	I_P	90–260 A	↓	↓	↑
	304L	f_P	0,2–50 Hz	↓	↓	↓

f_P – frekvencija impulsne struje; I_P – jakost vršne struje; t_P – vrijeme trajanja vršne struje; I_B – jakost bazne struje;

2.8 Područje istraživanja doktorskog rada

Kroz detaljan pregled literature u kojoj je analiziran utjecaj TIG zavarivanja na oblik i dimenzije zone taljenja kod austenitnih nehrđajućih čelika uočeno je nekoliko nedostataka:

- većina analiza u postojećim istraživanjima odnosi se na djelovanje električnog luka koji se giba brzinom zavarivanja, dok je stacionarna zavarivačka konfiguracija zastupljena samo u radu Stadler i ostali [11],
- ne postoje podaci o utjecaju vrste i protoka plina s korijenske strane zavara na oblik i dimenzije zone taljenja kod austenitnih nehrđajućih čelika,
- ne postoje podaci o utjecaju stanja površine austenitnih nehrđajućih čelika na oblik i dimenzije zone taljenja,
- ne postoji dovoljno podataka o utjecaju duljine električnog luka i vršnog kuta volframove elektrode na zonu taljenja za stacionarno TIG zavarivanje nehrđajućeg čelika 316L,
- ne postoje podaci o utjecaju impulsne struje (P-TIG) na dimenzije zone taljenja kod stacionarnog zavarivanja.

Istraživanje u ovoj doktorskoj disertaciji organizirano je tako da nadopuni gore navedene nedostatke postojeće literature. Za istraživanje je odabrana stacionarna TIG konfiguracija, a kao osnovni metal korišten je austenitni nehrđajući čelik 316L. Dio doktorske disertacije posvećen je utvrđivanju utjecaja stanja površine osnovnog metala te vrste i protoka plina na korijenskoj strani zavara na dimenzije zone taljenja kod stacionarnog TIG zavarivanja.

3. OPIS METODOLOGIJE ISTRAŽIVANJA

U svrhu provođenja istraživanja u sklopu ovog doktorskog rada osmišljen je, a potom i izrađen ispitni sustav koji omogućuje kontrolirano djelovanje autogenog stacionarnog TIG procesa na uzorke. U nastavku ovog poglavlja detaljno je opisan razvijeni eksperimentalni postav te objašnjena metodologija istraživanja. U tablici 3.1 prikazan je generalni plan provedenog istraživanja u kojem su navedeni svi faktori čiji je utjecaj na zonu taljenja istražen. Detaljnije pojašnjenje metodologije za svaki od istraženih faktora izloženo je u pripadnom podpoglavlju. Nakon niza preliminarnih pokusa uočeno je da se mogu očekivati značajna odstupanja u dubini zona taljenja formiranih pod istim zavarivačkim parametrima. Zbog toga je konačna odluka bila istražiti jedan po jedan utjecajni faktor (OVAT metoda, engl. *One Variable At a Time*) ali svaki od eksperimenata ponoviti minimalno tri puta kako bi se dobio dobar uvid u ponovljivost stacionarnog TIG procesa.

Tablica 3.1 Generalni plan istraživanja

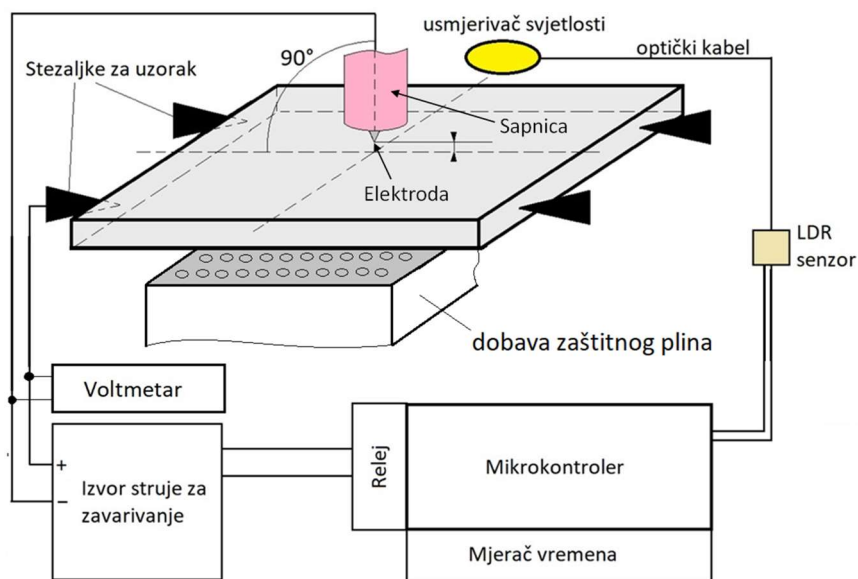
Istraženi faktor	Vrsta faktora	Vrijednost ili kategorija
Vrsta plina na korijenskoj strani uzorka	Kategorički	Argon Helij Zrak
Protok plina na korijenskoj strani uzorka	Numerički	Argon 4 l/min i 10 l/min Helij 4 l/min i 10 l/min
Stanje površine osnovnog metala	Kategorički	Površina u izvornom stanju Površina kontrolirano brušena
Duljina električnog luka	Numerički	1,5 mm 3,0 mm 6,0 mm
Vrši kut volframove elektrode	Numerički	20 ° 45 °
Vrsta struje	Kategorički	Konstantna (konvencionalni TIG) Impulsna (P-TIG)
Vrijeme zavarivanja	Numerički	7 s 14 s 21 s

3.1 Eksperimentalni postav

Eksperimentalni postav osmišljen i izrađen za potrebe ovog istraživanja prikazan je na slici 3.1, a kemijski sastav korištenih uzoraka dimenzija 100 mm x 100 mm i debljine 5 mm od nehrđajućeg austenitnog čelika 316L prikazan je u tablici 3.2.

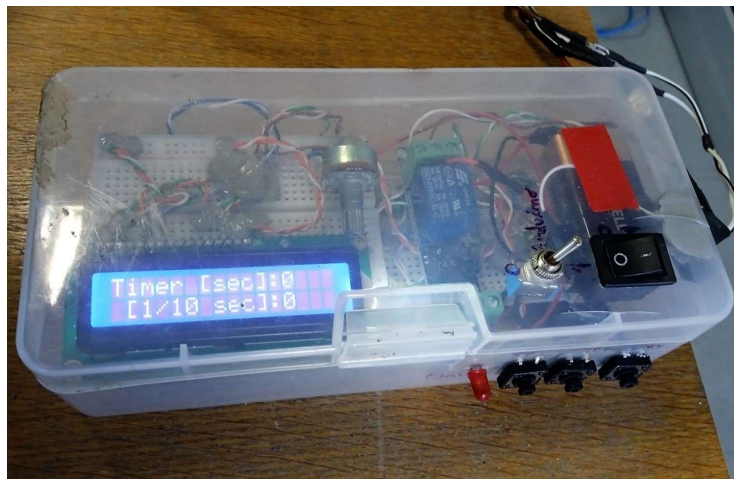
Tablica 3.2 Kemijski sastav korištenih uzoraka od nehrđajućeg čelika 316L

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
Težinski udio [%]	0.023	0.571	1.36	0.029	0.011	17.07	10.56	2.14	0.056



Slika 3.1 Eksperimentalni postav korišten u istraživanju

Uzorak pripremljen za ispitivanje postavlja se uz pomoć libele u horizontalni položaj u steznu napravu. Dodir između uzorka i stezne naprave ostvaruje se preko šiljaka koji pridržavaju uzorak na četiri mjesta. Na ovaj način minimizirana je dodirna površina između uzorka i stezne naprave što sprječava značajniji gubitak topline na mjestima kontakta. Zahvaljujući ovakvom prihvatu može se smatrati da su konvekcija i zračenje prema okolini glavni mehanizmi odvođenja topline s uzorka. Šiljci su postavljeni simetrično na rubovima uzorka što osigurava simetričan tok električne energije kroz uzorak i tako onemogućava nepoželjnu pojavu puhanja električnog luka. Odabrani vršni kut volframove elektrode oblikuje se brušenjem uz pomoć brusilice koja je predviđena upravo za ovu namjenu. Nakon pripreme volframove elektrode, ona se pozicionira u okomiti položaj iznad sredine uzorka od kojeg se udaljava za potrebnu duljinu električnog luka. Navedeno pozicioniranje omogućuje nosač pištolja za TIG zavarivanje koji ima mogućnost podešavanja prostornog položaja u tri koordinatne osi. Zbog opisane stacionarne osnosimetrične eksperimentalne konfiguracije očekivani oblik zone taljenja također je osnosimetričan. Za potrebe kontrole vremena djelovanja električnog luka na uzorak osmišljen je i konstruiran elektronički sklop baziran na Arduino mikrokontroleru koji je povezan s izvorom struje za zavarivanje INVERTER ACCUTIG AVP-300P. Najveću prepreku povezivanju mikrokontrolera i uređaja za zavarivanje predstavljao je visokofrekventni generator za uspostavu električnog luka kod TIG zavarivanja. Zbog visokih napona koje generator proizvodi jednostavno povezivanje mikrokontrolera u zavarivački strujni krug nije moguće jer visoki naponi (red veličine kV) mogu lako uništiti osjetljivu elektroničku opremu. Kao alternativno rješenje ulaznog signala u mikrokontroler odabrano je svjetlosno zračenje iz električnog luka. Tako je u blizini električnog luka postavljen usmjernik svjetlosti koji je povezan s optičkim kabelom kako bi se mikrokontroler i ostala elektronika udaljila od zavarivačkog strujnog kruga. Na kraj optičkog kabela postavljen je LDR senzor koji signalizira mikrokontroleru prisutnost svjetla (zračenja) iz električnog luka. Funkcija mikrokontrolera isprogramirana je u programskom jeziku C++ tako da omogućuje odabir željenog vremena zavarivanja (u koracima od 0,1 sec) nakon kojeg se aktivacijom optoizolirajućeg releja prekida rad izvora struje za zavarivanje, odnosno djelovanje električnog luka na uzorak, slika 3.2.



Slika 3.2 Uređaj za kontrolu vremena rada izvora struje za zavarivanje

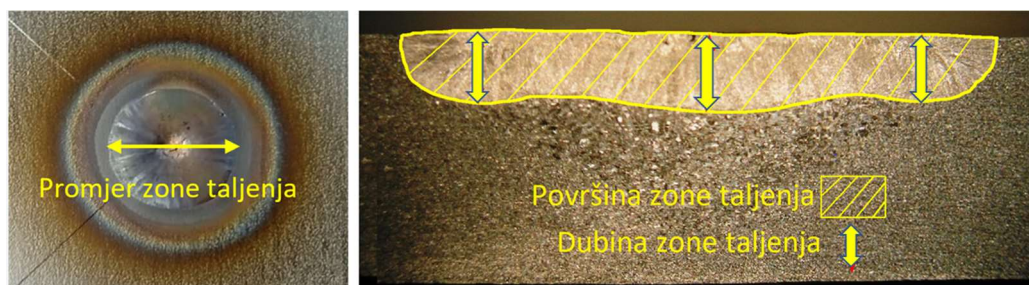
S donje strane uzorka na udaljenosti od 1 mm postavljena je pravokutna cijev dimenzija 45 mm x 45 mm koja služi za dovod zaštitnog plina na korijensku stranu zavora. U cijev je postavljena metalna spužvica i perforirani lim kako bi nastrojavanje zaštitnog plina bilo što ravnomjernije.

Prije početka istraživanja provedeni su preliminarni eksperimenti kako bi se odredio radni okvir TIG procesnih parametara unutar kojega je rezultirajuću zonu taljenja moguće okarakterizirati mjerenjima. Odnosno, rezultirajuće dimenzije zone taljenja ne smiju biti toliko male da ih nije praktično mjeriti a djelovanje luka na uzorak ne smije rezultirati prekomjernom penetracijom tj. probijanjem taline kroz korijensku stranu uzorka. Ovakvi slučajevi izlaze izvan praktičnog radnog okvira TIG procesa i neće se razmatrati.

3.2 Mjerenje dimenzija zone taljenja

Djelovanje stacionarnog električnog luka u opisanoj zavarivačkoj konfiguraciji uzrokuje lokalizirano taljenje osnovnog metala i formiranje približno osnosimetrične zone taljenja u uzorcima. Kako bi se geometrija zone taljenja okarakterizirala, provedena su mjerenja njezinih dimenzija. Mjerenjima je obuhvaćeno nekoliko karakterističnih dimenzija koje mogu kvalitetno opisati profil zone taljenja, slika 3.3. Prije svega to su širina zone taljenja i njezina dubina, odnosno penetracija. Širina ili promjer zone taljenja izmjeren je na nekoliko različitih pozicija s gornje strane uzorka, neposredno nakon svakog zavarivačkog eksperimenta. Kao konačna vrijednost širine zone taljenja izračunata je srednja vrijednost provedenih mjerenja. Mjerenje dubine penetracije zahtijevalo je precizno presijecanje svakog uzorka kroz sredinu zone taljenja te naknadno provođenje metalografske analize kako bi se odredila granica zone taljenja. Prva faza metalografske analize je ručno brušenje presječne površine brusnim papirom kroz tri faze završavajući s granulacijom #180 (FEPA standard). Zatim je uslijedilo kemijsko nagrivanje u mješavini vode, fluorovodične kiseline i klorovodične kiseline u omjeru 5:4:2 ($\text{H}_2\text{O}:\text{HF}:\text{HCl}$) u trajanju od približno 15 minuta. Ovako pripremljen uzorak postavljao se pod optički mikroskop Olympus SZ61 gdje se pod odgovarajućim osvjetljenjem fotografirala zona taljenja koristeći fotoaparat Olympus C-5060. Mjerenje dubine zone taljenja provedeno je na ovim fotografijama koristeći software otvorenoga koda *ImageJ*. Ovaj software korišten je i za mjerenje površine zone taljenja u poprečnom presjeku. Prije provođenja mjerenja software se kalibrirao pomoću poznate dimenzije na fotografiji za što je korištena debljina uzorka. Ukoliko je zona taljenja imala konkavan oblik tj. dubina zone taljenja kontinuirano se povećavala prema njezinom središtu, kao mjerilo penetracije usvojena je maksimalna vrijednost dubine. Ukoliko je profil

penetracije imao složeniji oblik s izraženim lokalnim maksimumima, oni su izmjereni a kao veličina penetracije usvojena je njihova srednja vrijednost. U relativno rijetkim slučajevima kad je presjek zone taljenja bio asimetričan, za vrijednost penetracije usvojena je maksimalno postignuta dubina zone taljenja.

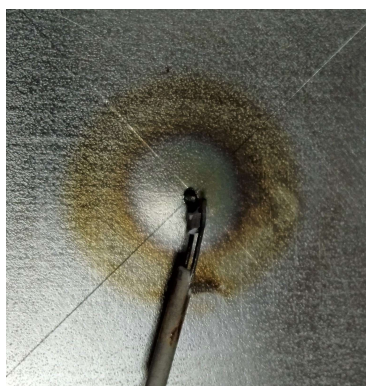


Slika 3.3 Karakteristične dimenzije zone taljenja

Nakon provedenih mjerenja izračunata je vrijednost omjera dubine i širine zone taljenja (D/W omjer). Ova vrijednost važna je zbog usporedbe s drugim istraživanjima u kojima se ona koristi kao okvirni pokazatelj oblika zone taljenja, često i bez kvantitativnih podataka o vrijednostima širine i dubine zone taljenja.

3.3 Mjerenje temperature

Kod pojedinih eksperimenata provedena su mjerenja temperaturnog ciklusa uzrokovanog djelovanjem električnog luka na uzorak. Za mjernu poziciju odabrana je sredina donje (korijenske) strane uzorka budući da se nalazi relativno blizu zone taljenja i istovremeno je zaštićena od direktnog zračenja emitiranog iz električnog luka. Mjerenja su provedena koristeći termopar tipa K sa žicama promjera 0,5 mm koje su spojene plinskim zavarivanjem formirajući spojište oblika kuglice približnog promjera jedan milimetar. Spojište termopara zavareno je za uzorak udarnim kapacitivnim procesom pražnjenjem kondenzatora uređajem izrađenim posebno za ovu namjenu, slika 3.4. Žice termopara provučene su kroz odgovarajuće keramičke vodilice kako bi se postigla toplinska i električna izolacija te poboljšala točnost provedenih mjerenja. Budući da se zavarivanje termoparova za uzorak provodilo ručno, mjerna pozicija u pravilu je malo odstupala od točnog centra uzorka. Ovo odstupanje izmjereno je nakon svakog eksperimenta kako bi provedena mjerenja bila bolje usporediva.



Slika 3.4 Termopar zavaren na donjoj strani uzorka

3.4 Utjecaj vrste plina na korijenskoj strani zavara na zonu taljenja

U ovom dijelu istraživanja utvrđeno je kako na oblik i dimenzije zone taljenja kod TIG zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika utječe vrsta plina prisutna na korijenskoj strani uzorka tijekom zavarivanja. Izmjerene dimenzije zone taljenja uključuju njezinu širinu, dubinu i površinu u poprečnom presjeku. Kao zaštitni plin na korijenskoj strani zavara uspoređeni su argon i helij, a provedeni su i kontrolni eksperimenti u kojima zaštitni plin nije korišten, odnosno korijenska strana zavara bila je izložena atmosferi (zraku). Na osnovi preliminarnih eksperimenata za odabrane zavarivačke parametre, odlučeno je kako će se istraživanje provesti za vremena zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s. Odabrana vremena djelovanja električnog luka na uzorak rezultiraju značajnijim razlikama u dimenzijama zona taljenja, a ujedno se nalaze unutar praktičnog radnog okvira stacionarnog TIG procesa. Uvođenje vremena zavarivanja kao nezavisne eksperimentalne varijable omogućilo je analizu utjecaja vrste plina na korijenskoj strani uzorka na zonu taljenja za različito vrijeme djelovanja električnog luka na osnovni metal. Eksperimenti dizajnirani na ovaj način pružili su vrijedne podatke o vremenskoj evoluciji zone taljenja. Svaki eksperiment ponovljen je minimalno tri puta što je pružilo dobar uvid u ponovljivost TIG procesa pod jednakim zavarivačkim parametrima za uzorke koji potječu iz iste šarže.

Površina svih uzoraka brušena je prema točno definiranom planu brušenja koristeći brusne papire granulacije #120, #400 i #800 i lepezastu brusnu ploču. Provedeno brušenje odstranjuje zaštitni oksidni sloj koji se nalazi na površini uzorka od nehrđajućeg čelika 316L ali utječe i na površinsku hrapavost. Svi uzorci detaljno su očišćeni denaturiranim alkoholom neposredno prije postavljanja na steznu napravu i zavarivanja kako bi se s površine uklonile nečistoće i masnoće.

U svrhu istraživanja utjecaja vrste plina na korijenskoj strani zavara na zonu taljenja za stacionarno TIG zavarivanje nehrđajućeg čelika 316L, dizajniran je odgovarajući plan eksperimenata. Naime, planirani eksperimenti raspoređeni su u tri različite eksperimentalne kategorije koje su se razlikovale obzirom na vrstu plina prisutnog na korijenskoj strani tijekom djelovanja električnog luka na uzorak (tablica 3.4). Površina svih uzoraka pripremljena je na jednak način ali je s njihove donje strane tijekom zavarivanja bio prisutan argon, helij ili zrak. Protok argona od 10 l/min i helija od 4 l/min s donje strane uzorka odabran je kroz seriju preliminarnih eksperimenata koji su definirali upravo ove vrijednosti minimalog protoka kod kojih nije dolazilo do značajnije oksidacije na korijenskoj strani zavara. Korišteni mjerač protoka umjeren je za plin argon. Minimalna potrošnja zaštitnog plina važna je zbog smanjenja troškova, a ima i pozitivan učinak na okoliš. Eksperimenti opisani u ovom dijelu istraživanja provedeni su pod jednakim TIG zavarivačkim parametrima navedenim u tablici 3.3.

Tablica 3.3 Zavarivački parametri za stacionarni TIG proces

Zavarivački parametri	Vrijednost / tip
Vrsta struje	DC elektroda negativna
Jakost struje	150 A
Napon	14,1 V
Volframova elektroda	Ø 2,4 mm, legirana s ThO ₂ , 45 ° vršni kut
Pretičak elektrode	3 mm
Kut između elektrode i osnovnog metala	90 °
Duljina električnog luka	3 mm
Vrsta, protok i vrijeme naknadnog protoka zaštitnog plina	Argon 14,8; 8 l/min; 23 s
Promjer sapnice za zaštitni plin	11,1 mm

Tablica 3.4 Plan eksperimenata za analizu utjecaja vrste zaštitnog plina na korijenskoj strani zavora na zonu taljenja

Eksperimentalna kategorija	Vrijeme zavarivanja	Vrsta i protok plina na korijenskoj strani zavora
Ar10_7s	7 s	Argon 10 l/min
He4_7s	7 s	Helij 4 l/min
Ar10_14s	14 s	Argon 10 l/min
He4_14s	14 s	Helij 4 l/min
Ar10_21s	21 s	Argon 10 l/min
He4_21s	21 s	Helij 4 l/min

3.5 Utjecaj protoka argona i helija s korijenske strane zavora na zonu taljenja

U ovom djelu istraživanja provedeni su eksperimenti s različitim protocima argona i helija na korijenskoj strani zavora. Cilj je bio odrediti utjecaj promjene protoka helija i argona na karakteristične dimenzije rezultirajuće zone taljenja: njezinu širinu, dubinu, D/W omjer i površinu u poprečnom presjeku. Analizirani protoci za oba zaštitna plina bili su 4 l/min i 10 l/min. Ove vrijednosti protoka odabrane su na temelju preliminarnih proba koje su pokazale kako minimalni protok od 4 l/min za helij i 10 l/min za argon sprječavaju oksidaciju korijenske strane zavora. Sukladno eksperimentalnom planu, uzorci su grupirani u različite kategorije obzirom na tip zaštitnog plina (Ar ili He) i njegov protok na korijenskoj strani zavora (4 ili 10 l/min), tablica 3.5.

Svi eksperimenti provedeni su pod jednakim zavarivačkim parametrima stacionarnog TIG zavarivanja (tablica 3.3) i to za tri različita vremena zavarivanja (7 s, 14 s i 21 s). Površina svih uzoraka je neposredno prije zavarivanja pripremljena na identičan način, sukladno definiranom planu brušenja. Uzorci su potom odmašćeni denaturiranim alkoholom. Svaki od eksperimenata iz različite kategorije ponovljen je minimalno tri puta čime je dobiven uvid u ponovljivost TIG procesa, a mjerenim dimenzijama zone taljenja izračunata je srednja vrijednost.

Tablica 3.5 Plan eksperimenata za analizu utjecaja protoka zaštitnog plina na korijenskoj strani zavora na zonu taljenja

Eksperimentalna kategorija	Vrijeme zavarivanja	Vrsta i protok plina na korijenskoj strani zavora
Ar4_7s	7 s	Argon 4 l/min
Ar10_7s	7 s	Argon 10 l/min
Ar4_14s	14 s	Argon 4 l/min
Ar10_14s	14 s	Argon 10 l/min
Ar4_21s	21 s	Argon 4 l/min
Ar10_21s	21 s	Argon 10 l/min
He4_7s	7 s	Helij 4 l/min
He10_7s	7 s	Helij 10 l/min
He4_14s	14 s	Helij 4 l/min
He10_14s	14 s	Helij 10 l/min
He4_21s	21 s	Helij 4 l/min
He10_21s	21 s	Helij 10 l/min

3.6 Utjecaj stanja površine osnovnog metala na zonu taljenja

Koristeći razvijeni eksperimentalni postav istražen je utjecaj stanja površine osnovnog metala na oblik i dimenzije zone taljenja kod stacionarnog TIG zavarivanja austenitnog nehrđajućeg čelika 316L. Kako bi se navedeni efekt analizirao površina jednog dijela eksperimentalnih uzoraka zadržana je u izvornom stanju, onako kako je i isporučena, a površina ostalih uzoraka brušena je prema točno definiranom planu brušenja. Brušenje donje strane uzorka provedeno je koristeći lepezastu brusnu ploču postavljenu na električnu brusilicu, a zatim je uslijedio postupak ručnog brušenja identičan kao na gornjoj strani uzorka. Korijenska strana svih uzoraka bila je izložena atmosferi, odnosno zaštitni plin na donjoj strani uzoraka nije korišten. U svrhu boljeg uvida u ponovljivost stacionarnog TIG zavarivanja, svaki eksperiment ponavljen je tri puta te je izračunata srednja vrijednost izmjerenih dimenzija zone taljenja. Istraživanje je provedeno na temelju dizajna eksperimenata koji planirane eksperimente razdjeljuje u tri različite kategorije obzirom na tretman površine koji je proveden na uzorcima, tablica 3.6. Uzorcima iz kategorije ZRAK-NBG-NBD površina je ostavljena u izvornom stanju, uzorcima iz kategorije ZRAK-BG-NBD brušena je samo gornja površina, a uzorcima iz kategorije ZRAK-BG-BD brušene su gornja i donja površina.

Tablica 3.6 Plan eksperimenata za analizu utjecaja stanja površine osnovnog metala na zonu taljenja

Eksperimentalna kategorija	Brušenje gornje strane uzorka	Brušenje donje strane uzorka	Vrsta plina na donjoj strani uzorka
ZRAK-NBG-NBD	NE, izvorno stanje	NE, izvorno stanje	Zrak
ZRAK-BG-NBD	DA	NE, izvorno stanje	Zrak
ZRAK-BG-BD	DA	DA	Zrak

Svi navedeni eksperimenti provedeni su pod djelovanjem jednakih TIG zavarivačkih parametara (tablica 3.3) za vrijeme zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s. Ovakav plan je uz ponavljanje svakog eksperimenta tri puta rezultirao s ukupno 27 provedenih eksperimenata. Promjena vremena zavarivanja omogućila je analizu vremenske evolucije zone taljenja i utvrđivanje utjecaja stanja površine osnovnog metala na zonu taljenja obzirom na vrijeme djelovanja električnog luka.

3.7 Utjecaj duljine električnog luka na zonu taljenja

U svrhu analize utjecaja promjene duljine luka na karakteristične dimenzije zone taljenja kod stacionarnog TIG zavarivanja nehrđajućeg čelika 316L odabrane su duljine luka od 1,5 mm, 3 mm i 6 mm. Željena duljina električnog luka podešena je koristeći mjerne pločice (etalone) koje su se postavljale između uzorka i volframove elektrode podesive prostorne pozicije. Ostali zavarivački parametri nisu se mijenjali i navedeni su u tablici 3.3. Istraživanje je provedeno za tri različita vremena zavarivanja (7 s, 14 s i 21 s) čime je dobiven i uvid u vremensku evoluciju zone taljenja za tri analizirane duljine električnog luka. Svaki od eksperimenata ponavljen je minimalno tri puta kako bi se odredila ponovljivost TIG procesa i omogućio izračun srednje vrijednosti dimenzija zone taljenja.

Površina svih uzoraka je neposredno prije zavarivanja brušena prema utvrđenom planu brušenja. Tako su korištenjem brusnih papira (#120, #400 i #800) i lepezaste brusne ploče odstranjene moguće nehomogenosti oksidnog sloja na površini uzorka čelika 316L. Svi uzorci su prije eksperimenta odmašćeni denaturiranim alkoholom. Nakon zavarivanja, sukladno

metodologiji opisanoj u poglavlju 3.2, mjerenjima su utvrđene vrijednosti širine, dubine i površine zone taljenja u poprečnom presjeku. Plan eksperimenata za analizu utjecaja duljine električnog luka na dimenzije zone taljenja naveden je u tablici 3.7.

Tablica 3.7 Plan eksperimenata za analizu utjecaja duljine električnog luka na zonu taljenja

Eksperimentalna kategorija	Vrijeme zavarivanja	Duljina električnog luka
EL_1.5_7s	7 s	1,5 mm
EL_3.0_7s	7 s	3,0 mm
EL_6.0_7s	7 s	6,0 mm
EL_1.5_14s	14 s	1,5 mm
EL_3.0_14s	14 s	3,0 mm
EL_6.0_14s	14 s	6,0 mm
EL_1.5_21s	21 s	1,5 mm
EL_3.0_21s	21 s	3,0 mm
EL_6.0_21s	21 s	6,0 mm

3.8 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na zonu taljenja

Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na karakteristične dimenzije zone taljenja kod stacionarnog TIG zavarivanja nehrđajućeg čelika 316L analiziran je za kuteve od 20 ° i 45 °. Željeni vršni kut postignut je korištenjem alata specijaliziranog za brušenje volframove elektrode. Geometrija vrha elektrode je neposredno prije svakog eksperimenta vizualno pregledana i pripremljena alatom za brušenje. Korištena volframova elektroda imala je promjer 2,4 mm i legirana je torijevim oksidom (ThO₂). Ostali zavarivački parametri navedeni su u tablici 3.3 i nisu se mijenjali. Utjecaj vršnog kuta na dimenzije zone taljenja analiziran je za tri različita vremena stacionarnog TIG zavarivanja koja su iznosila 7 s, 14 s i 21 s. Mijenjajući vrijeme djelovanja električnog luka na osnovni metal dobiven je uvid u vremensku evoluciju zone taljenja. Plan eksperimenata naveden je u tablici 3.8 a obuhvaća eksperimentalne kategorije koje se razlikuju obzirom na vršni kut volframove elektrode i vrijeme zavarivanja. Zaštitni plin na korijenskoj strani uzoraka nije korišten, a uzorcima su prije zavarivanja gornja i donja površina pripremljene prema planu brušenja i odmašćene. Svaki od eksperimenta ponovljen je minimalno tri puta zbog određivanja srednje vrijednosti i ponovljivosti TIG procesa obzirom na rezultirajuće dimenzije zone taljenja.

Mjerenja dimenzija zone taljenja obavljena su sukladno opisanoj metodologiji koja uključuje presjecanje uzorka kroz sredinu zone taljenja, razvijanje makrostrukture i mjerenja u programskom paketu ImageJ.

Tablica 3.8 Plan eksperimenata za analizu utjecaja vršnog kuta volframove elektrode na zonu taljenja

Eksperimentalna kategorija	Vrijeme zavarivanja	Vršni kut volframove elektrode
W-KUT_20_7s	7 s	20 °
W-KUT_45_7s	7 s	45 °
W-KUT_20_14s	14 s	20 °
W-KUT_45_14s	14 s	45 °
W-KUT_20_21s	21 s	20 °
W-KUT_45_21s	21 s	45 °

3.9 Utjecaj impusnog TIG (P-TIG) zavarivanja na zonu taljenja

Ovaj dio istraživanja usmjeren je na analizu utjecaja stacionarnog P-TIG zavarivanja na zonu taljenja kod austenitnog nehrđajućeg čelika 316L. Uspoređene su dimenzije zona taljenja formiranih P-TIG procesom i konvencionalnim TIG procesom. Parametri impulsne struje kod P-TIG procesa odabrani su tako da prosječna jakost impulsne struje bude jednaka jakosti struje na kojoj su provedeni eksperimenti za konvencionalno TIG zavarivanje. Korišteni izvor struje za zavarivanje INVERTER ACCUTIG AVP-300P ima mogućnost impulsnog zavarivanja i odabir osnovnih parametara impulsne struje koji su navedeni zajedno s ostalim zavarivačkim parametrima u tablici 3.9. Eksperimenti su provedeni prema planu u tablici 3.10 za vrijeme stacionarnog P-TIG zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s što je omogućilo i analizu vremenske evolucije zone taljenja za impulsno zavarivanje. Svaki od eksperimenata ponovljen je tri puta zbog izračuna srednje vrijednosti i određivanja ponovljivosti procesa.

Zaštitni plin na korijenskoj strani uzoraka nije korišten, a gornja i donja površina svakog uzorka je neposredno prije eksperimenata pripremljena prema planu brušenja i potom odmašćena denaturiranim alkoholom. Razvoj makrostrukture i mjerenja dimenzija zone taljenja provedeni su sukladno metodologiji opisanoj u drugom podpoglavlju.

Tablica 3.9 Zavarivački parametri za stacionarni P-TIG proces

Zavarivački parametri	Vrijednost / tip
Vrsta struje	DC impulsna, elektroda negativna
Jakost bazne struje	100 A
Jakost impulsne struje	200 A
Vremenski omjer trajanja bazne i impulsne struje	0,5
Frekvencija impulsne struje	10 Hz
Prosječan napon	14,1 V
Volframova elektroda	Ø 2,4 mm, legirana s ThO ₂ , 45 ° vršni kut
Pretičak elektrode	3 mm
Kut između elektrode i osnovnog metala	90 °
Duljina električnog luka	3 mm
Vrsta, protok i vrijeme naknadnog protoka zaštitnog plina	Argon 14,8; 8 l/min; 23 s
Promjer sapnice za zaštitni plin	11,1 mm

Tablica 3.10 Plan eksperimenata za analizu utjecaja P-TIG zavarivanja na zonu taljenja

Eksperimentalna kategorija	Vrijeme zavarivanja
P-TIG_7s	7 s
TIG_7s	7 s
P-TIG_14s	14 s
TIG_14s	14 s
P-TIG_21s	21 s
TIG_21s	21 s

4. REZULTATI

U ovom poglavlju prezentirani su rezultati eksperimenata provedenih kroz istraživački dio doktorske disertacije. Rezultati uključuju karakteristične dimenzije zona taljenja (širina, dubina i površina u poprečnom presjeku) formiranih stacionarnim TIG procesom. Za eksperimente kod kojih je mjerena promjena temperature uzrokovana zavarivanjem prikazani su i toplinski ciklusi. Podpoglavljja obrađuju dijelove istraživanja u kojima je analiziran utjecaj različitih faktora na dimenzije zone taljenja. Ovi faktori uključuju vrstu plina s korijenske strane uzorka, protok zaštinog plina s korijenske strane uzorka, stanje površine osnovnog metala, duljinu električnog luka, vršni kut volframove elektrode i utjecaj impulsne struje (P-TIG) na zonu taljenja.

4.1 Utjecaj vrste plina na korijenskoj strani zava na zonu taljenja

Kako bi se istražio utjecaj vrste plina na korijenskoj strani zava na dimenzije zone taljenja kod nehrđajućeg čelika 316L za stacionarno autogeno TIG zavarivanje provedeni su eksperimenti navedeni u tablicama 4.1, 4.2, i 4.3. Sukladno prethodno predstavljenoj metodologiji (podpoglavlje 3.2), izmjerene su tri karakteristične vrijednosti rezultirajuće zone taljenja: njezina širina, dubina i površina u poprečnom presjeku. U tablicama je navedeno i različito vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja (7 s, 14 s ili 21 s) koje se korišteno u eksperimentima. Svaki eksperiment ponovljen je tri puta za različito vrijeme zavarivanja uz jednake zavarivačke parametre (tablica 3.3). Ovaj pristup rezultirao je s ukupno 27 provedenih eksperimenata navedenih u tablicama.

Tablica 4.1 Dimenzije zona taljenja formiranih uz zaštitu korijenske strane argonom

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s		
Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²
11,70	1,59	16,10	13,75	3,59	43,00	15,43	4,22	54,36
11,85	1,42	14,70	13,90	2,89	35,35	16,20	3,55	45,68
11,80	1,38	15,21	14,05	2,50	34,83	15,70	3,93	52,20

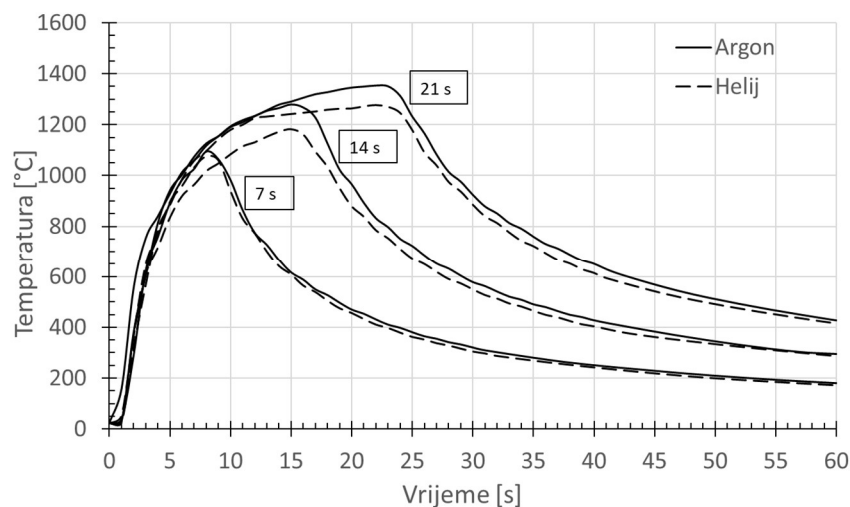
Tablica 4.2 Dimenzije zona taljenja formiranih uz zaštitu korijenske strane helijem

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s		
Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²
11,80	1,48	15,80	13,90	2,50	32,84	15,90	3,35	43,82
11,50	1,45	15,51	13,80	2,78	36,20	15,85	3,42	46,54
11,55	1,42	15,40	13,80	2,46	31,10	16,25	2,88	40,83

Tablica 4.3 Dimenzije zona taljenja formiranih bez zaštite korijenske strane

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s		
Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²
12,20	1,40	15,37	13,85	2,73	34,97	15,70	3,46	47,50
11,95	1,42	15,22	14,55	2,33	31,46	15,95	3,35	46,95
11,50	1,42	14,83	14,30	2,20	30,23	15,43	3,65	49,98

Sukladno opisanoj metodologiji, kod pojedinih eksperimenata provedena su mjerenja temperaturnog ciklusa na sredini donje strane uzorka. Navedena mjerenja uz zaštitu korijenske strane uzorka argonom, odnosno helijem za tri analizirana vremena zavarivanja prikazana su na slici 4.1.



Slika 4.1 Temperaturni ciklusi na korijenskoj strani zavora

Budući da je zavarivanje termopara s donje strane uzorka provedeno ručno, u pravilu je mjerna točka malo odstupala od idealne središnje pozicije na osi električnog luka. Kako bi se poboljšala usporedivost provedenih mjerenja, ovo odstupanje (r_e) izmjereno je nakon eksperimenta i prikazano u tablici 4.4 uz vrijednosti maksimalnih temperatura (T_{max}).

Tablica 4.4 Maksimalne temperature i odstupanje pozicije termopara od osi električnog luka

	Vrijeme zavarivanja					
	7 s		14 s		21 s	
Zaštitni plin	Ar	He	Ar	He	Ar	He
T_{max} / °C	1095	1076	1280	1181	1354	1277
r_e / mm	0,72	1,20	0,3	1,12	2,06	0,5

4.2 Utjecaj protoka zaštitnog plina na korijenskoj strani zavora na zonu taljenja

U svrhu analize utjecaja protoka zaštitnog plina na korijenskoj strani zavora na dimenzije zone taljenja za stacionarno autogeno TIG zavarivanje nehrđajućeg čelika 316L provedeni su eksperimenti navedeni u tablicama 4.5, 4.6, 4.7 i 4.8. Eksperimenti su provedeni za inertne zaštitne plinove argon i helij uz dva različita protoka (4 l/min i 10 l/min) za tri različita vremena zavarivanja (7 s, 14 s ili 21 s). Svaki eksperiment s različitim zaštitnim plinom, njegovim protokom i vremenom zavarivanja ponovljen je minimalno tri puta uz jednake zavarivačke parametre (tablica 3.3). Pojedini eksperimenti, kod kojih je uočeno veće rasipanje mjerenih dimenzija zone taljenja ponovljeni su pet ili šest puta.

Tablica 4.5 Dimenzije zone taljenja uz protok argona od 4 l/min na korijenskoj strani uzorka

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s			
Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Korijen mm	Površina mm ²
11,90	1,48	15,26	14,40	2,25	30,44	15,90	3,44	-	47,00
11,15	1,52	16,49	13,70	2,65	34,14	14,80	5,00	11,20	69,62
11,20	1,69	16,90	13,75	2,61	33,63	14,40	5,00	11,80	74,95
			13,15	5,00	53,75	14,85	5,00	11,95	74,68
			13,70	3,78	41,40	15,10	5,00	10,35	74,29
			14,40	2,65	30,55	15,80	4,10	-	52,53

Tablica 4.6 Dimenzije zone taljenja uz protok argona od 10 l/min na korijenskoj strani uzorka

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s			
Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Korijen mm	Površina mm ²
11,70	1,59	16,10	13,75	3,59	43,00	15,43	4,22	-	54,36
11,85	1,42	14,70	13,90	2,89	35,35	16,20	3,55	-	45,68
11,80	1,38	15,21	14,05	2,50	34,83	15,70	3,93	-	52,20
			13,75	3,07	37,81	16,00	3,72	-	49,16
			13,60	3,26	40,14	15,75	3,53	-	46,44

Tablica 4.7 Dimenzije zone taljenja uz protok helija od 4 l/min na korijenskoj strani uzorka

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s			
Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Korijen mm	Površina mm ²
11,80	1,48	15,80	13,90	2,50	32,84	15,90	3,35	-	43,82
11,50	1,45	15,51	13,80	2,78	36,20	15,85	3,42	-	46,54
11,55	1,42	15,40	13,80	2,46	31,10	16,25	2,88	-	40,83
			14,00	2,48	32,53	15,70	3,64	-	46,48
			13,40	3,00	37,43	15,30	5,00	8,95	71,68
						15,60	3,69	-	48,90

Tablica 4.8 Dimenzije zone taljenja uz protok helija od 10 l/min na korijenskoj strani uzorka

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s			
Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Korijen mm	Površina mm ²
11,35	1,48	16,10	13,95	2,31	29,90	15,50	3,52	-	48,60
10,70	2,58	24,70	13,20	4,66	47,49	15,50	3,84	-	51,69
11,30	1,59	17,01	13,15	3,36	38,34	14,75	5,00	11,03	73,20
11,30	1,44	15,57	13,50	2,75	34,44	15,50	4,49	-	53,95
			13,40	3,56	42,82	15,25	4,53	-	53,43
			14,00	2,40	32,20				

4.3 Utjecaj stanja površine osnovnog metala na zonu taljenja

Utjecaj stanja površine osnovnog metala (austenitni nehrđajući čelik 316L) na dimenzije zone taljenja za stacionarno TIG zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika 316L određen je pomoću eksperimenata navednih u tablicama 4.9, 4.10 i 4.11. Donja strana uzoraka je tijekom

zavarivanja bila izložena atmosferi, odnosno zraku. U navedenim tablicama je za eksperimente uz vrijeme zavarivanja (7 s, 14 s i 21 s) navedena izmjerena širina, dubina i površina zona taljenja u prosečnom presjeku. Kako bi se dobio uvid u ponovljivost TIG procesa svaki eksperiment ponovljen je tri puta pod istim zavarivačkim parametrima (tablica 3.3).

Tablica 4.9 Dimenzije zona taljenja za uzorke čija je površina ostavljena u izvornom stanju

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s		
Širina	Dubina	Površina	Širina	Dubina	Površina	Širina	Dubina	Površina
mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ²
11,70	1,38	13,81	14,15	2,06	28,27	15,75	3,30	41,90
11,70	1,40	15,05	13,60	2,51	30,86	15,75	3,24	44,40
11,80	1,40	15,35	14,30	2,13	28,15	15,80	3,12	43,04

Tablica 4.10 Dimenzije zona taljenja za uzorke kojima je brušena gornja površina

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s		
Širina	Dubina	Površina	Širina	Dubina	Površina	Širina	Dubina	Površina
mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ²
11,80	1,37	14,96	13,9	2,31	29,85	15,80	3,11	44,52
11,90	1,43	15,79	14,2	2,21	28,84	16,10	3,02	41,27
11,85	1,45	15,51	14,6	2,14	28,23	16,00	3,25	44,28

Tablica 4.11 Dimenzije zona taljenja za uzorke kojima su brušene gornja i donja površina

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s		
Širina	Dubina	Površina	Širina	Dubina	Površina	Širina	Dubina	Površina
mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ²
12,20	1,40	15,37	13,85	2,73	34,97	15,70	3,46	47,50
11,95	1,42	15,22	14,55	2,33	31,46	15,95	3,35	46,95
11,50	1,42	14,83	14,30	2,20	30,23	15,43	3,65	49,98

Koristeći prijenosni uređaj Mitutoyo SJ301 na pojedinim uzorcima s različitim stanjem površine izmjerena je površinska hrapavost (R_a i R_z), a dobiveni rezultati navedeni su u tablici 4.12.

Tablica 4.12 Površinske hrapavosti izmjerne na uzorcima u izvornom stanju i brušenim uzorcima

	Uzorak u izvornome stanju		Brušeni uzorak	
	gornja strana	donja strana	gornja strana	donja strana
R_a / μm	3,09	2,32	1,99	1,00
	2,80	2,66	1,81	1,18
	2,47	2,40	1,64	1,25
Prosjek	2,79	2,46	1,81	1,14
R_z / μm	15,18	13,38	11,47	7,44
	14,74	14,53	11,41	8,48
	13,24	13,80	10,96	8,75
Prosjek	14,39	13,90	11,28	8,22

4.4 Utjecaj duljine električnog luka na dimenzije zone taljenja

Kako bi se odredio utjecaj duljine električnog luka na dimenzije zone taljenja za stacionarno autogeno TIG zavarivanje nehrđajućeg čelika 316L provedeni su eksperimenti navedeni u

tablicama 4.13, 4.14 i 4.15. Razmatrane duljine električnog luka bile su 1,5 mm, 3 mm i 6 mm. Ostali zavarivački parametri nisu mijenjani a navedeni su u tablici 3.3. Nakon provedenih eksperimenata rezultirajućim zonama taljenja izmjerene su širina, dubina i površina u poprečnom presjeku. U tablicama su osim dimenzija zona taljenja navedena i tri odabrana vremena zavarivanja (7 s, 14 s ili 21 s).

Tablica 4.13 Dimenzije zone taljenja za duljinu električnog luka od 1,5 mm

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s		
Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²
11,35	2,05	17,05	14,00	3,30	30,77	15,45	4,35	44,33
11,18	2,22	17,04	13,10	3,00	33,29	15,10	4,07	42,84
10,85	2,11	20,00	13,50	3,20	33,74	15,00	4,29	49,95

Tablica 4.14 Dimenzije zone taljenja za duljinu električnog luka od 3 mm

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s		
Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²	Širina mm	Dubina mm	Površina mm ²
12,20	1,40	15,37	13,85	2,73	34,97	15,70	3,46	47,50
11,95	1,42	15,22	14,55	2,33	31,46	15,95	3,35	46,95
11,50	1,42	14,83	14,30	2,20	30,23	15,43	3,65	49,98
			13,90	2,65	33,71			

Tablica 4.15 Dimenzije zone taljenja za duljinu električnog luka od 6 mm

Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s			
Širina	Dubina	Površina	Širina	Dubina	Površina	Širina	Dubina	Površina	Korijen
mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ²	mm
11,08	1,59	16,51	14,05	2,86	36,21	14,95	5,00	79,79	11,40
10,95	1,67	17,02	13,40	3,46	39,94	15,20	5,00	68,20	7,90
11,40	1,65	16,44	13,80	3,15	37,50	15,60	5,00	62,70	7,50
10,95	5,00	42,76							

4.5 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na zonu taljenja

U tablici 4.16 prikazane su izmjerene karakteristične vrijednosti zona taljenja kod nehrđajućeg čelika 316L za eksperimente provedene s vršnim kutom volframove elektrode (W°) od 20° i 45° te duljinama električnog luka (AL) od 1,5 mm, 3 mm i 6 mm. Vremena stacionarnog TIG zavarivanja iznosila su 7 s, 14 s i 21 s. Ostali zavarivački parametri su u svim eksperimentima bili jednaki (tablica 3.3.). Izmjerene dimenzije uključuju širinu zone taljenja (W), dubinu zone taljenja (D) i površinu zone taljenja u poprečnom presjeku (FZA). Pojedini eksperimenti ponovljeni su nekoliko puta kako bi se mogla utvrditi ponovljivost TIG procesa.

Tablica 4.16 Dimenzije zona taljenja za vršne kutove volframove elektrode od 20 ° i 45 °

W °	AL mm	Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s		
		W mm	D mm	FZA mm ²	W mm	D mm	FZA mm ²	W mm	D mm	FZA mm ²
20 °	1,5	10,70	2,22	17,21	13,20	2,95	29,71	14,60	3,90	44,70
20 °	1,5	10,90	2,12	16,71	13,00	3,01	28,46	14,40	3,92	43,82
20 °	1,5	10,90	2,21	15,67	12,40	2,84	28,51	14,60	4,20	44,93
45 °	1,5	11,35	2,05	17,05	14,00	3,30	30,77	15,45	4,35	44,33
45 °	1,5	11,18	2,22	17,04	13,10	3,00	33,29	15,10	4,07	42,84
45 °	1,5	10,85	2,11	20,00	13,50	3,20	33,74	15,00	4,29	49,95
20 °	3,0	11,15	1,44	14,69	13,45	2,64	32,45	14,50	5,00	61,40
20 °	3,0	11,10	1,43	16,57	13,60	2,24	29,01	15,40	4,20	49,17
20 °	3,0	11,00	1,36	13,68	13,15	2,96	33,70	15,10	3,80	46,53
20 °	3,0	-	-	-	-	-	-	15,40	3,20	40,04
45 °	3,0	12,20	1,40	15,37	13,85	2,73	34,97	15,70	3,46	47,50
45 °	3,0	11,95	1,42	15,22	14,55	2,33	31,46	15,95	3,35	46,95
45 °	3,0	11,50	1,42	14,83	14,30	2,20	30,23	15,43	3,65	49,98
45 °	3,0	-	-	-	13,90	2,65	33,71	15,50	3,90	50,51
45 °	3,0	-	-	-	13,20	2,91	35,15	14,80	5,00	67,34
20 °	6,0	10,80	2,06	19,93	13,70	3,10	37,13	14,80	5,00	66,07
20 °	6,0	10,45	3,18	27,66	13,65	5,00	81,37	14,70	5,00	84,66
20 °	6,0	11,00	1,44	15,34	13,25	5,00	52,89	14,60	5,00	69,16
20 °	6,0	-	-	-	13,15	4,73	39,15	-	-	-
45 °	6,0	11,08	1,59	16,51	14,05	2,86	36,21	14,95	5,00	79,79
45 °	6,0	10,95	1,67	17,02	13,40	3,46	39,94	15,20	5,00	68,20
45 °	6,0	10,95	5,00	42,76	13,80	3,15	37,50	15,60	5,00	62,70
45 °	6,0	11,40	1,65	16,44	-	-	-	-	-	-

4.6 Utjecaj P-TIG zavarivanja na zonu taljenja

U tablici 4.17 prikazane su izmjerene vrijednosti dubine (D), širine (W) i površine zone taljenja (FZA) u poprečnom presjeku za stacionarno impulsno TIG (P-TIG) zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika 316L. Vrijednosti bazne (100 A) i vršne struje (200 A) te vremenski omjer njihovog trajanja (1:1) odabrane su tako da prosječna struja iznosi 150 A. Ovo je omogućilo usporedbu zona taljenja s konvencionalnim TIG zavarivanjem provedenim uz konstantnu jakost struje od 150 A. Eksperimenti su provedeni uz duljine električnog luka (AL) od 1,5 mm, 3 mm i 6 mm. Ostali zavarivački parametri P-TIG procesa prikazani su u tablici 3.9.

Tablica 4.17 Dimenzije zona taljenja formiranih stacionarnim P-TIG zavarivanjem

AL mm	Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s		
	W mm	D mm	FZA mm ²	W mm	D mm	FZA mm ²	W mm	D mm	FZA mm ²
1,5	11,80	2,49	18,91	14,10	3,70	34,25	15,25	5,00	53,00
1,5	11,75	2,38	18,66	14,70	3,52	34,39	15,50	5,00	57,39
1,5	11,90	2,48	18,05	13,90	3,42	33,79	15,70	5,00	48,98
3,0	11,50	1,73	18,19	14,95	2,64	30,53	16,40	3,15	42,18
3,0	12,40	1,79	16,75	14,20	2,88	34,36	15,80	5,00	63,63
3,0	12,10	1,76	16,27	14,15	3,30	38,69	16,00	3,72	42,69
6,0	11,65	1,61	17,19	14,00	5,00	47,41	15,55	5,00	84,14
6,0	11,20	1,78	17,60	14,00	4,44	41,86	15,55	5,00	75,65
6,0	11,90	1,70	18,48	14,50	3,33	33,55	16,10	5,00	66,67

U eksperimentima je također mijenjano vrijeme djelovanja električnog luka na uzorke (vrijeme zavarivanja) koje je iznosilo 7 s, 14 s i 21 s. Izmjerene vrijednosti istih karakterističnih dimenzija zona taljenja ali formiranih konvencionalnim stacionarnim TIG zavarivanjem jakosti struje od 150 A navedene su u tablici 4.18.

Tablica 4.18 Dimenzije zona taljenja formiranih konvencionalnim stacionarnim TIG procesom

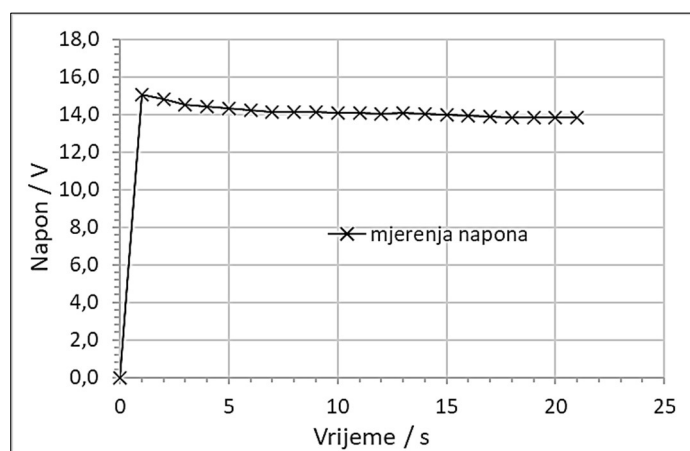
AL mm	Vrijeme zavarivanja 7 s			Vrijeme zavarivanja 14 s			Vrijeme zavarivanja 21 s		
	W mm	D mm	FZA mm ²	W mm	D mm	FZA mm ²	W mm	D mm	FZA mm ²
1,5	11,35	2,05	17,05	14,00	3,30	30,77	15,45	4,35	44,33
1,5	11,18	2,22	17,04	13,10	3,00	33,29	15,10	4,07	42,84
1,5	10,85	2,11	20,00	13,50	3,20	33,74	15,00	4,29	49,95
3,0	12,20	1,40	15,37	13,85	2,73	34,97	15,70	3,46	47,50
3,0	11,95	1,42	15,22	14,55	2,33	31,46	15,95	3,35	46,95
3,0	11,50	1,42	14,83	14,30	2,20	30,23	15,43	3,65	49,98
6,0	11,08	1,59	16,51	14,05	2,86	36,21	14,95	5,00	79,79
6,0	10,95	1,67	17,02	13,40	3,46	39,94	15,20	5,00	68,20
6,0	11,40	1,65	16,44	13,80	3,15	37,50	15,60	5,00	62,70

5. RASPRAVA

Ovo poglavlje sadrži raspravu i analizu predstavljenih rezultata istraživanja provedenog prema opisanoj metodologiji istraživanja. U podpoglavljima je obrađen utjecaj faktora čiji je utjecaj na zonu taljenja analiziran: vrsta plina s korijenske strane zavora, protok zaštitnog plina s korijenske strane zavora, stanje površine osnovnog metala, duljina električnog luka, vršni kut volframove elektrode i impulsna struja zavarivanja (P-TIG).

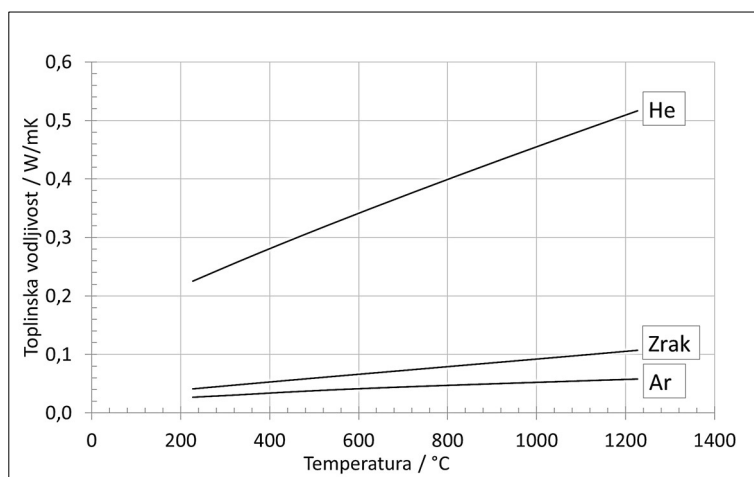
5.1 Utjecaj vrste plina s korijenske strane zavora na dimenzije zone taljenja

Upotreba zaštitnog plina na korijenskoj strani zavora kod zavarivanja nehrđajućeg čelika koristi se za sprječavanje prekomjerne oksidacije metala na visokim temperaturama koje se pojavljuju u ovoj zoni. Intenzivna oksidacija otežava formiranje kvalitetnog zavarenog spoja, negativno utječe na njegova mehanička svojstva i značajno narušava njegovu otpornost na koroziju. Najčešće korišteni zaštitni plinovi na korijenskoj strani zavora su argon, helij, dušik te njihove mješavine s vodikom [80], [81], [82]. U ovom podpoglavljju analiziran je utjecaj argona i helija kao zaštitnih plinova na korijenskoj strani zavora na dimenzije zone taljenja za stacionarno autogeno TIG zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika 316L. U analizu su uključeni i rezultati eksperimenata provedenih na uzorcima čija je korijenska strana tijekom zavarivanja bila izložena zraku tj. zaštitni plin nije korišten. Analiza je provedena za vremena zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s pod jednakim zavarivačkim parametrima. Mjerenje napona tijekom stacionarnog TIG zavarivanja u trajanju od 21 s prikazano je na slici 5.1, a izračunata srednja vrijednost iznosila je 14,1 V.



Slika 5.1 Mjerenje napona za vrijeme zavarivanja od 21 s

Prije svega važno je istaknuti kako se fizikalna svojstva argona, helija i zraka bitno razlikuju. Značajna razlika u fizikalnim svojstvima navedenih plinova, a posebno u njihovoj toplinskoj vodljivosti, utječe na intenzitet prijenosa topline na korijenskoj strani zavora što može utjecati na dimenzije zone taljenja. Na slici 5.2 prikazana je toplinska vodljivost za tri navedena plina u funkciji temperature [83]. Vidljivo je da je toplinska vodljivost helija za red veličine veća od zraka i argona. Zahvaljujući veoma niskoj toplinskoj vodljivosti, argon se često koristi i kao toplinski izolator.



Slika 5.2 Toplinska vodljivost argona, helija i zraka u funkciji temperature [83]

5.1.1 Vrijeme zavarivanja 7 s

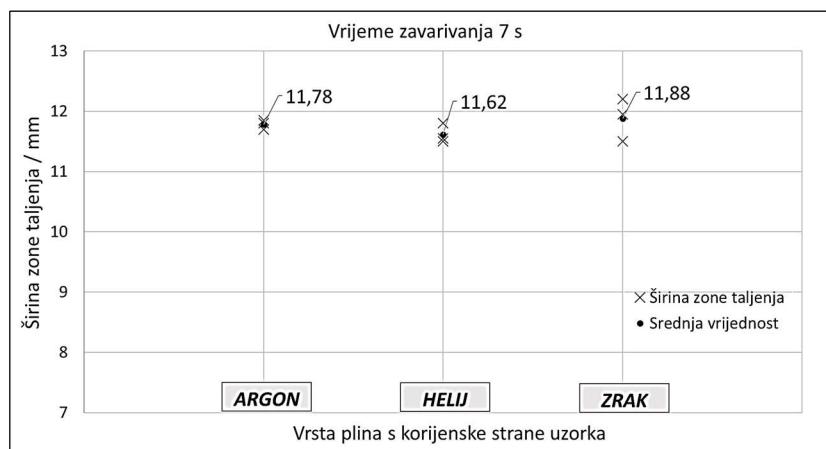
Uobičajen oblik zone taljenja za stacionarno TIG zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika pod odabranim zavarivačkim parametrima i vremenom zavarivanja od 7 s prikazan je na slici 5.3. Zona taljenja ima približno osnosimetričan oblik što je i očekivano obzirom da je odabrana stacionarna TIG konfiguracija osnosimetrična (volframova elektroda postavljena okomito na osnovni metal). Dubina penetracije ne povećava se kontinuirano od ruba zone taljenja do njezine sredine. Iz oblika granice taljenja može se zaključiti kako konvektivno strujanje tekućeg metala ima bitan utjecaj na prijenos topline u talini. Pregrijani tekući metal struji od sredine taline prema njezinom rubu, što smanjuje dubinu penetracija, a povećava širinu zone taljenja. Ovaj smjer konvektivnog strujanja uobičajen je za nehrđajući čelik s niskim udjelom sumpora u kemijskom sastavu [15], [61].



Slika 5.3 Uobičajen oblik zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s

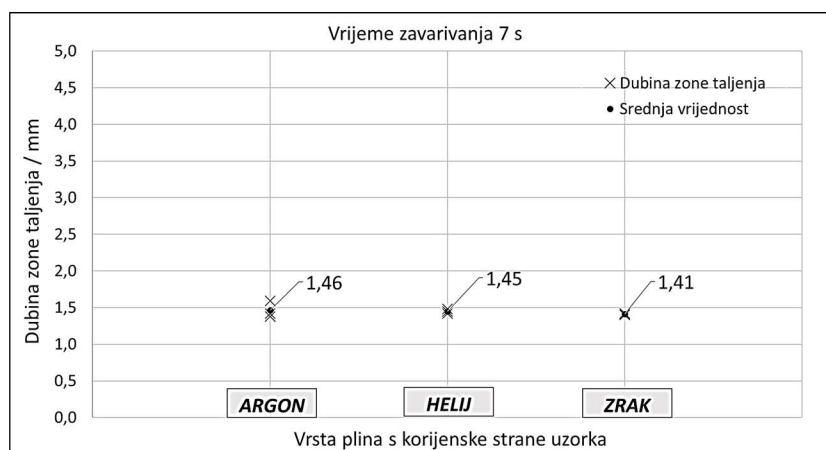
Izmjerene širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti za tri eksperimentalne kategorije (argon, helij ili zrak na korijenskoj strani zavora) i vrijeme zavarivanja od 7 s prikazane su na slici 5.4. Ponovljivost TIG procesa obzirom na širinu rezultirajuće zone taljenja bila je zadovoljavajuća. Maksimalni raspon mjerenja pojavio se kod uzoraka sa zrakom na korijenskoj strani zavora i nalazi se unutar relativno uskog intervala od $\pm 3\%$ srednje vrijednosti. Iz rezultata je vidljivo kako ne postoji značajnija razlika u srednjoj vrijednosti širine zone taljenja između uzoraka čija je korijenska strana tijekom zavarivanja bila štíćena argonom ili helijem,

odnosno izložena zraku. Izračunate vrijednosti nalaze su u rasponu od svega $\pm 1,1$ % srednje vrijednosti. Iz navedenog se može zaključiti kako vrsta plina na korijenskoj strani nije imala utjecaj na širinu zone taljenja.



Slika 5.4 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti

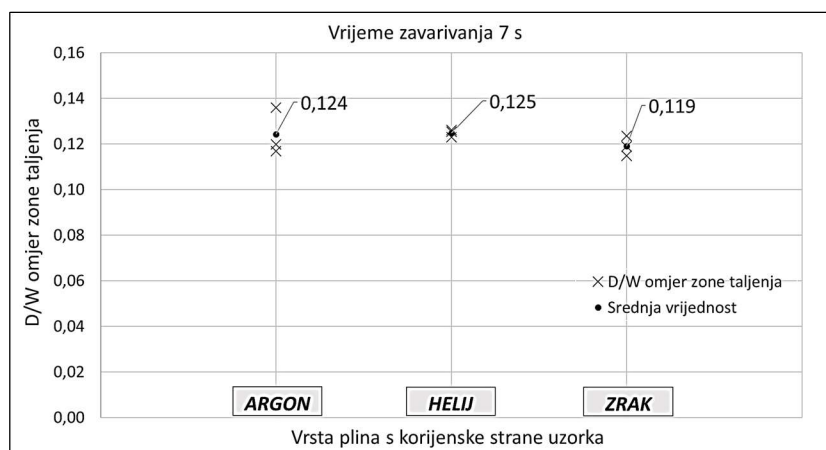
Na slici 5.5 prikazane su izmjerene vrijednosti dubine zone taljenja za uzorke čija je korijenska strana tijekom zavarivanja bila izložena argonu, heliju ili zraku. Najveći raspon u penetraciji zabilježen je za zaštitu argonom na korijenskoj strani zavora (0,21 mm). Međutim, ova vrijednost manja je od 5 % debljine uzorka (5 mm) što ukazuje na dobru ponovljivost TIG procesa obzirom na dubinu penetracije za vrijeme zavarivanja od 7 s. Izračunate srednje vrijednosti dubine penetracije slične su za sve tri eksperimentalne kategorije i nalaze se u rasponu od svega 0,05 mm, iz čega se može zaključiti kako vrsta plina na korijenskoj strani zavora nije imala utjecaj na dubinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s.



Slika 5.5 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti

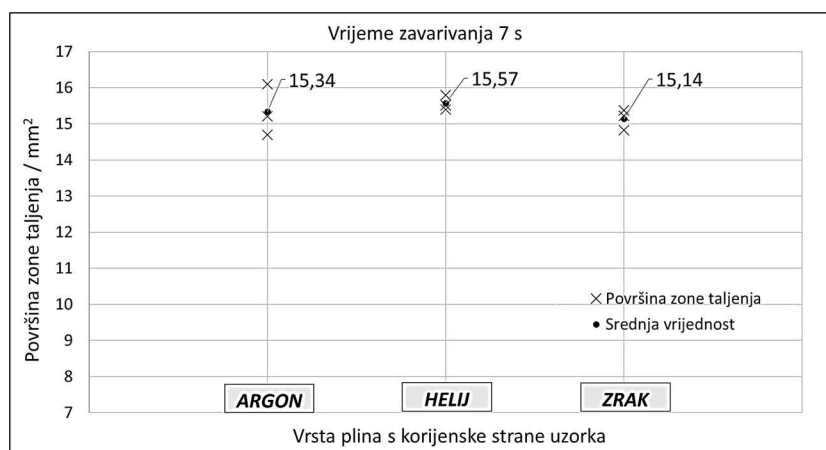
Vrijednosti D/W omjera zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s izračunate su i prikazane na slici 5.6. Ovaj općeprihvaćeni pokazatelj oblika zone taljenja imao je sličnu vrijednost bez obzira na vrstu plina na korijenskoj strani uzorka. Odnos između tri srednje vrijednosti D/W omjera koje pripadaju različitim kategorijama je očekivan budući da vrijednost D/W omjera proizlazi direktno iz dubine i širine zone taljenja koje su za sve tri analizirane kategorije bile veoma slične. Također, vrijednosti D/W omjera sugeriraju kako je širina zone taljenja kod stacionarnog autogenog TIG zavarivanja austenitnog nehrđajućeg čelika 316L značajno veća

od njezine dubine za vrijeme zavarivanja od 7 s. Ovo je uobičajen oblik zone taljenja za konvencionalno TIG zavarivanje [2], [56].



Slika 5.6 D/W omjeri zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima

Na slici 5.7 prikazane su izmjerene vrijednosti površine zone taljenja u poprečnom presjeku i pripadne srednje vrijednosti. Najveće odstupanje unutar eksperimentalnih kategorija utvrđeno je za uzorke čija je korijenska strana zavora štice argonom tijekom zavarivanja. Međutim, ova vrijednost nalazi se unutar intervala $\pm 5\%$ srednje vrijednosti, što potvrđuje dobru ponovljivost stacionarnog TIG procesa obzirom na površinu presjeka zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s. Maksimalna razlika u srednjim vrijednostima površine zone taljenja između različitih kategorija iznosi svega $0,43 \text{ mm}^2$, iz čega proizlazi kako vrsta plina na korijenskoj strani uzorka nije imala utjecaj na površinu zone taljenja u poprečnom presjeku.

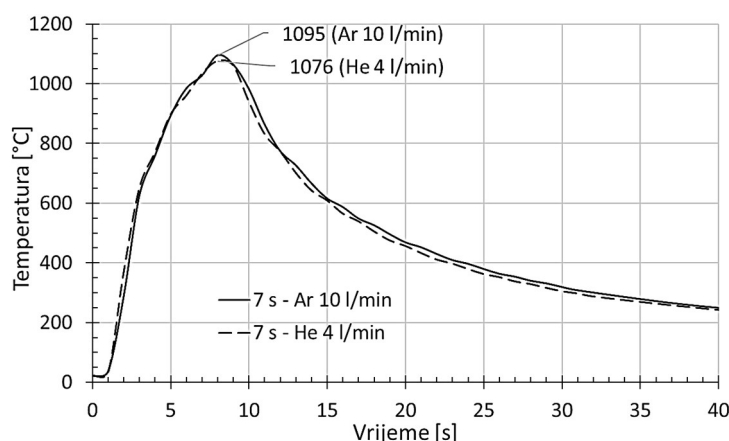


Slika 5.7 Površine poprečnog presjeka zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima

Na temelju detaljne analize dimenzija zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s može se utvrditi kako vrsta plina s korijenske strane uzorka nije imala značajniji utjecaj na zonu taljenja za stacionarno TIG zavarivanje nehrđajućeg čelika 316L. Izmjerena širina i dubina zone taljenja, njihov D/W omjer te površina zone taljenja nije iskazala značajniju promjenu u slučajevima kad je korijenska strana uzorka tijekom zavarivanja štice argonom (protok 10 l/min), helijem (protok 4 l/min) ili je pak bila izložena zraku. Iako se fizikalna svojstva navedenih plinova značajno razlikuju, relativno kratko vrijeme zavarivanja od 7 s vjerojatno nije bilo

dovoljno da se navedena razlika odrazi na dinamiku prijenosa topline s korijenske strane uzorka i posljedično na izmjerene dimenzije zone taljenja.

Toplinski ciklusi izmjereni na sredini donje stane uzorka štíćene argonom i helijem za vrijeme zavarivanja od 7 s prikazani su na slici 5.8. Može se uočiti kako nije zabilježena značajnija razlika u fazi zagrijavanja, odnosno hlađenja te postignutim vršnim temperaturama. Maksimalne temperature izmjerene su neposredno nakon gašenja električnog luka, tj. kratko nakon 7 s, što je i očekivano obzirom na malu udaljenost između mjernog mjesta i zone taljenja. Prikazana mjerenja toplinskih ciklusa ukazuju kako vrsta plina na korijenskoj strani zavora nije imala utjecaj na izmjerene toplinske cikluse za vrijeme zavarivanja od 7 s. Ovaj zaključak u skladu je s provedenim mjerenjima dimenzija zona taljenja koja također nisu iskazala značajniju razliku obzirom na zaštitni plin (argon ili helij) na korijenskoj strani zavora.



Slika 5.8 Toplinski ciklusi na sredini donje stane uzorka štíćene Ar i He

Ponovljivost stacionarnog TIG zavarivanja obzirom na širinu, dubinu i površinu poprečnog presjeka zone taljenja formirane na austenitnom nehrđajućem čeliku 316L uz vrijeme zavarivanja od 7 s bila je veoma dobra. Rezultati mjerenja pokazuju kako vrsta plina s korijenske strane uzorka (argon, helij, zrak) nije bitnije utjecala na karakteristične dimenzije zona taljenja. Razlike u prijenosu topline uzrokovane bitno različitim fizikalnim svojstvima plinova na korijenskoj strani zavora nisu imale utjecaja na zonu taljenja za relativno kratko vrijeme zavarivanja od 7 s.

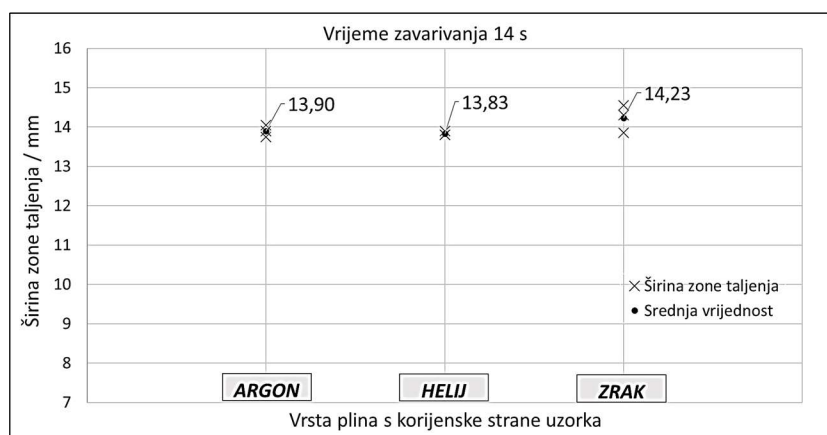
5.1.2 Vrijeme zavarivanja 14 s

Uobičajen oblik zone taljenja formirane pod odabranim zavarivačkim parametrima stacionarnog TIG procesa uz vrijeme zavarivanja od 14 s prikazan je na slici 5.9. Očekivano, širina i dubina zone taljenja povećali su se u odnosu na zonu taljenja formiranu za vrijeme zavarivanja od 7 s. Zona taljenja i dalje je zadržala približno osnosimetričan oblik. Dubina penetracije ne povećava se kontinuirano od ruba zone taljenja do njezine sredine. Zbog toga na prikazanoj fotografiji maksimalna dubina penetracije nije smještena u sredini zone taljenja nego je pomaknuta bočno u odnosu na os simetrije. Ovo opet ukazuje kako strujanje tekućeg metala ima važnu ulogu u prijenosu topline unutar taline, osobito kod nehrđajućeg čelika [8].



Slika 5.9 Uobičajen oblik zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 14 s

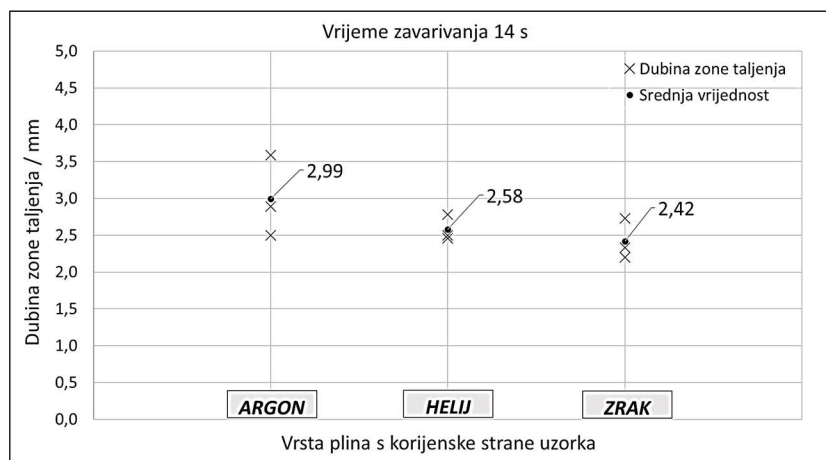
Izmjerene širine zone taljenja i izračunate srednje vrijednosti za uzorke čija je korijenska strana za vrijeme zavarivanja bila štićena argonom, helijem ili izložena zraku prikazane su na slici 5.10. Raspon izmjerenih vrijednosti unutar sve tri eksperimentalne kategorije veoma je malen što ukazuje na dobru ponovljivost TIG procesa obzirom na rezultirajuću širinu zone taljenja. Prosječne širine zone taljenja za različite eksperimentalne kategorije ne razlikuju se značajno. Minimalna srednja vrijednost širine zone taljenja izračunata je za uzorke štićene helijem na korijenskoj strani (13,83 mm), a maksimalna za uzorke bez zaštite na korijenskoj strani (14,23 mm). Navedeno ukazuje kako vrsta plina na korijenskoj strani zavora nije imala utjecaja na širinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 14 s.



Slika 5.10 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti

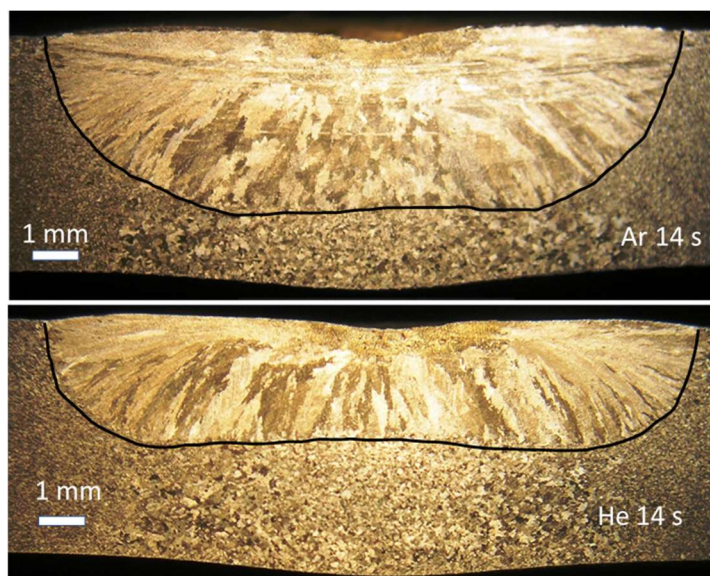
Izmjerene dubine zone taljenja za tri različite eksperimentalne kategorije i vrijeme zavarivanja od 14 s prikazane su na slici 5.11. Može se uočiti kako je izračunata srednja vrijednost penetracije za uzorke štićene argonom na korijenskoj strani (2,99 mm) značajno veća od uzorka štićenih helijem (2,58 mm) i uzoraka čija je korijenska strana bila izložena zraku (2,42 mm). Povećanje srednje vrijednosti penetracije u slučaju prisustva argona na korijenskoj strani u odnosu na helij iznosi približno 16 %, a u odnosu na zrak 24 %. Povećanje penetracije može se objasniti izvrsnom toplinskom izolacijom koju argon pruža na korijenskoj strani zavora zadržavajući tako veću količinu topline u uzorku. Naime, toplinska vodljivost argona (0,027 W/mK na 500 K) je za red veličine manja u odnosu na helij (0,226 W/mK na 500 K) te značajno manja u odnosu na zrak (0,041 na 500 K). U odnosu na vrijeme zavarivanja od 7 s, za vrijeme zavarivanja od 14 s primjećuje se veće rasipanje vrijednosti dubine zone taljenja unutar eksperimentalnih kategorija. Ova pojava mogla bi biti povezana s lokalnim promjenama količine površinskih aktivnih elemenata u osnovnom metalu. Naime, ovi elementi utječu na intenzitet i smjer konvektivnog prijenosa topline u talini čiji se značaj kod povećanih dimenzija

zone taljenja također povećava (veći Pécletov broj). Kako bi se utvrdila točnost ove tvrdnje, u budućem istraživanju bi trebalo provesti detaljne analize kemijskog sastava osnovnog metala i metala zavora.



Slika 5.11 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti

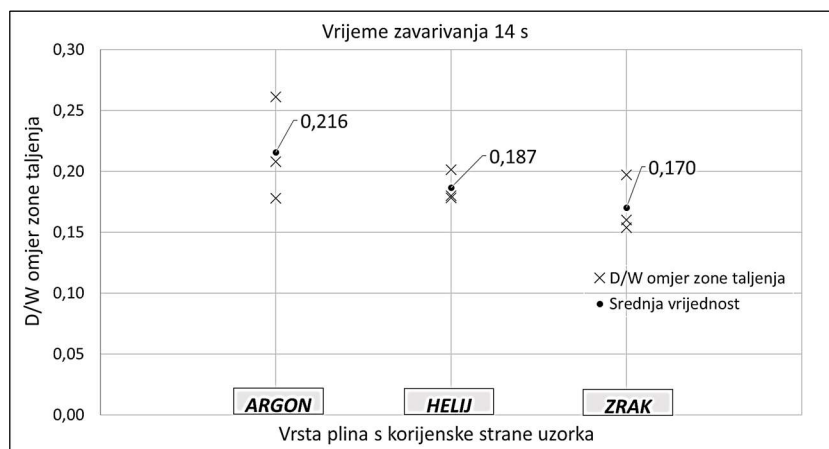
Zone taljenja nakon razvijanja makrostrukture za uzorke čija je korijenska strana tijekom stacionarnog autogenog TIG zavarivanja štićena argonom i helijem vidljive su na slici 5.12. Iako obje zone taljenja imaju načelno sličan oblik i podjednaku širinu, može se uočiti kako je dubina zone taljenja kod uzorka čija je korijenska strana bila štićena argonom značajno veća.



Slika 5.12 Zone taljenja formirane pod zaštitom korijenske strane zavora Ar i He

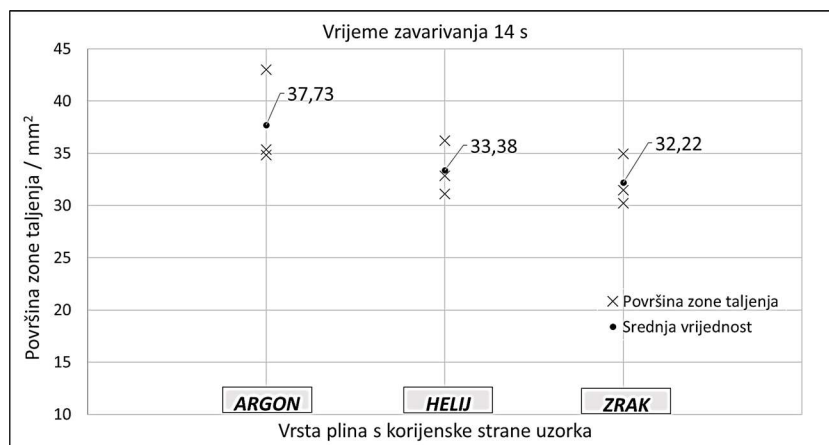
Karakteristični D/W omjeri zona taljenja za vrijeme zavarivanja od 14 s prikazani su na slici 5.13. Budući da su širine zona taljenja za sve kategorije bile približno jednake, razlike u D/W omjeru uzrokovane su primarno razlikama u dubini penetracije. Najveća srednja vrijednost D/W omjera zone taljenja (0,216) izračunata je za kategoriju u kojoj je argon korišten kao zaštita korijenske strane uzorka. U pravilu je veći D/W omjer zone taljenja poželjan jer se za formiranje zavarenog spoja u osnovni metal unosi manja količina topline što rezultira manjim deformacijama kojima su nehrđajući čelici posebno skloni. Veći D/W omjer zone taljenja također povoljno djeluje na produktivnost procesa zavarivanja. S druge strane, treba istaknuti

kako znatno povećanje D/W omjera može povećati vjerojatnost nastanka toplih pukotina [51], [52]. Zaštita korijenske strane uzorka helijem rezultirala je 13 % manjim D/W omjerom zone taljenja, a u slučaju zraka na korijenskoj strani D/W omjer smanjio se za 21 %.



Slika 5.13 D/W omjeri zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima

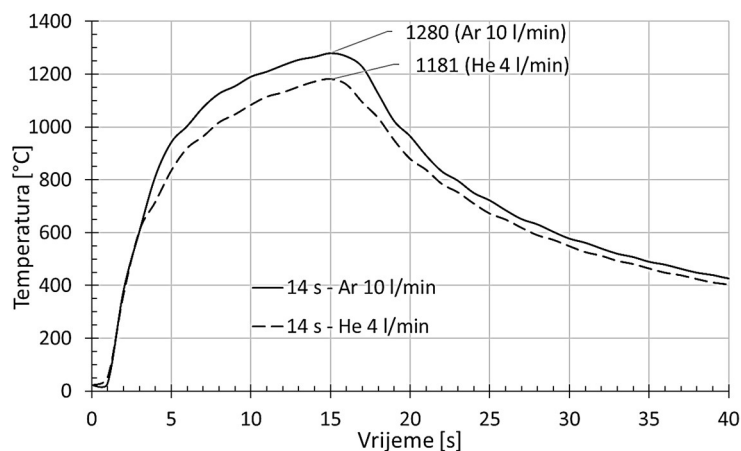
Izmjerene površine poprečnog presjeka zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti također dobro odražavaju odnose među eksperimentalnim kategorijama za vrijeme zavarivanja od 14 s, slika 5.14. Razlika u površinama zone taljenja među kategorijama uzrokovana je primarno razlikom u dubini zone taljenja jer su izmjerene širine bile veoma slične. Najveća površina zone taljenja (37,73 mm²) izmjerena je za kategoriju kojoj pripadaju uzorci čija je korijenska strana štićena argonom. Zaštita helijem smanjila je prosječnu površinu zone taljenja za približno 12 % (33,38 mm²), a prisustvo zraka na korijenskoj strani smanjilo ju je za 15 % (32,22 mm²).



Slika 5.14 Površine poprečnog presjeka zone taljenja

Izmjereni toplinski ciklusi za eksperimente provedene koristeći argon, odnosno helij za zaštitu korijenske strane zavora tijekom zavarivanja od 14 s prikazani su na slici 5.15. Vršne vrijednosti temperature postignute su u približno istom trenutku, neposredno nakon gašenja električnog luka. Međutim, vršna vrijednost temperature u slučaju upotrebe argona (1280 °C), kao zaštitnog plina na korijenskoj strani zavora, je približno 100 °C veća u odnosu na helij. Mjerenja temperature u skladu su s mjerenjima dimenzija zone taljenja koja su iskazala povećanu dubinu penetracije za slučaj zaštite korijenske strane zavora argonom uz vrijeme zavarivanja od 14 s.

Veća temperatura na korijenskoj strani zavora može se objasniti izvrsnom toplinskom izolacijom koja karakterizira argon, što se u konačnici odrazilo na povećanje dubine penetracije.



Slika 5.15 Toplinski ciklusi na sredini donje stane uzorka štice Ar i He

Ponovljivost stacionarnog TIG zavarivanja obzirom na širinu zone taljenja uz vrijeme zavarivanja od 14 s bila je veoma dobra. S druge strane, ponovljivost procesa obzirom na dubinu penetracije znatno je lošija što je vjerojatno povezano s lokalnim promjenama količine površinski aktivnih elemenata poput sumpora i kisika u osnovnom metalu. Ovo nije uočeno za vrijeme zavarivanja od 7 s zbog manje količine taline i smanjenog značaja konvektivne komponente prijenosa topline u tekućem metalu (manji Pécletov broj). Rezultati mjerenja pokazuju kako upotreba argona kao zaštitnog plina s korijenske strane uzorka rezultira značajno većom prosječnom penetracijom u odnosu na helij i zrak. Povećanje penetracije može se objasniti odličnom toplinskom izolacijom koju argon osigurava na korijenskoj strani zavora i tako zadržava veću količinu topline u uzorku.

5.1.3 Vrijeme zavarivanja 21 s

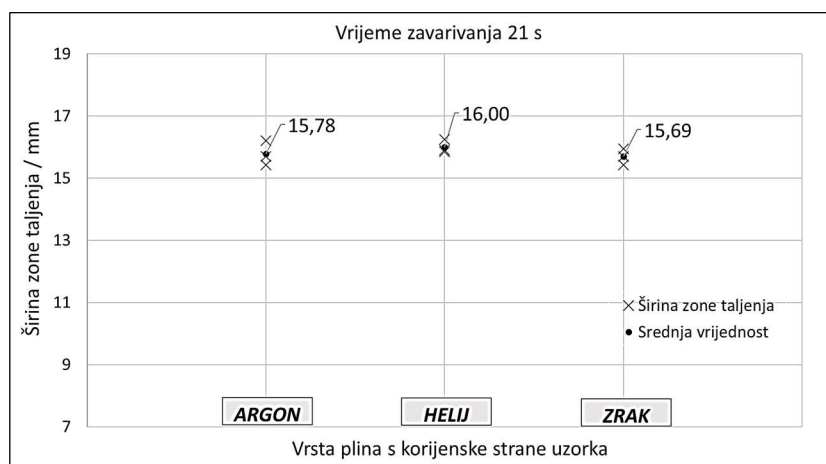
Uobičajen oblik zone taljenja za stacionarni autogeni TIG proces pri odabranim zavarivačkim parametrima za vrijeme zavarivanja od 21 s prikazan je na slici 5.16. Za razliku od profila penetracije za vrijeme zavarivanja od 7 s i 14 s, maksimalna dubina penetracije u pravilu se kontinuirano povećava prema sredini presjeka gdje doseže svoju maksimalnu vrijednost. Oblik zone taljenja ostaje približno osnosimetričan, kao i na kraćim vremenima zavarivanja.



Slika 5.16 Uobičajen oblik zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s

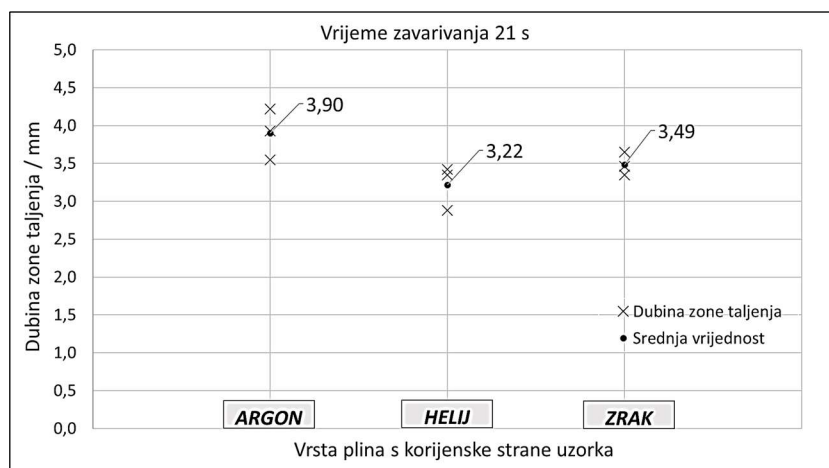
Na slici 5.17 prikazane su izmjerene širine zone taljenja i izračunate srednje vrijednosti za uzorke štice argonom i helijem na korijenskoj strani te za uzorke čija je korijenska strana bila

izložena atmosferi (zraku) tijekom zavarivanja. Ponovljivost TIG procesa obzirom na širinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s veoma je dobra: maksimalni raspon širine zone taljenja ustanovljen je za zaštitu korijenske strane argonom, a iznosi svega $\pm 2,5$ % srednje vrijednosti. Vidljivo je kako razlika između prosječnih vrijednosti širine zone taljenja među kategorijama nije značajna, što upućuje na zaključak kako vrsta plina s korijenske strane uzorka nije imala utjecaj na širinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s. Isti nalaz utvrđen je za kraće vrijeme zavarivanja od 7 s i 14 s.



Slika 5.17 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti

Izmjerene dubine penetracije i njihove srednje vrijednosti za tri različite vrste plina na korijenskoj strani zavara uz vrijeme zavarivanja od 21 s prikazane su na slici 5.18. Može se uočiti da je kod uzoraka čija je korijenska strana tijekom zavarivanja bila zaštićena argonom ostvarena značajno veća prosječna dubina penetracije. U odnosu na helij ovo povećanje prosječne penetracije iznosi 21 %, a u odnosu na uzorke bez zaštitnog plina na korijenskoj strani povećanje iznosi 12 %. Povećanje penetracije uočeno je i kod eksperimenata provedenih za vrijeme zavarivanja od 14 s te se također može objasniti odličnom toplinskom izolacijom koja karakterizira argon. Naime, toplinska vodljivost argona značajno je manja u odnosu na helij i zrak što smanjuje intenzitet odvođenja topline s korijenske strane uzorka i tako povećava dubinu penetracije. Kod relativno kratkog vremena zavarivanja od 7 s, razlike u toplinskim svojstvima plinova na donjoj strani uzoraka nisu se odrazile na dubinu penetracije. Primjećuje se nešto veće rasipanje izmjerenih vrijednosti penetracije unutar eksperimentalnih kategorija u odnosu na vrijeme zavarivanja od 7 s. Ovo bi mogla biti posljedica lokalnih odstupanja u količini površinskih aktivnih elemenata (S, O) koji utječu na smjer i intenzitet konvekcije u tekućem metalu te na taj način djeluju na oblik i dimenzije zone taljenja. Povećanje rasipanja penetracije unutar eksperimentalnih kategorija zabilježena su na dužim vremenima zavarivanja (14 s i 21 s) jer se značaj prijenosa topline konvekcijom povećava s porastom dimenzija zone taljenja (povećanje Péclet broja) [19].



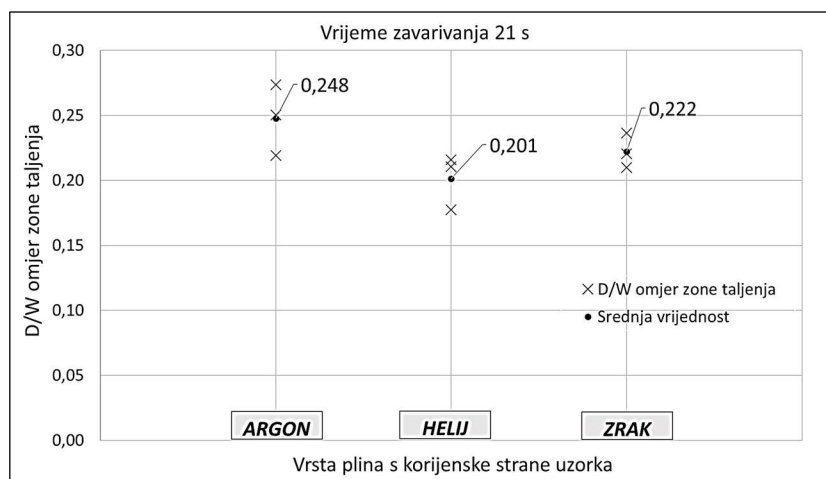
Slika 5.18 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti

Na slici 5.19 usporedno su prikazane fotografije zone taljenja nakon razvijanja makrostrukture za uzorke čija je korijenska strana tijekom zavarivanja u trajanju od 21 s bila štíćena argonom, odnosno helijem. Iako obje zone taljenja načelno imaju sličan oblik i širinu, dubina zone taljenja za uzorak štíćen argonom vidljivo je veća.



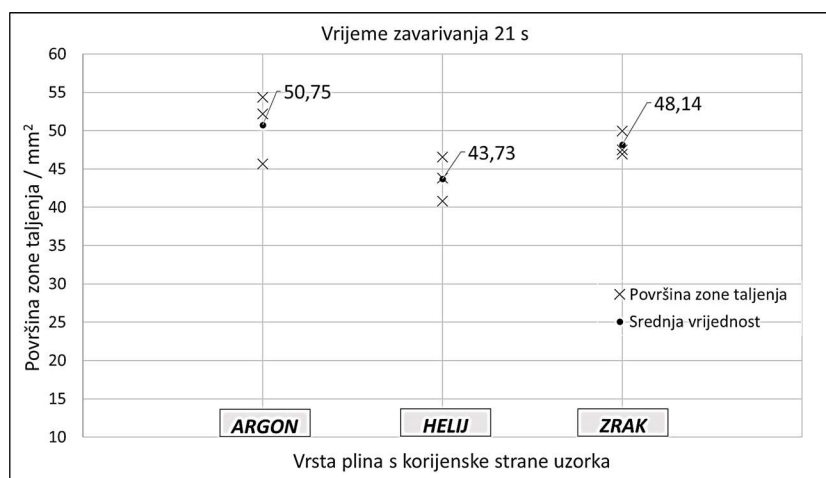
Slika 5.19 Zone taljenja nastale pod zaštitom korijenske strane zava Ar i He

Izračunati D/W omjeri zone taljenja za tri vrste plina na korijenskoj strani zava i vrijeme zavarivanja od 21 s prikazani su na slici 5.20. Upotreba argona kao zaštitnog plina rezultirala je povećanjem prosječne vrijednosti D/W omjera zone taljenja za 23 % u odnosu na helij i 12 % u odnosu na zrak. Sličan utjecaj argona na D/W omjer zone taljenja utvrđen je i za vrijeme zavarivanja od 14 s. S druge strane, za relativno kratko vrijeme zavarivanja od 7 s ovaj efekt nije zabilježen.



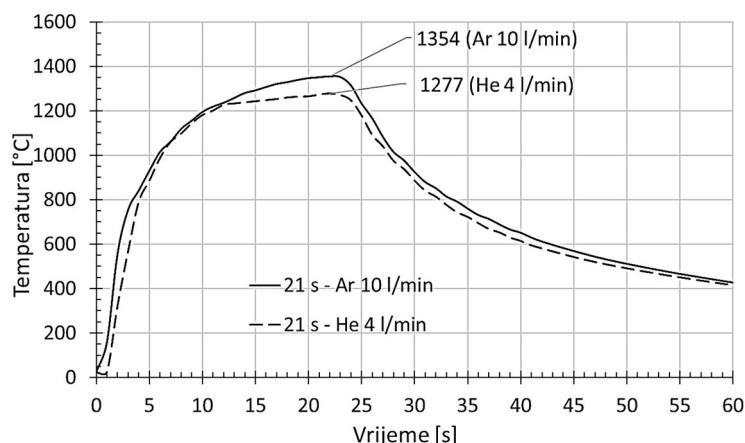
Slika 5.20 D/W omjeri zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima

Površine poprečnog presjeka zone taljenja izmjerene pomoću programskog paketa ImageJ i izračunate srednje vrijednosti za tri eksperimentalne kategorije i vrijeme zavarivanja od 21 s prikazane su na slici 5.21. Najveća prosječna površina poprečnog presjeka ostvarena je u slučaju zaštite korijenske strane zavora argonom. Ovo je u skladu s vrijednostima dubine penetracije i D/W omjera zone taljenja koje su također bile veće u slučajevima prisutnosti argona na korijenskoj strani zavora u odnosu na helij ili zrak.



Slika 5.21 Površine poprečnog presjeka zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima

Temperature izmjerene na sredini donje strane uzorka uz prisutnost argona, odnosno helija na korijenskoj strani zavora i vrijeme zavarivanja od 21 s prikazane su na slici 5.22. Kao i za vrijeme zavarivanja od 14 s, može se uočiti nešto veća vrijednost maksimalne temperature za slučaj upotrebe argona kao zaštitnog plina na korijenskoj strani zavora. Izmjereni temperaturni ciklusi u skladu su s mjerenjima dimenzija zona taljenja koje su iskazale povećanu prosječnu dubinu penetracije za eksperimente u kojima se argon koristio kao zaštita na korijenskoj strani zavora. Povećanje vršne temperature može se pojasniti odličnom toplinskom izolacijom argona što smanjuje toplinske gubitke na donjoj (korijenskoj) strani uzorka i za posljedicu ima povećanje dubine penetracije.

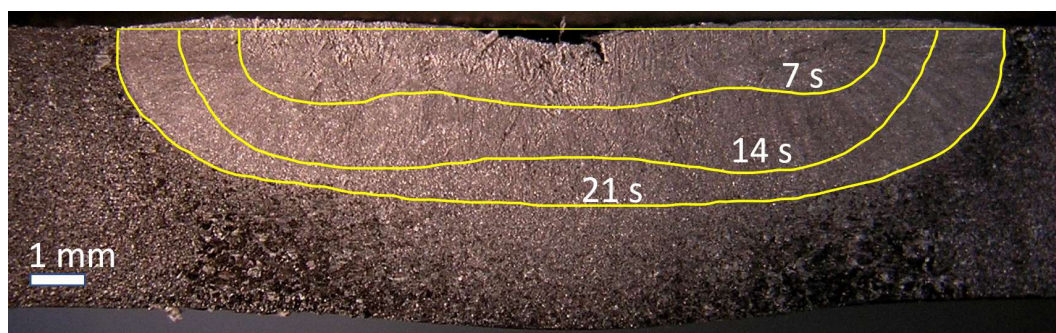


Slika 5.22 Toplinski ciklusi na sredini donje stane uzorka štíćene Ar i He

Ponovljivost stacionarnog TIG zavarivanja obzirom na širinu zone taljenja uz vrijeme zavarivanja od 21 s ostala je veoma dobra. Kao i za vrijeme zavarivanja od 14 s ponovljivost procesa obzirom na dubinu penetracije znatno je lošija. Razlog je vjerojatno povezan s lokalnim promjenama količine površinskih aktivnih elemenata (S, O) u osnovnom metalu. Rezultati mjerenja potvrđuju da upotreba argona kao zaštitnog plina s korijenske strane uzorka povećava prosječnu penetraciju u odnosu na helij i zrak zahvaljujući odličnoj toplinskoj izolaciji koju argon osigurava na korijenskoj strani zavora.

5.1.4 Vremenska evolucija zone taljenja

Eksperimenti osmišljeni u svrhu analize utjecaja različite vrste plina (argon, helij, zrak) s korijenske strane zavora na dimenzije zone taljenja provedeni su za vrijeme zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s. Odabir vremena zavarivanja kao nezavisne varijable omogućava i analizu vremenske evolucije zone taljenja u promatranom intervalu. Na slici 5.23 prikazana su tri odabrana uobičajena profila penetracije za navedena vremena zavarivanja. Karakteristične dimenzije zone taljenja poput njezine širine, dubine i površine u poprečnom presjeku povećavaju se s dužim vremenom zavarivanja. Na slici se također može primjetiti i vremenska evolucija profila penetracije na koji kod nehrđajućeg čelika, snažno utječe intenzitet i smjer konvekcije tekućeg metala.



Slika 5.23 Prikaz vremenske evolucije zone taljenja u intervalu od 7 s do 21 s

Povećanje širine i dubine zone taljenja za istraženi vremenski interval od 7 s do 21 s uz zaštitu korijenske strane zavora argonom prikazano je na slici 5.24. Promjena širine zone taljenja (W_{Ar})

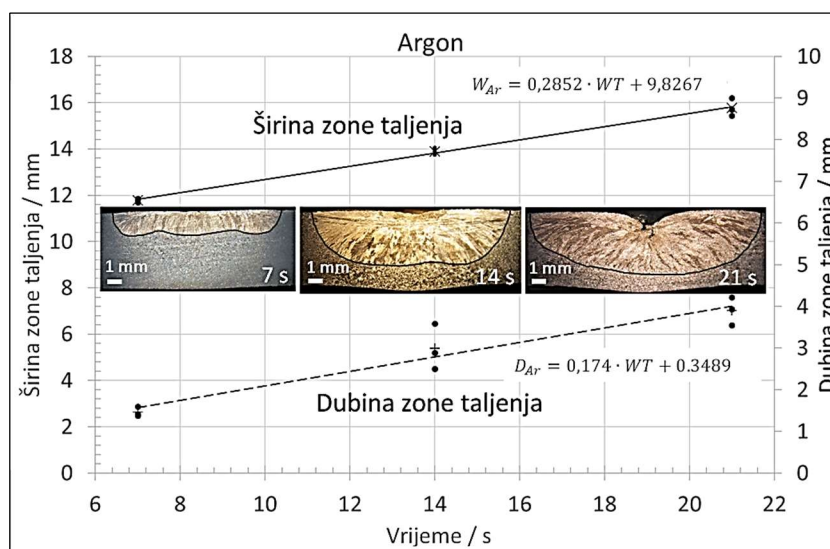
u funkciji vremena zavarivanja (WT) u navedenom intervalu uz zaštitu korijenske strane zavara argonom može se opisati sljedećom linearnom funkcijom:

$$W_{Ar} = 0,2852 \cdot WT + 9,8267 \quad 5.1$$

Prosječna širina zone taljenja povećala se s 11,78 mm (vrijeme zavarivanja 7 s) do 15,78 mm (vrijeme zavarivanja od 21 s). Iz ovoga povećanja od 4 mm proizlazi i prosječna brzina rasta širine zone taljenja od 0,28 mm/s u intervalu od 7 s do 21 s. Može se napomenuti kako je prosječna brzina rasta širine zone taljenja u intervalu od 0 s do 7 s značajno veća i iznosi 1,68 mm/s. Porast dubine zone taljenja (D_{Ar}) od 7 s do 21 s uz zaštitu korijenske strane zavara argonom također se može opisati linearnom jednadžbom koja glasi:

$$D_{Ar} = 0,174 \cdot WT + 0,3489 \quad 5.2$$

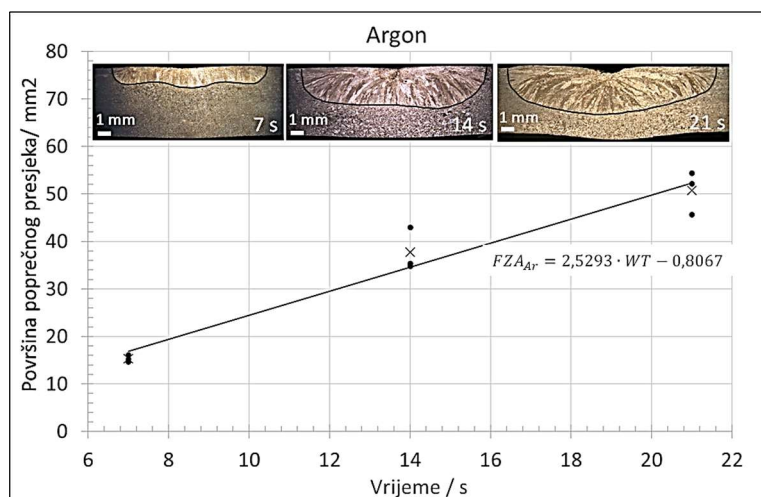
Prosječna dubina zone taljenja povećala se s 1,46 mm (vrijeme zavarivanja 7 s) na 3,90 mm (vrijeme zavarivanja 21 s). Ovaj porast iznosi 2,44 mm tijekom 14 s iz čega proizlazi i prosječna brzina rasta dubine zone taljenja od 0,17 mm/s. Ova vrijednost nešto je manja od prosječne brzina rasta penetracije u intervalu od 0 s do 7 s koja je iznosila približno 0,21 mm/s.



Slika 5.24 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zavara štice argonom

Vremenska evolucija površine poprečnog presjeka zone taljenja uz zaštitu korijenske strane zavara argonom prikazana je na slici 5.25. Površina poprečnog presjeka zone taljenja povećala se s prosječne vrijednosti 15,34 mm² za vrijeme zavarivanja od 7 s na 50,75 mm² za vrijeme zavarivanja od 21 s. Porast od 35,41 mm² ostvaren je tijekom 14 s iz čega proizlazi i brzina rasta površine poprečnog presjeka zone taljenja od 2,53 mm²/s. Povećanje površine poprečnog presjeka zone taljenja (FZA_{Ar}) unutar vremenskog intervala od 7 s do 21 s uz zaštitu argonom na korijenskoj strani zavara, opisano je linearnom jednadžbom koja glasi:

$$FZA_{Ar} = 2,5293 \cdot WT - 0,8067 \quad 5.3$$



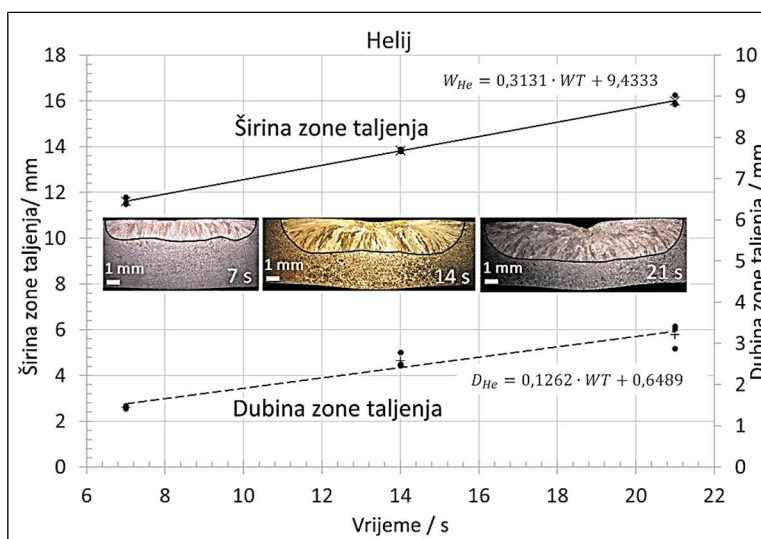
Slika 5.25 Promjena površine poprečnog presjeka zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zavora štice argonom

Na slici 5.26 prikazana je evolucija širine i dubine zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s do 21 s uz zaštitu korijenske strane zavora helijem. Povećanje širine zone taljenja (W_{He}) u ovom slučaju može se opisati jednadžbom pravca:

$$W_{He} = 0,3131 \cdot WT + 9,4333 \quad 5.4$$

Prosječna širina zone taljenja povećala se s 11,62 mm za vrijeme zavarivanja od 7 s do konačne vrijednost od 16 mm za vrijeme zavarivanja od 21 s. Povećanje tijekom 14 s iznosi 4,38 mm iz čega proizlazi brzina rasta širine zone taljenja od 0,31 mm/s. Ova brzina značajno je manja u odnosu na brzinu rasta u intervalu od 0 s do 7 s koja iznosi 1,66 mm/s. Promjena prosječne dubine zone taljenja (D_{He}) u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s može se opisati linearnom jednadžbom koja glasi:

$$D_{He} = 0,1262 \cdot WT + 0,6489 \quad 5.5$$

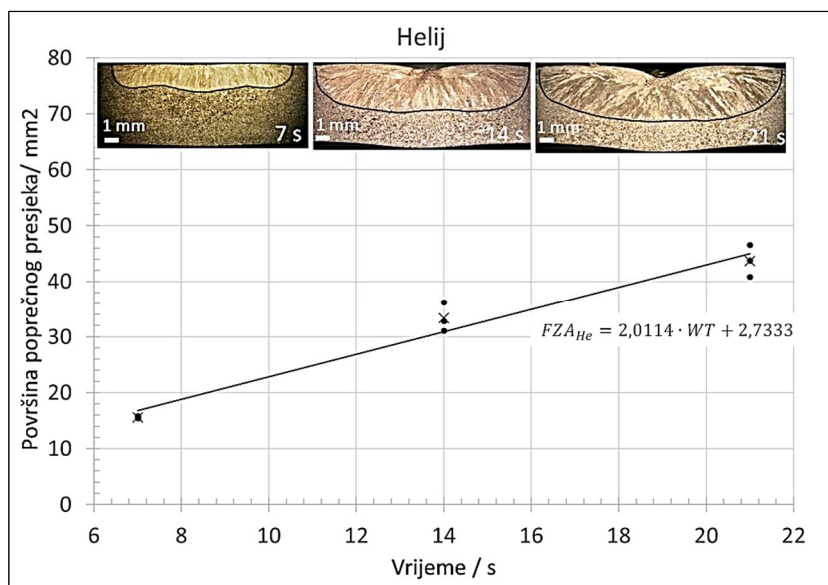


Slika 5.26 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zavora štice helijem

Brzina rasta prosječne dubine zone taljenja u intervalu vremena zavarivanja od 7 s do 21 s iznosila je približno 0,13 mm/s. Ovakva dinamika rezultirala je povećanjem prosječne dubine penetracije za 1,77 mm tijekom 14 s djelovanja električnog luka na uzorak: dubina zone taljenja povećala se s 1,45 mm za vrijeme zavarivanja od 7 s na 3,22 mm za vrijeme zavarivanja od 21 s. Brzina rasta penetracije do 7 s iznosila je 0,21 mm/s što ukazuje na usporenje povećavanja penetracije za duže vrijeme zavarivanja.

Povećanje površine poprečnog presjeka zone taljenja u intervalu od 7 s do 21 s uz zaštitu korijenske strane zavara helijem prikazano je na slici 5.27. Prosječna vrijednost površine zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s iznosila je 15,57 mm², a za vrijeme zavarivanja od 21 s povećala se na 43,73 mm². Ovaj rast, ostvaren uz protok vremena od 14 s, iznosio je 28,16 mm², što znači kako je brzina rasta površine poprečnog presjeka zone taljenja iznosila približno 2 mm²/s u promatranom vremenskom intervalu. Promjena površine poprečnog presjeka zone taljenja (FZA_{He}) u funkciji vremena zavarivanja (WT) uz zaštitu korijenske strane zavara helijem može se opisati sljedećom linearnom jednadžbom:

$$FZA_{He} = 2,0114 \cdot WT + 2,7333 \quad 5.6$$



Slika 5.27 Promjena površine poprečnog presjeka zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zavara štice helijem

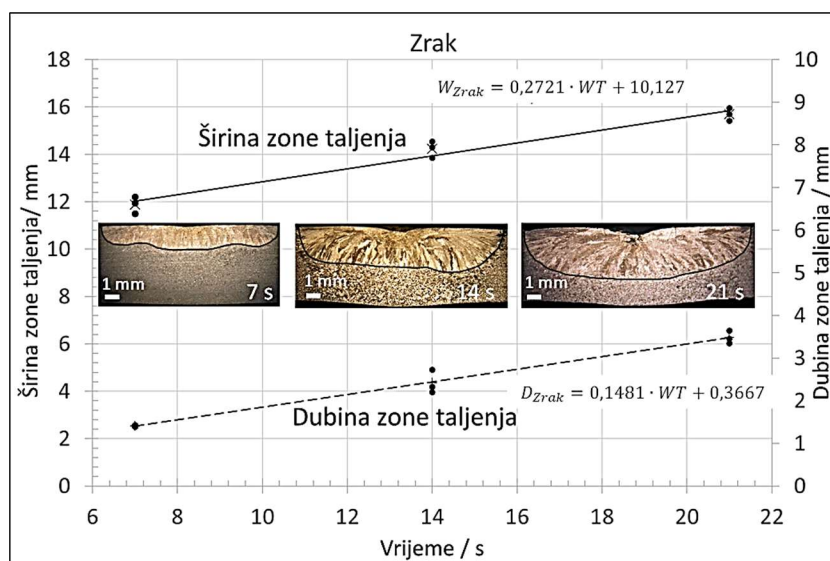
Povećanje širine i dubine zone taljenja za vremenski interval zavarivanja od 7 s do 21 s kod uzoraka čija je korijenska strana tijekom zavarivanja bila izložena atmosferi prikazan je na slici 5.28. Prosječna širina zone taljenja povećala se od 11,88 mm za vrijeme zavarivanja od 7 s do 15,69 mm za vrijeme zavarivanja od 21 s. Povećanje u navedenom intervalu od 14 s iznosi 3,81 mm uz brzinu rasta širine zone taljenja od 0,27 mm/s. Ova brzina značajno je manja u odnosu na brzinu u vremenskom intervalu od 0 s do 7 s koja je iznosila 1,7 mm/s. Jednadžba koja opisuje povećanje širine zone taljenja (W_{Zrak}) u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s uz korijensku stranu zavara izloženu zraku glasi:

$$W_{Zrak} = 0,2721 \cdot WT + 10,127 \quad 5.7$$

Povećanje dubine zone taljenja u analiziranom vremenskom periodu od 14 s iznosi 2,08 mm. Penetracija se povećala s 1,41 mm za vrijeme zavarivanja od 7 s na 3,49 mm za vrijeme zavarivanja od 21 s. Iz navedenog proizlazi i brzina rasta penetracije od približno 0,15 mm/s, što je nešto manje u odnosu na brzinu penetracije u intervalu od 0 s do 7 s od 0,20 mm/s.

Penetracija (D_{Zrak}) u funkciji vremena zavarivanja za interval od 7 s do 21 s i korijensku stranu zava izloženu zraku može se opisati linearnom jednačom:

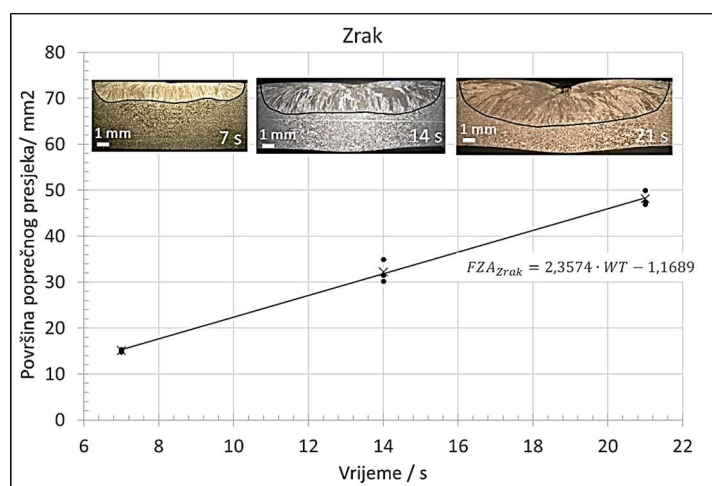
$$D_{Zrak} = 0,1481 \cdot WT + 0,3667 \quad 5.8$$



Slika 5.28 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zava izložena zraku

Vremensko povećanje površine poprečnog presjeka zona taljenja za uzorke čija je korijenska strana bila izložena atmosferi (zraku) tijekom zavarivanja prikazano je na slici 5.29. Prosječna površina povećala se s 15,14 mm² za vrijeme zavarivanja od 7 s na 48,14 mm² za vrijeme zavarivanja od 21 s. Ovo povećanje od 33 mm² tijekom vremena od 14 s odvijalo se prosječnom brzinom od 2,36 mm²/s. Povećanje površine presjeka zone taljenja (FZA_{Zrak}) u funkciji vremena zavarivanja unutar perioda od 7 s do 21 s opisano je linearnom funkcijom:

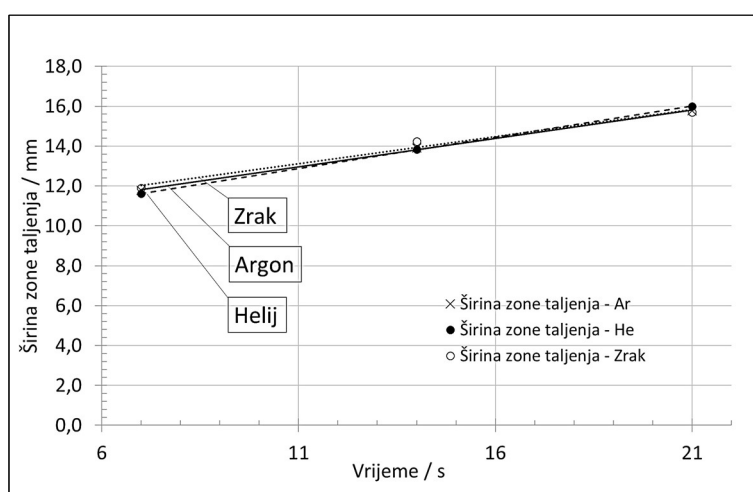
$$FZA_{Zrak} = 2,3574 \cdot WT - 1,1689 \quad 5.9$$



Slika 5.29 Promjena površine poprečnog presjeka zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, korijenska strana zava izložena atmosferi

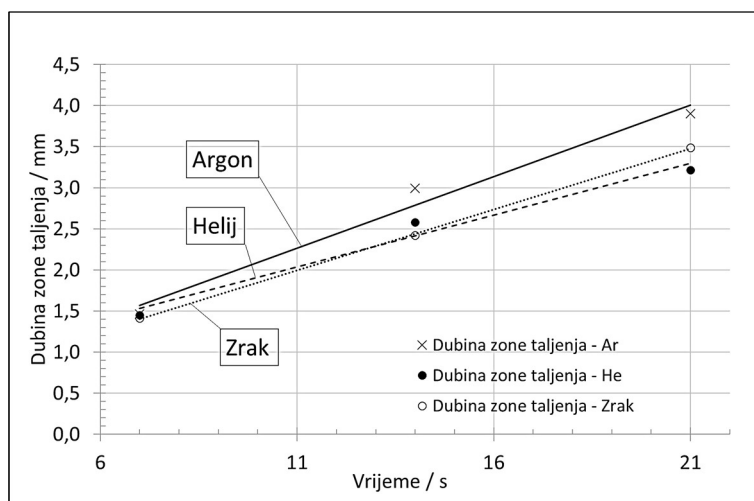
Na metalografskim prikazima u prezentiranim dijagramima vidljivo je kako su sve zone taljenja zadržavale približno osnosimetričan oblik, neovisno o vremenu zavarivanja. Međutim, vrijeme zavarivanja snažno je utjecalo na profil penetracije. Naime, zona taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s u pravilu je imala konvencionalan (konkavan) oblik s dubinom penetracije koja se kontinuirano povećava prema središtu gdje doseže svoj maksimum. S druge strane, za vrijeme zavarivanja od 7 s i 14 s, dubina penetracije u pravilu se nije kontinuirano povećavala prema središtu zone taljenja, nego je dolazilo do formiranja lokalnih maksimuma.

Na slici 5.30 su prikazane prosječne vrijednosti širine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s za tri eksperimentalne kategorije koje su se razlikovale samo obzirom na vrstu plina (argon, helij ili zrak) prisutnog na korijenskoj strani zavora. U dijagramu su također prikazana i tri pravca koja opisuju promjenu širine zone taljenja za svaku od eksperimentalnih kategorija. Vidljivo je kako su pripadne srednje vrijednosti širine zona taljenja te nagibi prikazanih pravaca približno jednaki što znači kako vrsta plina na korijenskoj strani zavora nije imala značajan utjecaj na vremensku evoluciju širine zone taljenja.



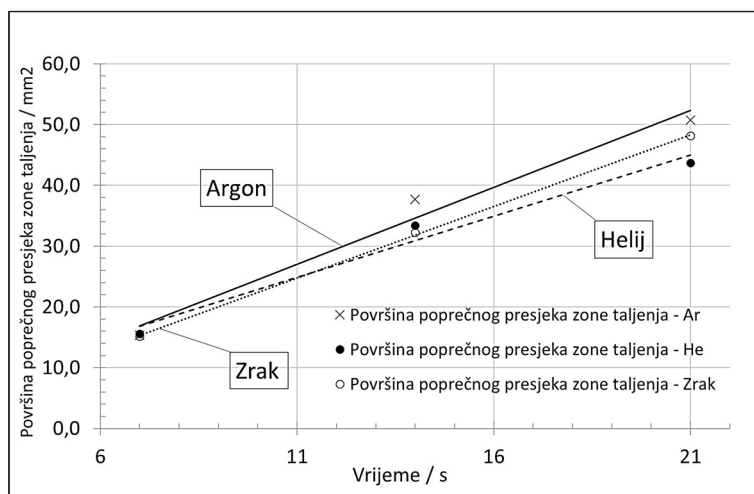
Slika 5.30 Vremenska evolucija širine zone taljenja za uzorke čija je korijenska strana zavora štíćena argonom, helijem ili izložena atmosferi

Prosječne vrijednosti dubine penetracije i pripadni pravci koji opisuju njezinu promjenu u analiziranom vremenskom periodu zavarivanja od 7 s do 21 s vidljivi su na slici 5.31. U dijagramu se može uočiti kako za vrijeme zavarivanja od 7 s nema značajnije razlike između uzoraka s različitim plinom na korijenskoj strani zavora. Međutim, dubina zone taljenja u slučaju upotrebe argona kao zaštinog plina na korijenskoj strani zavora značajno je veća u odnosu na helij i zrak za vrijeme zavarivanja od 14 s i 21 s. Navedeno je posljedica izvrsne toplinske izolacije koju argon pruža i tako smanjuje intenzitet hlađenja na donjoj strani uzorka. Povećana dubina penetracije u slučaju argona očituje se i kroz veći nagib pripadnog mu pravca. U dijagramu nije vidljiva značajnija razlika između vremenske evolucije dubine zone taljenja između uzoraka čija je korijenska strana bila štíćena helijem ili izložena zraku.



Slika 5.31 Vremenska evolucija dubine zone taljenja za uzorke čija je korijenska strana zavora štice argonom, helijem ili izložena atmosferi

Povećanje poprečnog presjeka zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 14 s za tri analizirane eksperimentalne kategorije vidljivo je na slici 5.32.



Slika 5.32 Vremenska evolucija površine poprečnog presjeka zone taljenja za uzorke čija je korijenska strana zavora štice argonom, helijem ili izložena atmosferi

Za vrijeme zavarivanja od 7 s vrsta plina s korijenske strane zavora očito nije imala mjerljiv utjecaj na površinu poprečnog presjeka zone taljenja. Međutim, za vrijeme zavarivanja od 14 s i 21 s površina se značajnije povećala ukoliko je argon korišten kao zaštitni plin na korijenskoj starani zavora. Brži rast zone taljenja u slučaju argona očituje se i kroz pripadni mu pravac čiji je nagib nešto veći u odnosu na pravce koji pripadaju heliju i zraku. Ovakvi rezultati u skladu su s prethodnim opažanjem kako vrsta plina na korijenskoj strani nema utjecaj na širinu rezultirajuće zone taljenja ali povećava njezinu dubinu u slučaju korištenja argona.

Istraživanje utjecaja vrste plina s korijenske strane zavora za stacionarno TIG zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika 316L pokazalo je kako upotreba argona u odnosu na helij i zrak povećava prosječnu dubinu penetracije i D/W omjer zone taljenja za dulja vremena zavarivanja (14 s i 21 s). Značajniji utjecaj na širinu zone taljenja nije zabilježen. Ovaj znanstveni doprinos objavljen je i u članku [84]. Ponovljivost stacionarnog TIG procesa obzirom na širinu zone

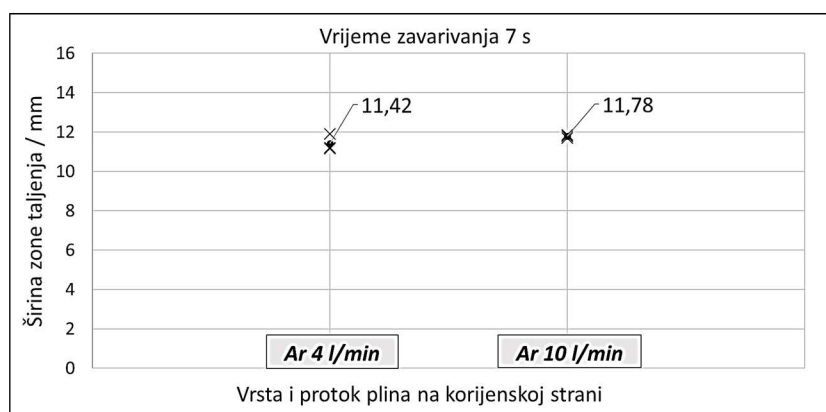
taljenja bila je veoma dobra bez obzira na vrijeme zavarivanja ali se obzirom na dubinu penetracije znatno pogoršala za dulja vremena zavarivanja (14 s i 21 s).

5.2 Utjecaj protoka zaštitnog plina na korijenskoj strani zavara na zonu taljenja

Kroz istraživanje opisano u ovom podpoglavlju analiziran je utjecaj promjene protoka zaštitnih plinova na korijenskoj strani stacionarnog TIG zavora na širinu, dubinu i površinu poprečnog presjeka zone taljenja. Eksperimenti su provedeni na uzorcima od austenitnog nehrđajućeg čelika 316L za tri različita vremena stacionarnog TIG zavarivanja (7 s, 14 s i 21 s). Kao zaštitni medij na korijenskoj strani zavora korišteni su inertni plinovi argon i helij, a njihovi protoci iznosili su 4 l/min i 10 l/min.

5.2.1 Vrijeme zavarivanja 7 s - zaštita korijenske strane argonom

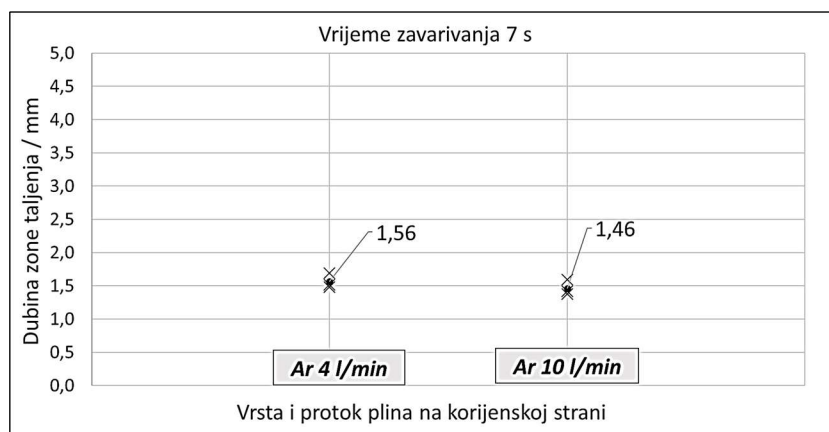
Slika 5.33 prikazuje izmjerene vrijednosti širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti za vrijeme zavarivanja od 7 s uz dva različita protoka argona s korijenske strane zavora formiranog stacionarnim TIG zavarivanjem. Ponovljivost TIG procesa obzirom na izmjerene širine zone taljenja bila je veoma dobra: mjerenja se kod protoka argona od 4 l/min nalaze unutar intervala od $\pm 3,3$ % srednje vrijednosti, a kod protoka od 10 l/min unutar intervala od $\pm 0,6$ %. Iz rezultata je vidljivo kako ne postoji značajna razlika između prosječne širine zona taljenja nastalih pod jednakim zavarivačkim parametrima uz različite protoke argona na korijenskoj strani.



Slika 5.33 Širine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavora

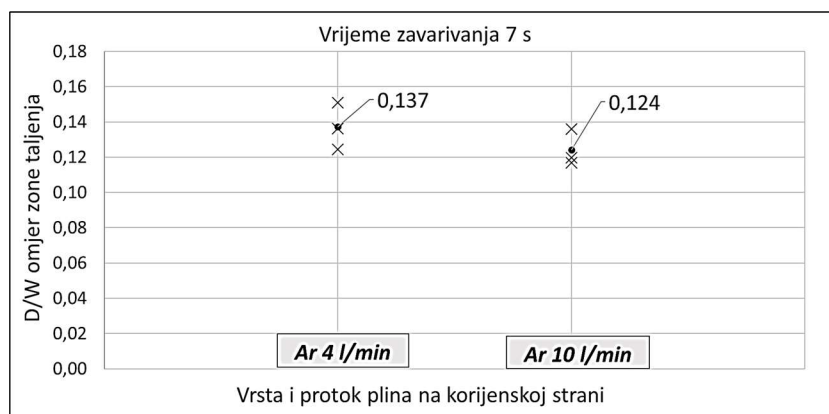
Naime, povećanjem protoka argona s 4 l/min na 10 l/min prosječna širina zone taljenja povećala se za samo 3,2 %. Iz navedenog se može zaključiti kako navedena promjena protoka nije imala značajniji utjecaj na širinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s.

Izmjerene dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti za vrijeme zavarivanja od 7 s uz protok argona na korijenskoj strani zavora od 4 l/min i 10 l/min prikazane su na slici 5.34. Izmjerene vrijednosti nalaze su u rasponu od $\pm 6,7$ % (4 l/min) i $\pm 7,2$ % (Ar 10 l/min) srednje vrijednosti, što ukazuje na dobru ponovljivost procesa obzirom na dubinu penetracije. Prosječna penetracija iznosila je 1,56 mm za protok argona od 4 l/min i 1,46 mm za protok argona od 10 l/min. Ova razlika iznosi 6,4 % iz čega proizlazi kako analizirana promjena protoka argona s korijenske strane zavora nije imala snažan utjecaj na dubinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s.



Slika 5.34 Dubine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavora

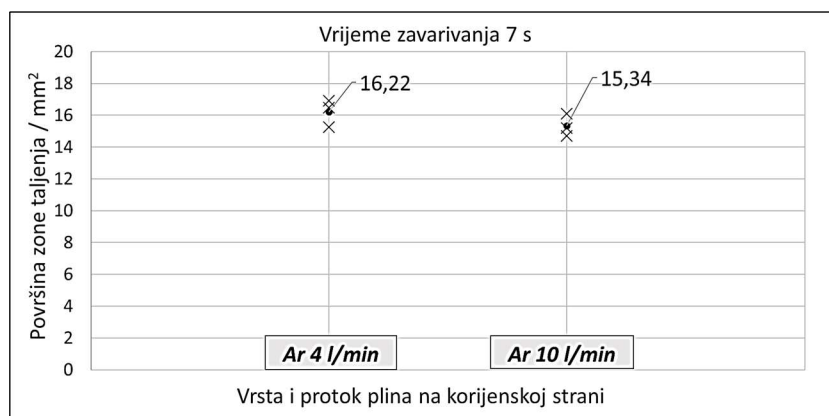
Karakteristični D/W omjeri zona taljenja formirani tijekom 7 s pod protokom argona od 4 l/min i 10 l/min na korijenskoj strani zavora izračunati su i prikazani na slici 5.35. Dobivene brojčane vrijednosti odgovaraju uobičajenom profilu penetracije konvencionalnog TIG procesa u kojem je širina zone taljenja u pravilu značajno veća od njezine dubine [57].



Slika 5.35 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavora

Smanjenje prosječne vrijednosti D/W omjera s povećanjem protoka argona iznosilo je 9,5 %. Kako D/W omjer proizlazi direktno iz dubine i širine zone taljenja vrijedi analogan zaključak: promjena protoka argona na korijenskoj strani zavora nije značajnije utjecala na D/W omjer zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s.

Na slici 5.36 prikazane su izmjerene vrijednosti površina poprečnog presjeka zona taljenja i pripadne srednje vrijednosti za protoke argona od 4 l/min i 10 l/min na korijenskoj strani zavora, uz vrijeme zavarivanja od 7 s. Rezultati također ukazuju kako promjene protoka argona nisu bitnije utjecale na zonu taljenja, odnosno površinu njezinog poprečnog presjeka za vrijeme zavarivanja od 7 s. Povećanje protoka argona s 4 l/min na 10 l/min rezultiralo je smanjenjem prosječne vrijednosti površine zone taljenja za 5,4 %.

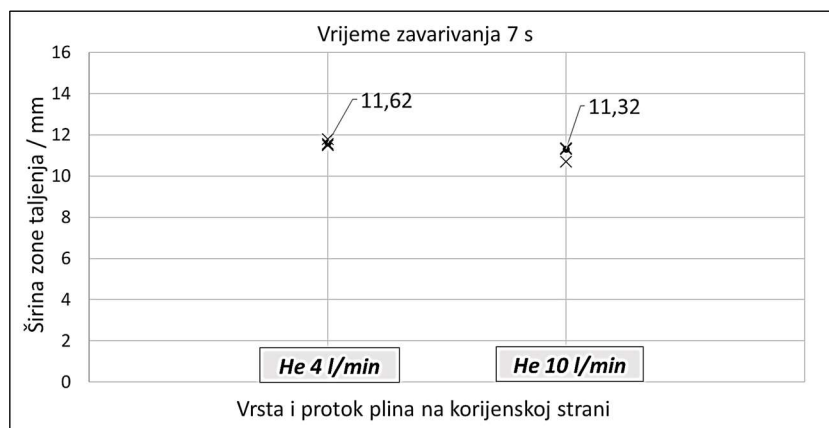


Slika 5.36 Površine poprečnog presjeka zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara

Za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s nije zabilježen utjecaj promjene protoka argona s korijenske strane zavara na dimenzije zone taljenja. Ponovljivost procesa obzirom na širinu, dubinu i površinu zone taljenja bila je zadovoljavajuća.

5.2.2 Vrijeme zavarivanja 7 s - zaštita korijenske strane helijem

Izmjerene vrijednosti širine zone taljenja i njihove srednje vrijednosti za vrijeme zavarivanja od 7 s i dva različita protoka helija s korijenske strane zavara prikazane su na slici 5.37. Uski intervali u kojima su se nalazile izmjerene vrijednosti ukazuju na dobru ponovljivost TIG procesa obzirom na širinu zone taljenja.

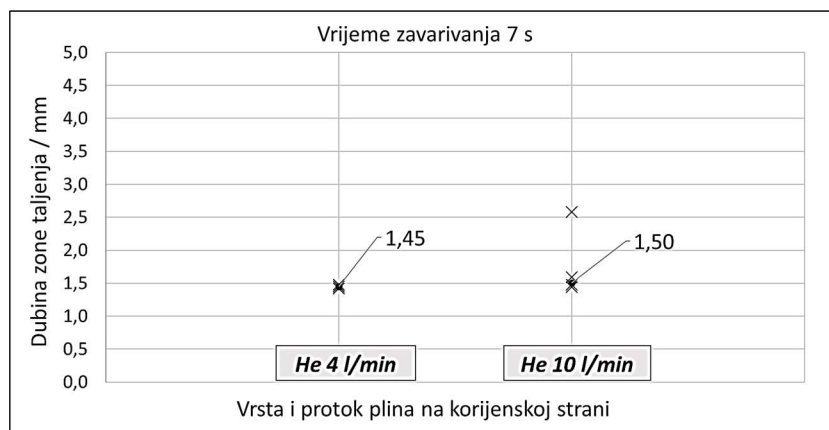


Slika 5.37 Širine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara

Za protoke helija od 4 l/min i 10 l/min navedeni interval je iznosio $\pm 1,3 \%$ i $\pm 2,9 \%$ srednje vrijednosti. Mjerenja ukazuju kako ne postoji značajnija razlika između prosječnih širina zona taljenja nastalih uz različite protoke helija na korijenskoj strani zavara. Povećanjem protoka helija s 4 l/min na 10 l/min prosječna širina zone taljenja smanjila se za 2,6 %, iz čega proizlazi kako analizirana promjena protoka helija na korijenskoj strani zavara nije imala značajniji utjecaj na širinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s.

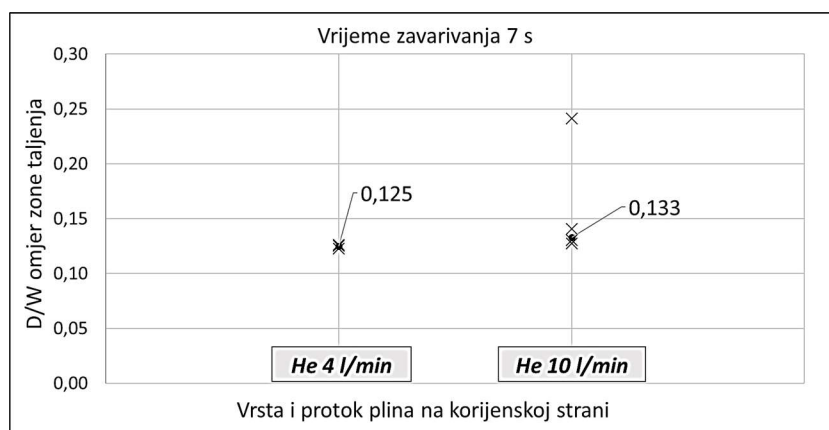
Izmjerene dubine zona taljenja formiranih uz protoke helija od 4 l/min i 10 l/min na korijenskoj strani zavara i vrijeme zavarivanja od 7 s prikazane su na slici 5.38. Ponovljivost stacionarnog TIG procesa obzirom na dubinu zone taljenja kod protoka helija od 4 l/min bila je veoma dobra

obzirom da su se izmjerene vrijednosti nalazile unutar intervala $\pm 2\%$ srednje vrijednosti. Međutim, kod protoka helija od 10 l/min jedan od četiri provedena eksperimenta rezultirao je značajno većom penetracijom (2,58 mm) u odnosu na ostale, što je i vidljivo na prikazanom dijagramu. Zabilježena pojava narušila je ponovljivost procesa, a mogla bi biti posljedica promjene smjera konvekcije u tekućem metalu uslijed lokalnog odstupanja sadržaja površinskih aktivnih elemenata (S, O, Se) u čeliku 316L [61]. Zbog velikog odstupanja od ostalih vrijednosti ova dubina zone taljenja nije razmatrana u izračunu srednje vrijednosti. Stoga prosječna penetracija za protok helija od 10 l/min ima sličnu vrijednost kao za protok helija od 4 l/min. Iz navedenog proizlazi kako promjena protoka helija na korijenskoj strani nije značajnije djelovala na dubinu penetracije.



Slika 5.38 Dubine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavora

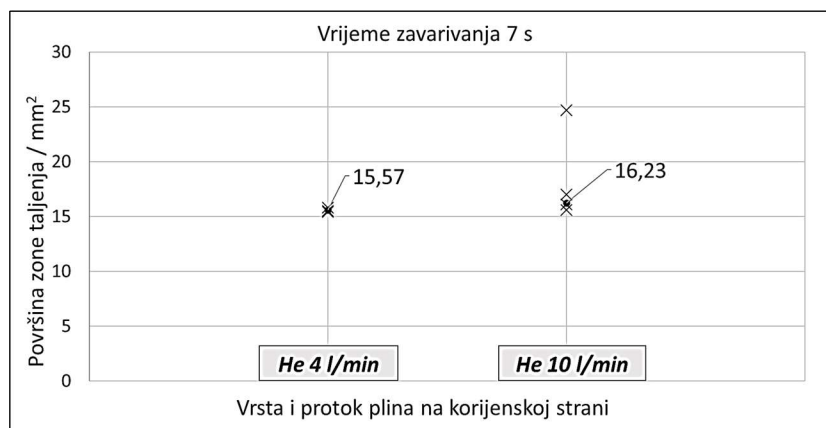
Omjeri dubine i širine zone taljenja (D/W omjer) za vrijeme zavarivanja od 7 s i dva različita protoka helija na korijenskoj strani zavora izračunati su i prikazani na slici 5.39. Iz rezultata je vidljivo je da se prosječna vrijednost D/W omjera zone taljenja s povećanjem protoka helija nije značajnije promijenila (smanjenje od 6,4 %) uz napomenu kako je iz izračuna izostavljen jedan eksperiment proveden pod protokom helija od 10 l/min zbog toga što je značajno odstupio od ostala tri.



Slika 5.39 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavora

Izmjerene vrijednosti površina poprečnog presjeka zona taljenja i pripadne srednje vrijednosti za različite protoke helija na korijenskoj strani zavora i vrijeme zavarivanja od 7 s prikazani su na slici 5.40. Rezultati također ukazuju da povećanje protoka helija s 4 l/min na 10 l/min nije

značajno utjecalo na prosječnu površinu zone taljenja. Povećanje površine je iznosilo 4,2 % uz napomenu kako je iz izračuna srednje vrijednosti izbačen jedan eksperiment proveden uz protok helija od 10 l/min koji je značajno odstupio od preostala tri.

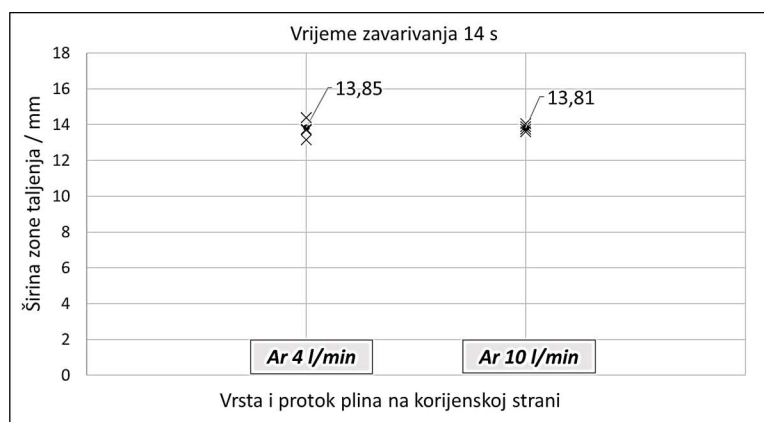


Slika 5.40 Površine poprečnog presjeka zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavora

Za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s nije zabilježen utjecaj promjene protoka helija s korijenske strane zavora na dimenzije zone taljenja uz napomenu da je iz analize izostavljen jedan od uzoraka koji je iskazao značajnu veću penetraciju u odnosu na ostale. Ponovljivost procesa obzirom na širinu, dubinu i površinu zone taljenja bila je zadovoljavajuća.

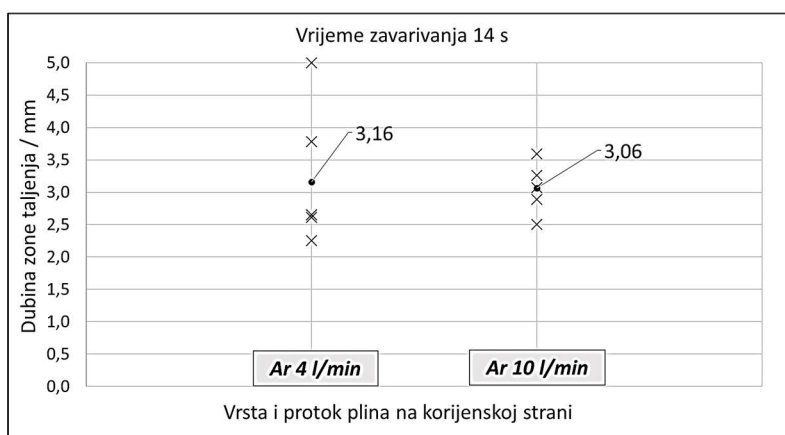
5.2.3 Vrijeme zavarivanja 14 s - zaštita korijenske strane argonom

Izmjerene vrijednosti širine zone taljenja za dva različita protoka argona s korijenske strane zavora i vrijeme zavarivanja od 14 s vidljive su na slici 5.41. Mjerenja širine zone taljenja se kod protoka argona od 4 l/min nalaze unutar intervala od $\pm 4,5$ % srednje vrijednosti, a kod protoka od 10 l/min unutar intervala od $\pm 1,6$ % što svjedoči o dobroj ponovljivosti stacionarnog TIG procesa obzirom na širinu zone taljenja. Ovo je bio slučaj i za vrijeme zavarivanja od 7 s. Prikazani rezultati ukazuju kako ne postoji značajna razlika između prosječne širine zona taljenja kod promjene protoka argona s 4 l/min na 10 l/min uz vrijeme zavarivanja od 14 s. Promjena prosječne širine zone taljenja bila je manja od 0,3 %.



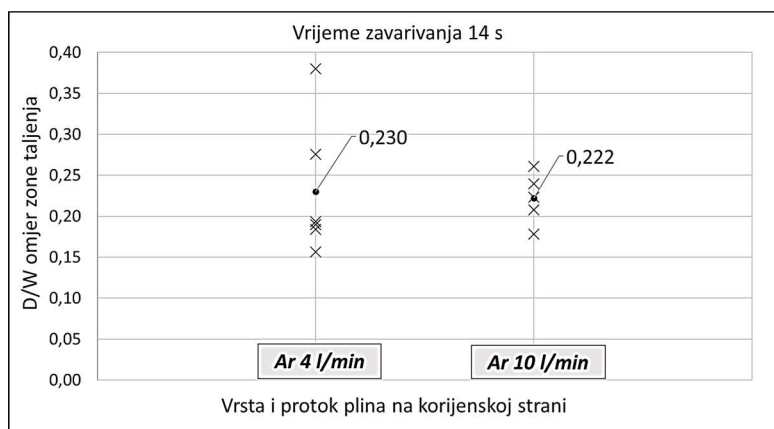
Slika 5.41 Širine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavora

Slika 5.42 prikazuje izmjerene dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 14 s uz dva različita protoka argona na korijenskoj strani zavora. Izmjerene dubine zone taljenja za eksperimentalne kategorije nalaze su u rasponu od $\pm 43,6\%$ (Ar 4 l/min) i $\pm 17,8\%$ (Ar 10 l/min). Ponovljivost procesa obzirom na dubinu zone taljenja znatno je lošija u odnosu na vrijeme zavarivanja od 7 s. Ovo je donekle očekivano obzirom na veću količinu taline i jačanje konvektivne komponente prijenosa topline u tekućem metalu (veći Pe broj). Poznato je kako na konvekciju tekućeg metala snažno djeluju veoma male količine (ppm) površinskih aktivnih elementa čiji udio u osnovnom metalu može lokalno varirati [85]. Povećanje protoka argona s 4 l/min na 10 l/min rezultiralo je smanjenjem prosječne dubine penetracije za 3,2 %. Iako potencijalni razlog može biti intenzivnije odvođenje topline s korijenske strane uzorka kod većeg protoka argona ova vrijednost ne može se smatrati značajnom.



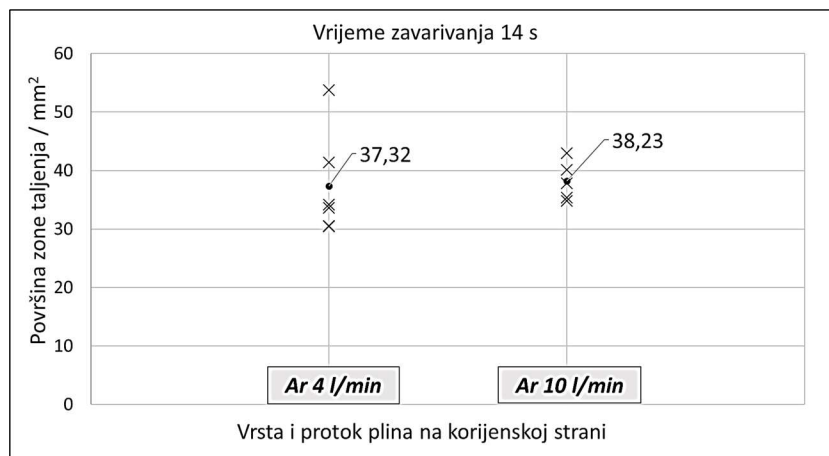
Slika 5.42 Dubine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavora

Omjeri dubine i širine zone taljenja (D/W omjer) za vrijeme zavarivanja od 14 s uz protoke argona od 4 l/min i 10 l/min na korijenskoj strani zavora izračunati su i prikazani na slici 5.43. Kako su izmjerene širine zona taljenja u eksperimentima bile vrlo slične, prikazani odnos plinova na korijenskoj strani zavora i D/W omjera izgleda slično kao odnos s dubinom zone taljenja. Zbog nešto veće dubine penetracije za protoka argona od 4 l/min na korijenskoj strani zavora, i D/W omjer zone taljenja kod ovih eksperimenata veći je za 3,5 % u odnosu na eksperimente provedene uz protok argona od 10 l/min.



Slika 5.43 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavora

Na slici 5.44 prikazane su izmjerene vrijednosti površina poprečnog presjeka zona taljenja i pripadne srednje vrijednosti za dva različita protoka argona na korijenskoj strani stacionarnog TIG zavora i vrijeme zavarivanja od 14 s. Rezultati ukazuju da povećanje protoka argona s korijenske strane zavora nije bitnije utjecalo na površinu poprečnog presjeka zone taljenja. Razlika između prosječnih vrijednosti iznosi 2,4 %.

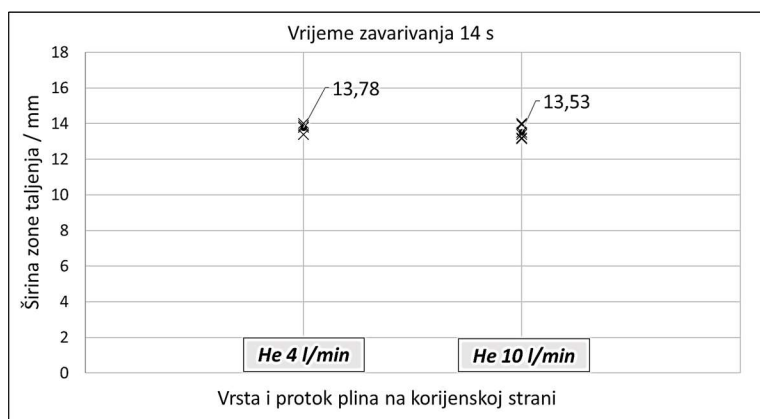


Slika 5.44 Površine poprečnog presjeka zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavora

Za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 14 s nije zabilježen značajan utjecaj promjene protoka argona s korijenske strane zavora na dimenzije zone taljenja. Ponovljivost TIG procesa obzirom na širinu zone taljenja ostala je zadovoljavajuća ali je obzirom na dubinu zone taljenja bila je znatno lošija.

5.2.4 Vrijeme zavarivanja 14 s - zaštita korijenske strane helijem

Na slici 5.45 prikazane su širine zone taljenja i njihove srednje vrijednosti za vrijeme zavarivanja od 14 s uz protoke helija od 4 l/min i 10 l/min s korijenske strane zavora.

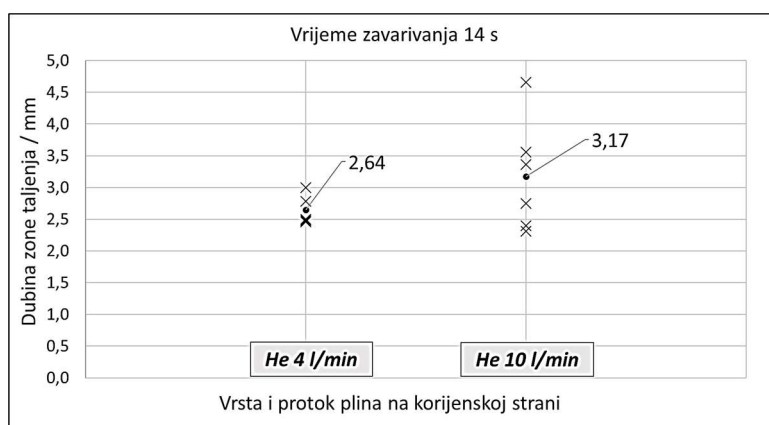


Slika 5.45 Širine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavora

Ponovljivost TIG procesa obzirom na širinu zone taljenja ostala je veoma dobra, kao i za vrijeme zavarivanja od 7 s. Intervali izmjerenih vrijednosti nalaze se u granicama $\pm 2,2$ % srednje vrijednosti (protok helija od 4 l/min) i $\pm 3,1$ % srednje vrijednosti (protok helija od 10 l/min). Mala razlika između srednjih vrijednosti širine zone taljenja (1,8 %) upućuje na

zaključak kako promjena protoka helija na korijenskoj strani zavora nije imala značajniji utjecaj na širinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 14 s. Opisani odnosi širine zone taljenja i protoka helija u skladu su s opažanjima za vrijeme zavarivanja od 7 s.

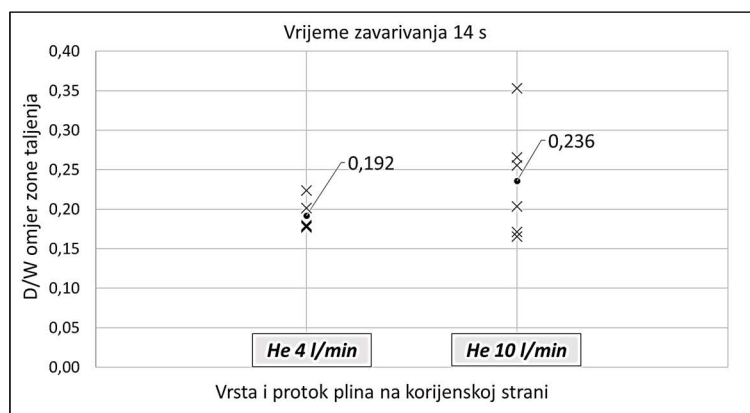
Na slici 5.46 prikazane su izmjerene dubine zone taljenja za dva različita protoka helija (4 l/min i 10 l/min) na korijenskoj strani zavora i vrijeme zavarivanja od 14 s. Ponovljivost stacionarnog TIG procesa obzirom na dubinu zone taljenja kod protoka helija od 4 l/min bila je unutar intervala $\pm 10,2$ % srednje vrijednosti. Kod protoka helija od 10 l/min ponovljivost je bila značajno lošija budući da su se izmjerene dubine zone taljenja nalazile unutar intervala od ± 37 % srednje vrijednosti. Ova pojava bi mogla biti posljedica lokalnog odstupanja u sadržaju površinski aktivnih elemenata (S, O, Se) u osnovnom metalu [61]. Prosječna dubina penetracije s povećanjem protoka helija na 10 l/min s korijenske strane zavora povećala se za 20,1 %.



Slika 5.46 Dubine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavora

Rezultati ukazuju na mogućnost da povećanje protoka helija s 4 l/min na 10 l/min smanjuje intenzitet odvođenja topline s korijenske strane zavora i tako povećava dubinu penetracije. Moguće obrazloženje je da povećani dotok helija (10 l/min u odnosu na 4 l/min) smanjuje njegovu prosječnu temperaturu na korijenskoj strani uzorka zbog čega on iskazuje bolja izolacijska svojstva. Naime, smanjenjem temperature heliju se smanjuje i koeficijent toplinske vodljivosti.

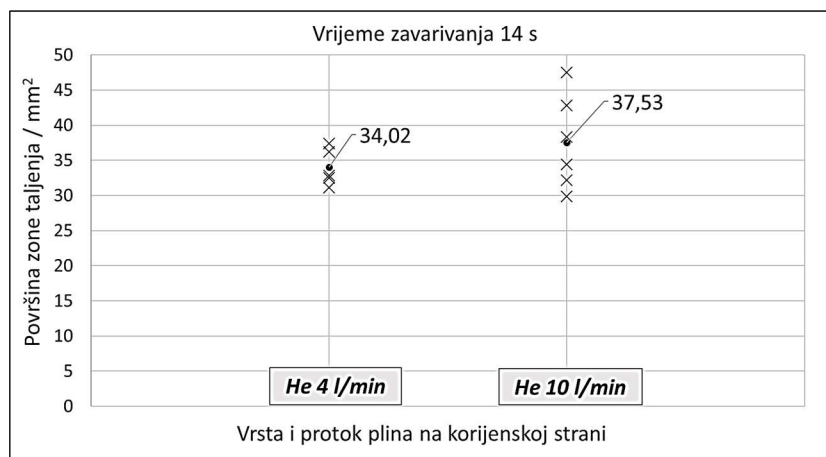
Slika 5.47 prikazuje izračunate karakteristične D/W omjere zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 14 s uz dva različita protoka helija na korijenskoj strani zavora.



Slika 5.47 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavora

Iako D/W omjer proizlazi iz širine i dubine zone taljenja, odnosi između dvije eksperimentalne kategorije određeni su primarno dubinom zone taljenja jer su širine zone taljenja bile podjednake. Rezultati pokazuju kako se prosječna vrijednost D/W omjera zone taljenja povećala za 22,9 % kod povećanja protoka helija s 4 l/min na 10 l/min s korijenske strane zavara.

Slika 5.48 prikazuje izmjerene vrijednosti površina poprečnog presjeka zona taljenja i pripadne srednje vrijednosti za različite protoke helija (4 l/min i 10 l/min) na korijenskoj strani zavara uz vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 14 s. Iz rezultata je vidljivo kako je došlo do povećanja prosječne vrijednosti površine poprečnog presjeka zone taljenja za 10,3 % kad se protoka helija povećao s 4 l/min na 10 l/min.

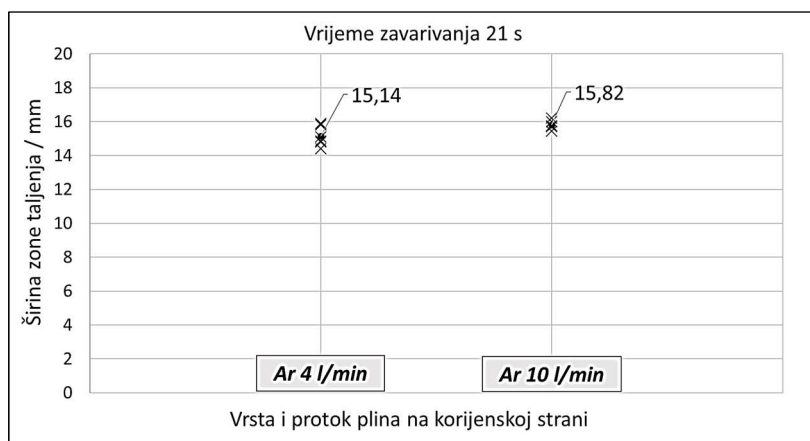


Slika 5.48 Površine poprečnog presjeka zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara

Za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 14 s zabilježeno je povećanje dubine penetracije prilikom povećanja protoka helija s korijenske strane zavara. Moguće objašnjenje je pad prosječne temperature helija uz protok od 10 l/min u odnosu na 4 l/min što smanjuje njegov koeficijent toplinske vodljivosti i tako povećava toplinsku izolaciju na korijenskoj strani uzorka. Ponovljivost TIG procesa obzirom na dubinu zone taljenja bila je znatno lošija od ponovljivosti obzirom na širinu zone taljenja.

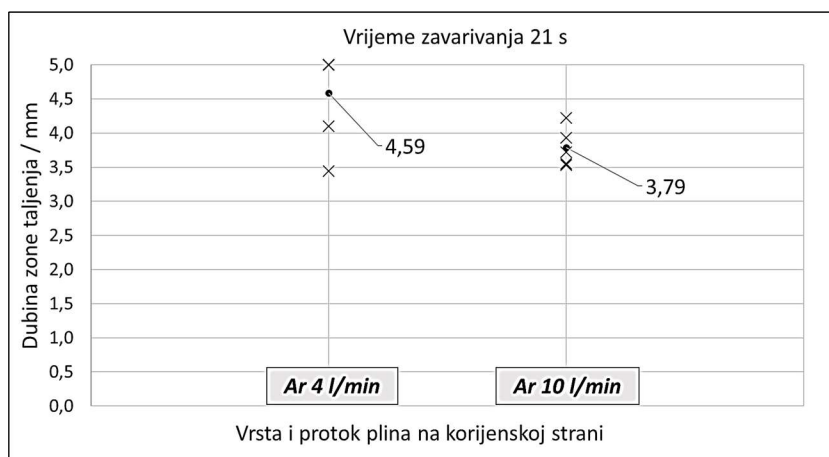
5.2.5 Vrijeme zavarivanja 21 - zaštita korijenske strane argonom

Izmjerene vrijednosti širine zone taljenja za protok argona od 4 l/min i 10 l/min s korijenske strane zavara formiranog tijekom vremena od 21 s prikazane su na slici 5.49. Mjerjenja se kod protoka argona od 4 l/min nalaze unutar intervala od ± 5 % srednje vrijednosti, a kod protoka od 10 l/min unutar intervala od $\pm 2,4$ % srednje vrijednosti. Ovako dobra ponovljivost širine zone taljenja utvrđena je i kod kraćih vremena zavarivanja od 7 s i 14 s. Srednje vrijednosti širine zone taljenja ne razlikuju se značajnije (4,5 %) za protok argona od 4 l/min ili 10 l/min iz čega se može zaključiti kako analizirana promjena protoka s korijenske strane zavara nije bitnije utjecala na širinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s.

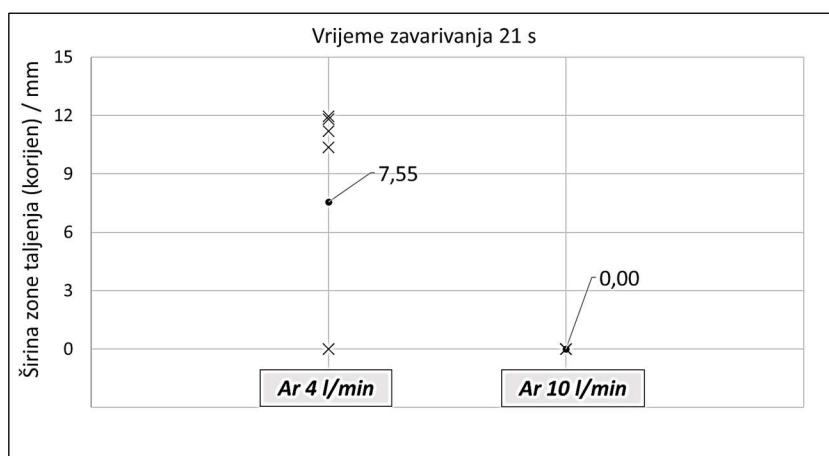


Slika 5.49 Širine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavora

Na slikama 5.50 i 5.51 prikazane su izmjerene dubine zone taljenja i širine zone taljenja s korijenske strane za protoke argona od 4 l/min i 10 l/min s korijenske strane zavora. Vrijeme zavarivanja iznosilo je 21 s.



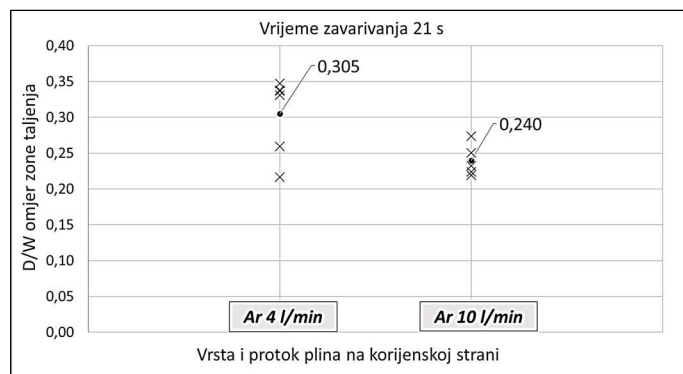
Slika 5.50 Dubine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavora



Slika 5.51 Širine zone taljenja s korijenske strane za različite protoke argona na korijenskoj strani zavora

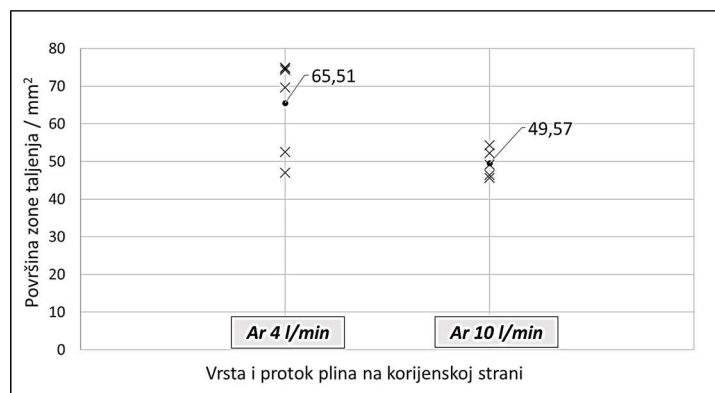
Kod uzoraka kod kojih je došlo do potpune penetracije, usvojena dubina zone taljenja odgovara debljini uzoraka (5 mm), a širina zone taljenja s korijenske strane ima vrijednost veću od nule. Potpuna penetracija ostvarena je kod 4 od 6 uzoraka s manjim protokom argona (4 l/min) na korijenskoj strani zavara. S druge strane, kod pet eksperimenata provedenih uz protok argona od 10 l/min korijenskoj strani zavara, ni jednom nije postignuta potpuna penetracija a njezina prosječna vrijednost iznosila je 3,79 mm. To je 17,4 % manje u odnosu na zone taljenja formirane pod protokom argona od 4 l/min. Može se zaključiti da je povećanje protoka argona na korijenskoj strani smanjivalo dubinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s. Jednak trend ali sa znatno manjim razlikama u dubinama prosječnih zona taljenja zabilježen je za vrijeme zavarivanja od 14 s. Moguće objašnjenje je intenzivnije odvođenje topline na korijenskoj strani uzorka kod protoka argona od 10 l/min u odnosu na 4 l/min što za posljedicu ima manju prosječnu penetraciju.

Omjeri dubine i širine zone taljenja (D/W omjer) za vrijeme zavarivanja od 21 s uz protoke argona od 4 l/min i 10 l/min na korijenskoj strani zavara izračunati su i prikazani na slici 5.52. Kod uzoraka s manjim protokom argona (4 l/min) postignuta je 27,1 % veća prosječna vrijednost D/W omjera u odnosu na uzorke s protokom argona od 10 l/min. Ovo je direktna posljedica veće penetracije za protok argona od 4 l/min budući da su širine zona taljenja bile podjednake.



Slika 5.52 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara

Na slici 5.53 prikazane su izmjerene vrijednosti površina poprečnog presjeka zona taljenja i pripadne srednje vrijednosti za različite protoke argona (4 l/min i 10 l/min) na korijenskoj strani zavara uz vrijeme zavarivanja od 21 s.



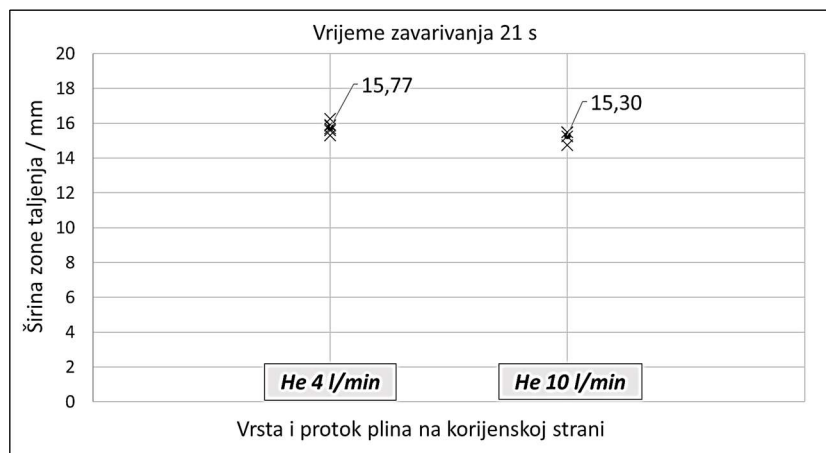
Slika 5.53 Površine zone taljenja za različite protoke argona na korijenskoj strani zavara

Iz rezultata je vidljivo smanjenje prosječne vrijednosti površine poprečnog presjeka zone taljenja od 24,3 % u slučaju povećanja protoka argona s 4 l/min na 10 l/min.

Za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 21 s zabilježeno je smanjenje dubine penetracije prilikom povećanja protoka argona s korijenske strane zavara. Moguće objašnjenje je intenzivnije konvektivno odvođenje topline na korijenskoj strani uzorka kod protoka argona od 10 l/min u odnosu na 4 l/min što za posljedicu ima manju prosječnu penetraciju. Ovo opažanje u suprotnosti je s povećanjem protoka helija koje je rezultiralo smanjenjem prosječne penetracije. Ponovljivost TIG procesa obzirom na dubinu zone taljenja bila je znatno lošija od njegove ponovljivosti obzirom na širinu zone taljenja što je utvrđeno i za kraće vrijeme zavarivanja od 14 s.

5.2.6 Vrijeme zavarivanja 21 s - zaštita korijenske strane helijem

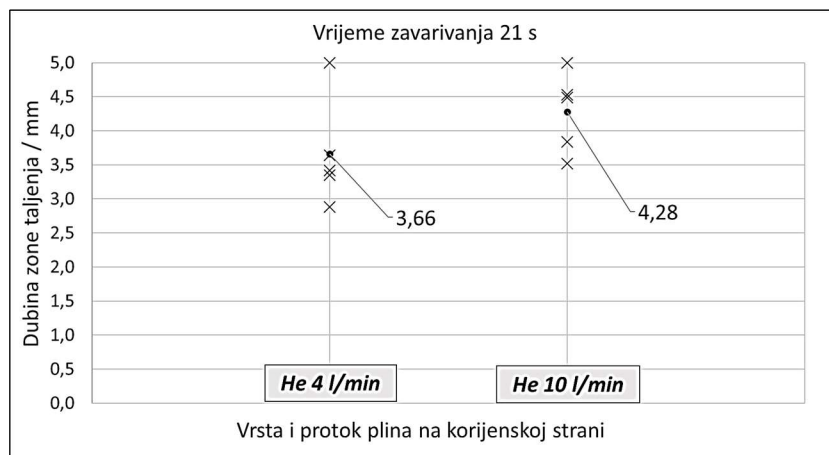
Na slici 5.54 prikazane su širine zone taljenja i njihove srednje vrijednosti za vrijeme zavarivanja od 21 s i protoke helija od 4 l/min i 10 l/min s korijenske strane zavara. Intervali izmjerenih vrijednosti nalaze se u granicama ± 3 % i $\pm 2,5$ % srednje vrijednosti širine zone taljenja za protoke helija od 4 l/min i 10 l/min. Na temelju ovoga može se reći kako je ponovljivost stacionarnog TIG procesa obzirom na širinu zone taljenja ostala relativno dobra, što je bio slučaj za vremena zavarivanja od 7 s i 14 s. Razlika između srednjih vrijednosti širine zone taljenja od približno 3 % upućuje na zaključak kako promjena protoka helija na korijenskoj strani zavara nije imala imala značajniji utjecaj na širinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s. Ovakav zaključak donesen je i za kraća vremena zavarivanja.



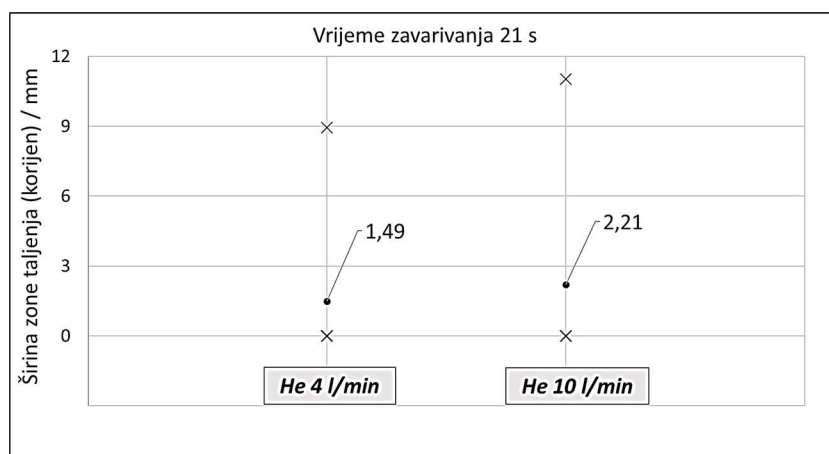
Slika 5.54 Širine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavara

Na slikama 5.55 i 5.56 prikazane su izmjerene dubine zone taljenja i širine zone taljenja s korijenske strane za dva različita protoke helija na korijenskoj strani zavara i vrijeme zavarivanja od 21 s. Kod uzoraka kod kojih je došlo do potpune penetracije, usvojena je dubina zone taljenja koja odgovara debljini uzorka (5 mm), a širina zone taljenja s korijenske strane ima vrijednost veću od nule. Može se vidjeti da je potpuna penetracija ostvarena u jednom eksperimentu s manjim protokom helija (4 l/min) na korijenskoj strani zavara, a prosječna penetracija iznosila je 3,66 mm. Kod eksperimenata provedenih uz protok helija od 10 l/min na korijenskoj strani prosječna vrijednost dubine zone bila je 16,9 % veća (4,28 mm), a u jednom od eksperimenata također je postignuta potpuna penetracija. Može se zaključiti da je povećanje protoka helija na korijenskoj strani povećalo dubinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s. Ovaj tvrdnja u skladu je s nalazom za vrijeme zavarivanja od 14 s. Moguće objašnjenje

ostaje isto: povećanje protoka helija s 4 l/min na 10 l/min smanjuje njegovu prosječnu temperaturu na korijenskoj strani zavora i tako poboljšava njegova izolacijska svojstva (smanjuje njegovu toplinsku vodljivost). Bolja izolacija korijenske strane zavora povećava dubinu penetracije.

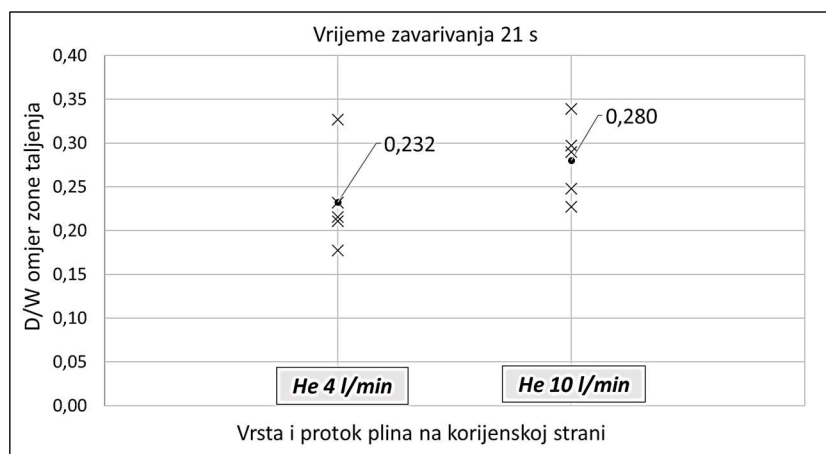


Slika 5.55 Dubine zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavora



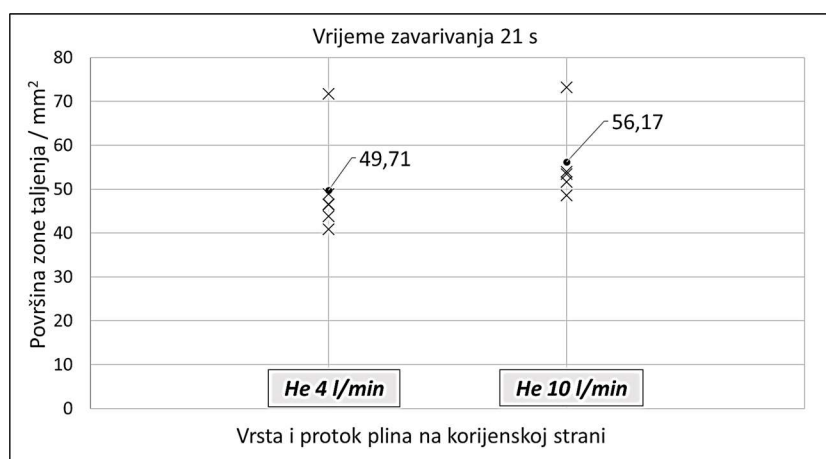
Slika 5.56 Širine zone taljenja s korijenske strane za različite protoke helija na korijenskoj strani zavora

Budući da provedeni eksperimenti imaju sličnu širinu zone taljenja, razlika u njezinoj dubini odrazila se na D/W omjer zone taljenja, slika 5.57. Tako je postignut 20,7 % veći prosječan D/W omjer zone taljenja za eksperimente koji su provedeni pod protokom helija od 10 l/min na korijenskoj strani zavora u odnosu na eksperimente s protokom helija od 4 l/min.



Slika 5.57 D/W omjeri zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavora

Slika 5.58 prikazuje izmjerene vrijednosti površina poprečnog presjeka zona taljenja i njihove srednje vrijednosti za dva različita protoka helija (4 l/min i 10 l/min) na korijenskoj strani zavora uz vrijeme zavarivanja od 21 s. Iz rezultata je vidljivo kako je došlo do povećanja prosječne vrijednosti površine poprečnog presjeka zone taljenja za 13 % kad se protok helija povećao s 4 l/min na 10 l/min.



Slika 5.58 Površine poprečnog presjeka zone taljenja za različite protoke helija na korijenskoj strani zavora

Za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 21 s zabilježeno je povećanje dubine penetracije prilikom povećanja protoka helija s korijenske strane zavora. Isto zapažanje uočeno je za vrijeme zavarivanja od 14 s. Ovi rezultati u suprotnosti su s rezultatima dobivenim za povećanje protoka argona na korijenskoj strani zavora, a vjerojatno su posljedica znatno drugačijih fizikalnih svojstava dvaju plinova. Ponovljivost TIG procesa obzirom na dubinu zone taljenja bila je znatno lošija od ponovljivosti obzirom na širinu zone taljenja, slično je uočeno za vrijeme zavarivanja od 14 s.

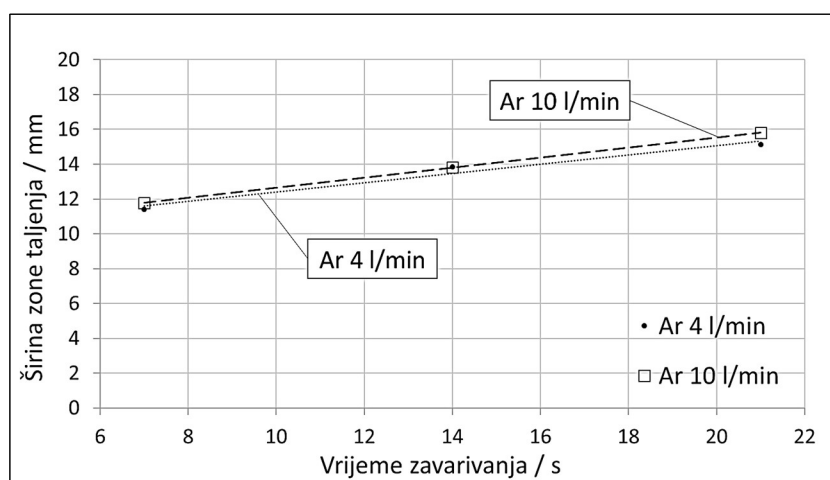
5.2.7 Vremenska evolucija zone taljenja

Na slikama 5.59, 5.60 i u tablici 5.1 su prikazane vremenske promjene širine zone taljenja za različite prototke helija i argona na korijenskoj strani zavora. Iz rezultata je vidljivo kako

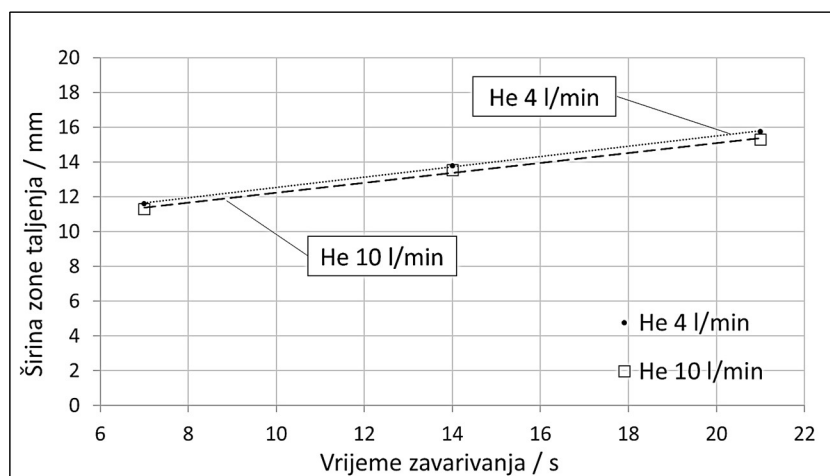
analizirana promjena protoka helija i argona (4 l/min i 10 l/min) nije značajnije utjecala na prosječnu širinu zone taljenja (W). Pravci koji na dijagramima opisuju vremensku promjenu širine zone taljenja praktički se preklapaju što ukazuje kako je vremensko povećanje širine zone taljenja u intervalu vremena zavarivanja (WT) od 7 s do 14 s imalo veoma sličnu dinamiku bez obzira na protok plina na korijenskoj strani zavara.

Tablica 5.1 Prosječne širine zone taljenja (mm) za različite protoke argona i helija

Plin i protok	Vrijeme zavarivanja			Jednadžba	Broj jednadžbe
	7 s	14 s	21 s		
Ar 4 l/min	11,42	13,85	15,14	$W = 0,27 \cdot WT + 9,74$	5.10
Ar 10 l/min	11,78	13,81	15,82	$W = 0,29 \cdot WT + 9,77$	5.11
He 4 l/min	11,62	13,78	15,77	$W = 0,30 \cdot WT + 9,57$	5.12
He 10 l/min	11,32	13,53	15,30	$W = 0,28 \cdot WT + 9,40$	5.13



Slika 5.59 Promjena širine zone taljenja, korijenska strana zavara štice argonom



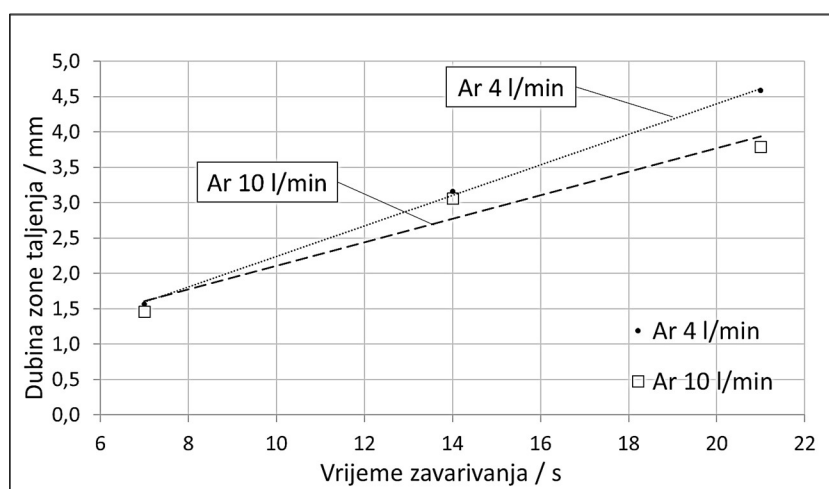
Slika 5.60 Promjena širine zone taljenja, korijenska strana zavara štice helijem

Izračunate prosječne dubine zone taljenja (D) za zaštitu korijenske strane zavara argonom i helijem te tri vremena zavarivanja (WT) vidljive su u tablici 5.2. Rezultati su grafički prikazani na slikama 5.61 i 5.62. Pravci koji opisuju vremensku promjenu dubine zone taljenja u promatranom intervalu (od 7 s do 14 s) ukazuju kako se ona brže povećava u slučaju zaštite

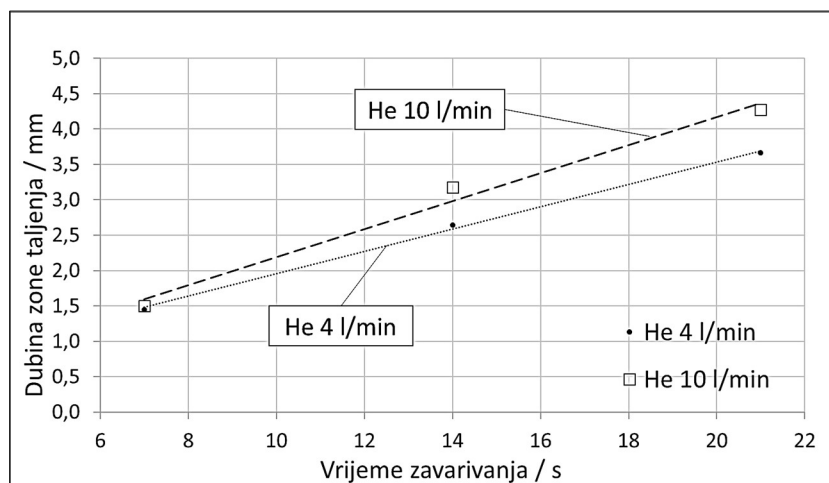
korijenske strane argonom protoka 4 l/min (0,22 mm/s) u odnosu na protok argona od 10 l/min (0,17 mm/s). U slučaju zaštite korijenske strane helijem zabilježen je suprotan trend: prosječna dubina zone taljenja povećavala se brže ukoliko je korišten protok helija od 10 l/min (0,20 mm/s) u odnosu na protok helija od 4 l/min (0,16 mm/s). Razlika u dinamici povećanja penetracija za argon i helij posljedica je bitno drugačijih fizikalnih svojstava dvaju plinova koja utječu na intenzitet prijenosa topline na korijenskoj strani zavara.

Tablica 5.2 Prosječne dubine zone taljenja (mm) za različite protoke argona i helija

Plin i protok	Vrijeme zavarivanja			Jednadžba	Broj jednadžbe
	7 s	14 s	21 s		
Ar 4 l/min	1,56	3,16	4,59	$D = 0,22 \cdot WT + 0,08$	5.14
Ar 10 l/min	1,46	3,06	3,79	$D = 0,17 \cdot WT + 0,45$	5.15
He 4 l/min	1,45	2,64	3,66	$D = 0,16 \cdot WT + 0,37$	5.16
He 10 l/min	1,50	3,17	4,28	$D = 0,20 \cdot WT + 0,21$	5.17



Slika 5.61 Promjena dubine zone taljenja, korijenska strana zavara štice argonom



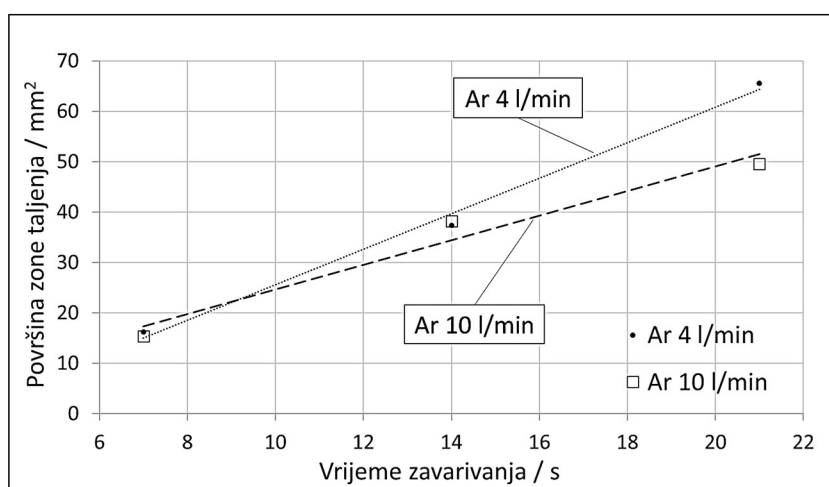
Slika 5.62 Promjena dubine zone taljenja, korijenska strana zavara štice helijem

Vrijednosti prosječne površine poprečnog presjeka zone taljenja (FZA) za različite protoke helija i argona na korijenskoj strani zavara te različita vremena zavarivanja (WT) navedene su u tablici 5.3. Rezultati su prikazani i grafički na slikama 5.63 i 5.64. U slučaju promjene protoka

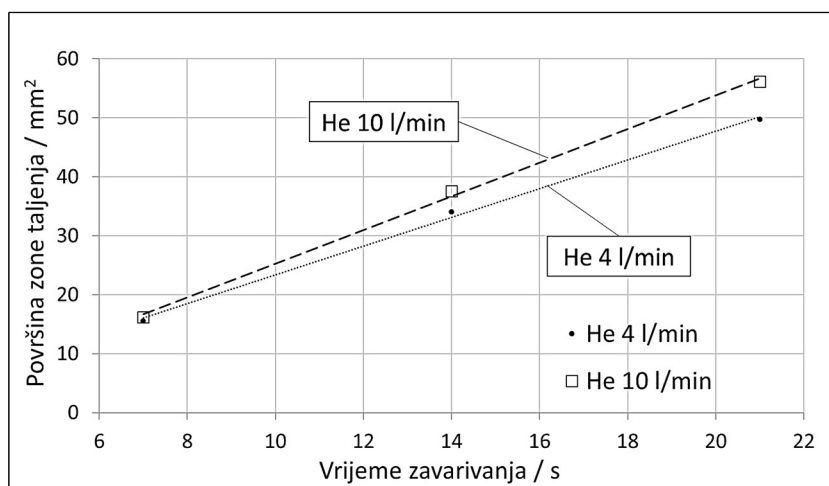
argona na korijenskoj strani zavora može se uočiti brži rast površine zone taljenja kod protoka od 4 l/min ($3,71 \text{ mm}^2/\text{s}$) u odnosu na protok od 10 l/min ($2,45 \text{ mm}^2/\text{s}$). Kod zaštite korijenske strane helijem, ovaj odnos se promijenio. Porast prosječne površine zone taljenja bio je nešto veći kod protoka helija od 10 l/min ($2,85 \text{ mm}^2/\text{s}$) u odnosu na protok od 4 l/min ($2,45 \text{ mm}^2/\text{s}$).

Tablica 5.3 Prosječne površine zone taljenja (mm^2) za različite protoke argona i helija

Plin i protok	Vrijeme zavarivanja			Jednadžba	Broj jednadžbe
	7 s	14 s	21 s		
Ar 4 l/min	16,22	37,32	65,51	$FZA = 2,52 \cdot WT - 9,61$	5.18
Ar 10 l/min	15,34	38,23	49,57	$FZA = 2,45 \cdot WT + 0,15$	5.19
He 4 l/min	15,57	34,02	49,71	$FZA = 2,44 \cdot WT - 1,04$	5.20
He 10 l/min	16,23	37,53	56,17	$FZA = 2,85 \cdot WT - 3,30$	5.21



Slika 5.63 Promjena površine zone taljenja, korijenska strana zavora štice argonom



Slika 5.64 Promjena površine zone taljenja, korijenska strana zavora štice helijem

Za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s i 14 s promjena protoka argona s korijenske strane zavora nije pokazala bitniji utjecaj na dimenzije rezultirajuće zone taljenja. Za vrijeme zavarivanja od 21 s povećanje protoka argona s 4 l/min na 10 l/min rezultiralo je smanjenjem dubine penetracije i D/W omjera. Povećanje protoka helija s korijenske strane zavora uz vrijeme zavarivanja od 7 s također nije utjecalo na dimenzije zone taljenja. Međutim, za vremena

zavarivanja od 14 s i 21 s povećanje protoka helija rezultiralo je povećanjem dubine penetracije i D/W omjera zone taljenja. Suprotno djelovanje promjene protoka argona i helija na korijenskoj strani zavara na penetraciju i D/W omjer vjerojatno je posljedica bitno drugačijih fizikalnih svojstava ovih plinova i njihovog utjecaja na prijenos topline s uzorka. Ponovljivost stacionarnog TIG procesa obzirom na dubinu zone taljenja značajno je narušena produženjem vremena zavarivanja sa 7 s na 14 s i 21 s. Ponovljivost procesa obzirom na širinu zone taljenja bila je veoma dobra, bez obzira na vrijeme zavarivanja.

5.3 Utjecaj stanja površine osnovnog metala na dimenzije zone taljenja

Uzorci od austenitnog nehrđajućeg čelika 316L dimenzija 100 mm x 100 mm x 5 mm korišteni u ovome istraživanju izrezani su iz poluproizvoda u obliku trake široke 100 mm. Traka je proizvedena valjanjem u vrućem stanju, a proizvodni postupak kojem je podvrgnuta utjecao je na stanje njezine površine, odnosno debljinu oksidnog sloja formiranog na površini i površinsku hrapavost. U ovome djelu istraživanja analiziran je utjecaj stanja površine uzoraka od nehrđajućeg čelika 316L na dimenzije zone taljenja kod stacionarnog TIG zavarivanja. Istraživanje je provedeno za vrijeme zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s, a uspoređene su dimenzije zone taljenja formirane pod jednakim zavarivačkim parametrima na uzorcima s različitim stanjem površine svrstanim u tri eksperimentalne kategorije:

- *ZRAK-NBG-NBD* - uzorci kojima je gornja i donja strana ostala u izvornom stanju,
- *ZRAK-BG-NBD* - uzorci kojima je brušena samo gornja strana,
- *ZRAK-BG-BD* - uzorci kojima je brušena gornja i donja strana.

U svim provedenim eksperimentima korijenska strana zavara bila je izložena atmosferi tj. zraku, odnosno nije korišten zaštitni plin.

5.3.1 Vrijeme zavarivanja 7 s

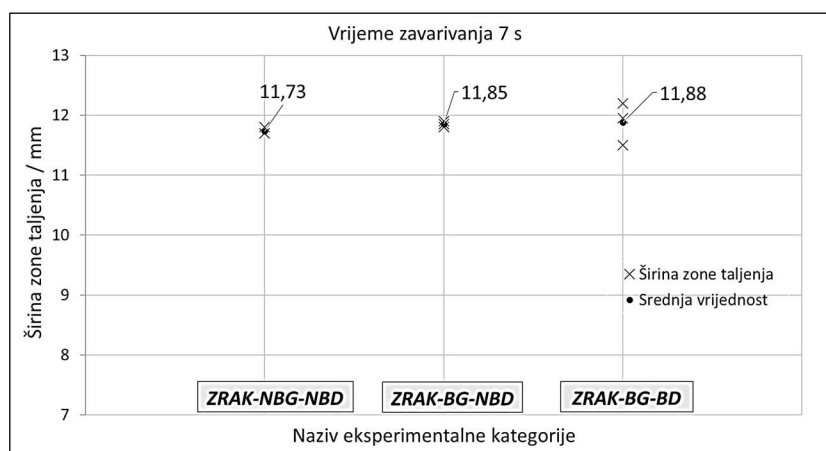
Na slici 5.65 usporedno su prikazane tri odabrane fotografije zona taljenja za uzorke s različitim stanjima površine formirane tijekom vremena zavarivanja od 7 s. Može se vidjeti kako su zone taljenja nastale pod utjecajem stacionarnog autogenog TIG zavarivanja imale približno sličan oblik i veličinu bez obzira na stanje površine uzorka što je i potvrđeno provedenim mjerenjima analiziranim u nastavku.



Slika 5.65 Zona taljenja za uzorke s površinom u a) izvornom stanju, b) brušenom gornjom stranom i c) brušenom gornjom i donjom stranom; vrijeme zavarivanja 7 s

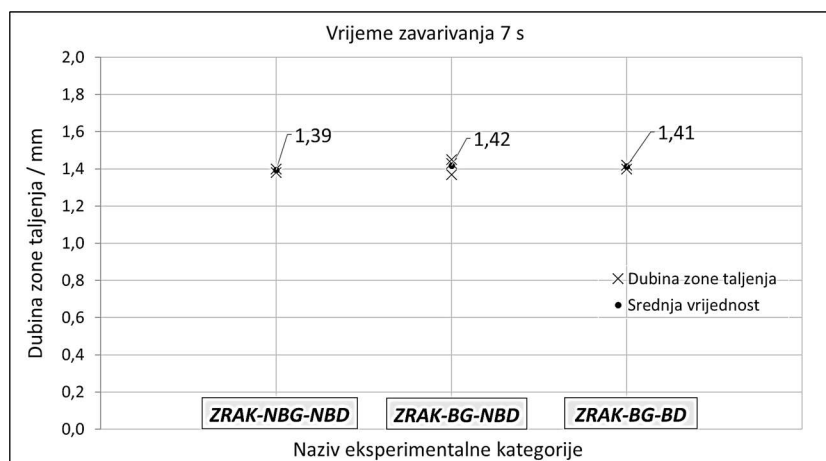
Na slici 5.66 su prikazani rezultati mjerenja širine zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima za uzorke čija površina prije zavarivanja u trajanju od 7 s nije brušena (kategorija *ZRAK-NBG-NBD*), uzorke kojima je brušena samo gornja strana (kategorija *ZRAK-BG-NBD*) te uzorke kojima je brušena gornja i donja strana (kategorija *ZRAK-BG-BD*). Relativno mala odstupanja unutar svake od kategorija ukazuju na dobru ponovljivost TIG procesa obzirom na rezultirajuću širinu zone taljenja: maksimalni raspon pojavljuje se u kategoriji

ZRAK-BG-BD ali iznosi svega 0,7 mm te se nalazi unutar ± 3 % prosječne vrijednosti. Vidljivo je kako provedeno brušenje površine uzoraka nije imalo utjecaja na širinu zone taljenja: prosječne vrijednosti izračunate za svaku od eksperimentalnih kategorija neznatno se razlikuju.



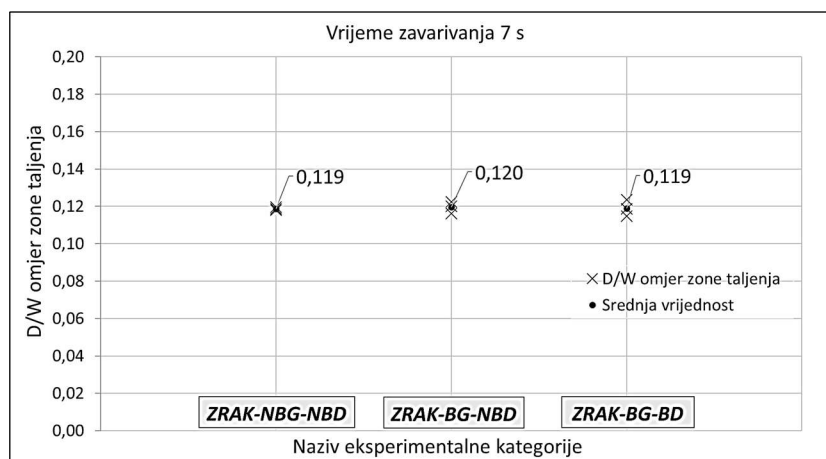
Slika 5.66 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 7 s

Dubine zone taljenja i izračunate srednje vrijednosti za uzorke s različitim stanjima gornje i donje površine uz vrijeme zavarivanja od 7 s prikazane su na slici 5.67. Vidljiva je dobra ponovljivost TIG procesa obzirom na relativno mala odstupanja u dubini penetracija unutar svake od eksperimentalnih kategorija. Razlike u srednjim vrijednostima među kategorijama veoma su male iz čega proizlazi kako provedeno brušenja gornje, odnosno donje strane uzoraka nije imalo značajniji utjecaj na penetraciju.



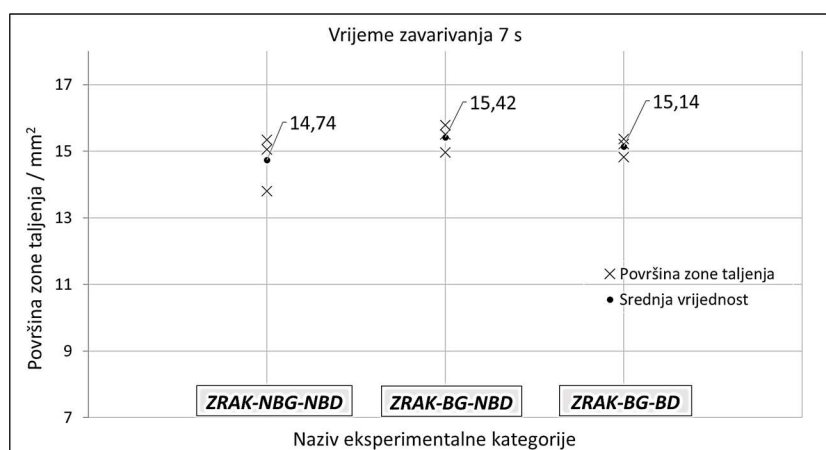
Slika 5.67 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 7 s

Omjer dubine i širine zone taljenja za uzorke s različitim tretmanima donje i gornje površine i vrijeme zavarivanja od 7 s prikazan je na slici 5.68. Iz dijagrama je vidljivo da se D/W omjer zone taljenja nije značajnije mijenjao bez obzira jesu li površine uzorka ostavljene u izvornom stanju ili su kontrolirano brušene. Ovakav rezultat je očekivan obzirom da D/W omjer direktno proizlazi iz širine i dubine penetracije na koje brušenje nije imalo utjecaj.



Slika 5.68 D/W omjeri zone taljenja i njihove srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 7 s

Izmjerene površine poprečnog presjeka zone taljenja prikazane su na slici 5.69. Iz rezultata je očito kako provedeno brušenje gornje i donje površine uzoraka nije imalo bitan utjecaj na površinu zone taljenja: sve tri srednje vrijednosti nalaze su u rasponu od $\pm 2,25$ %. Nešto veća rasipanja unutar eksperimentalnih kategorija posljedica su osjetljivosti ove mjere na slučajne pogreške tijekom mjerenja.



Slika 5.69 Površine poprečnog presjeka zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima, vrijeme zavarivanja 7 s

Za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s nije zabilježen utjecaj stanja površine nehrđajućeg austenitnog čelika 316L na karakteristične dimenzije zona taljenja. Prosječne vrijednosti širine i dubine zone taljenja te njezine površine u poprečnom presjeku nisu se bitnije promijenile bez obzira jesu li površine uzorka podvrgnute postupku kontroliranog brušenja ili su ostavljene u izvornom stanju. Ponovljivost TIG procesa obzirom na dubinu i širinu zone taljenja bila je veoma dobra.

5.3.2 Vrijeme zavarivanja 14 s

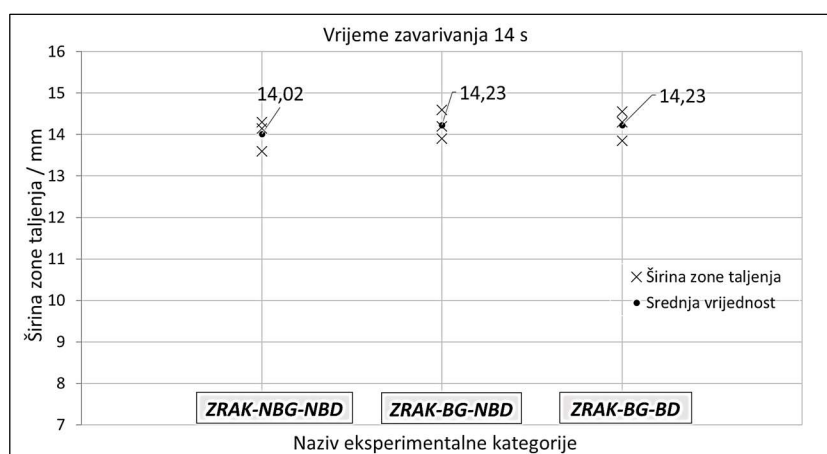
Na slici 5.70 prikazane su tri odabrane fotografije poprečnog presjeka zone taljenja za uzorke s različitim stanjima površine i vrijeme zavarivanja od 14 s. Razvijena makrostruktura ne ukazuje na značajnije razlike u dimenzijama i obliku zona taljenja nastalih pod djelovanjem TIG

zavarivanja sa stacionarnim električnim lukom, što je i potvrđeno kroz provedena mjerenja analizirana u nastavku ovog podpoglavlja.



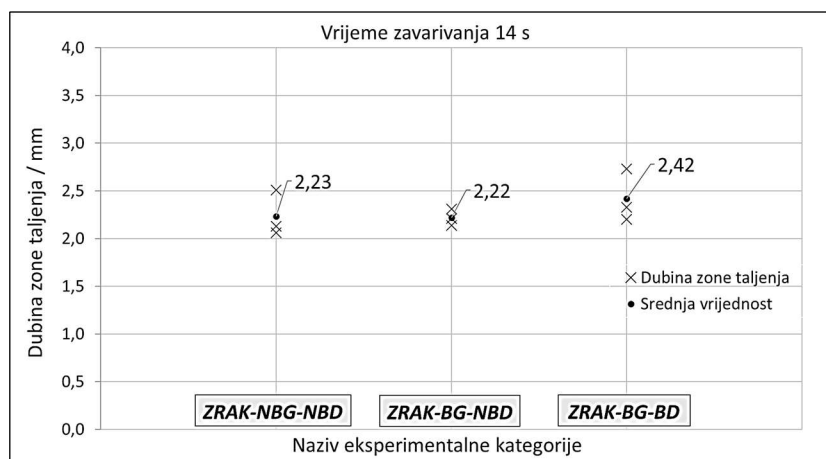
Slika 5.70 Zona taljenja za uzorke s površinom a) u izvornom stanju, b) s brušenom gornjom stranom i c) s brušenom gornjom i donjom stranom; vrijeme zavarivanja 14 s

Utjecaj kontroliranog brušenja površine uzoraka na širinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 14 s uz prisutstvo zraka na korijenskoj strani zavara prikazan je na slici 5.71. Vidljivo je kako se prosječna širina zone taljenja za uzorke čija je površina ostavljena u izvornom stanju (kategorija ZRAK-NBG-NBD; 14,02 mm) nije bitnije promijenila ukoliko je gornja površina uzorka bila brušena (kategorija ZRAK-BG-NBD; 14,23 mm) ili ukoliko su i gornja i donja površina uzorka bile brušene (kategorija ZRAK-BG-BD; 14,23 mm). Relativno mala odstupanja u mjerenjima unutar eksperimentalnih kategorija ukazuju na dobru ponovljivost stacionarnog TIG procesa obzirom na rezultirajuću širinu zone taljenja.



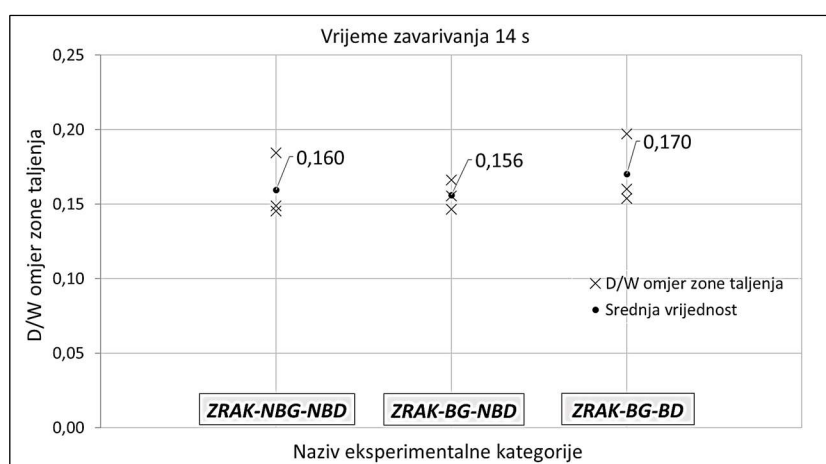
Slika 5.71 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 14 s

Na slici 5.72 prikazane su izmjerene vrijednosti dubine zone taljenja za devet eksperimenata raspoređenih u tri različite kategorije obzirom na tretman površine uzoraka uz vrijeme zavarivanja od 14 s. Može se uočiti kako ne postoji veliko odstupanje između kategorija: srednje vrijednosti nalaze se unutar raspona od $\pm 4,3$ %. Ovo upućuje na zaključak kako provedena brušenja gornje (kategorija ZRAK-BG-NBD), odnosno gornje i donje (kategorija ZRAK-BG-BD) površine uzorka nisu imala utjecaja na dubinu penetracije u usporedbi s uzorcima kojima je površina ostala u izvornom stanju (kategorija ZRAK-NBG-NBD). Treba primjetiti i nešto veća rasipanja dubine zone taljenja unutar eksperimentalnih kategorija. Ovo može biti povezano s lokalnim odstupanjima u kemijskom sastavu osnovnog metala tj. količini prisutnih površinskih aktivnih elemenata koji utječu na smjer i intenzitet konvektivnog prijenosa toplina u tekućem metalu.



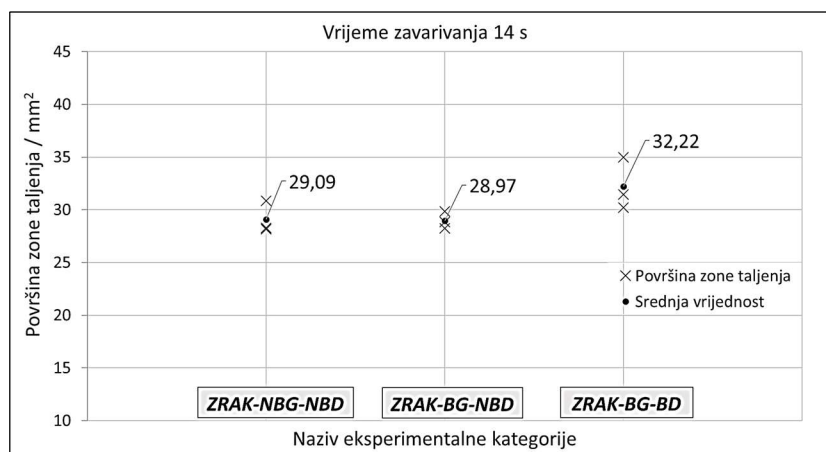
Slika 5.72 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 14 s

Izračunati D/W omjer zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti za eksperimente provedene u cilju analize utjecaja stanja površine osnovnog metala na zonu taljenja uz vrijeme zavarivanja od 14 s prikazani su na slici 5.73. Rezultati ukazuju kako provedena brušenja uzoraka nisu imala značajniji utjecaj na D/W omjer, odnosno oblik zone taljenja: odstupanja srednjih vrijednosti između tri kategorije su manja od $\pm 5\%$. Ovo je i očekivano obzirom da brušenje također nije utjecalo na širinu i dubinu zone taljenja iz kojih D/W omjer proizlazi.



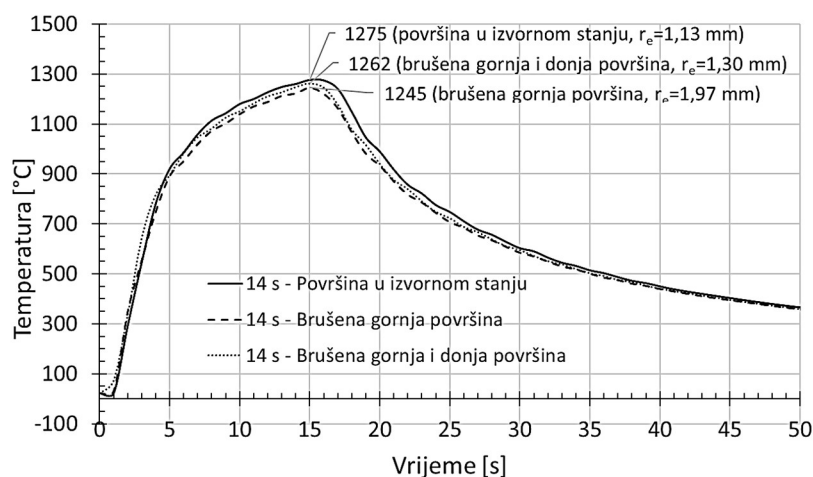
Slika 5.73 D/W omjeri zone taljenja s njihove srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 14 s

Površine poprečnog presjeka zone taljenja i njihove srednje vrijednosti za tri eksperimentalne kategorije prikazane su na slici 5.74. Uzorci kojima je brušena gornja strana (kategorija ZRAK-BG-NBD) iskazali su slične vrijednosti kao i uzorci ostavljeni u izvornom stanju (kategorija ZRAK-NBG-NBD). Iako je prosječna površina zone taljenja za uzroke čija je gornja i donja strana podvrgnuta kontroliranom brušenju (kategorija ZRAK-BG-BD) nešto veća ($32,22 \text{ mm}^2$) ova razlika iznosi oko 9% i ne može se smatrati značajnom.



Slika 5.74 Površine poprečnog presjeka zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima, vrijeme zavarivanja 14 s

Na slici 5.75 prikazana su tri toplinska ciklusa uzrokovana djelovanjem električnog luka stacionarnog TIG zavarivanja na uzorke u trajanju od 14 s. Mjerenja su provedena na uzorcima s različitim stanjima površine, a mjereno mjesto se nalazilo na sredini donje (korijenske) strane uzorka. Budući da je zavarivanje termoparova provedeno ručno u pravilu je dolazilo do manjeg odstupanja mjernog mjesta od idealne centralne pozicije. Ova odstupanja su izmjerena i navedena uz svako od mjerenja pod oznakom r_e . Maksimalna temperatura postignuta je neposredno nakon gašenja električnog luka, a iznosila je 1275 °C za uzorak čija je površina ostavljena u izvornom stanju, 1245 °C za uzorak kojem je brušena samo gornja površina i 1262 °C za uzorak kojem je brušena gornja i donja površina. Raspon navedenih temperatura (svega 30 °C) relativno je malen i može se zaključiti kako provedeno brušenje gornje i donje površine uzorka nije imalo utjecaja na izmjerene toplinske cikluse. Ova tvrdnja je u skladu sa zaključkom kako provedeno brušenje površina nije imalo utjecaja na dimenzije zone taljenja.



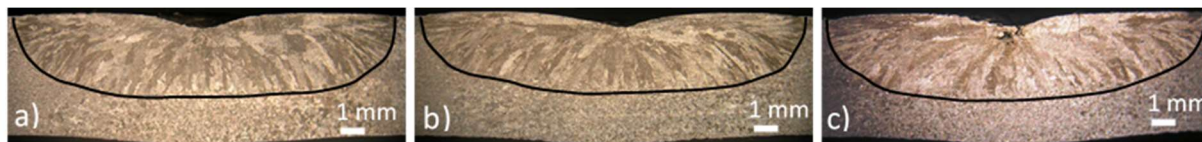
Slika 5.75 Toplinski ciklusi na sredini donje strane uzorka za tri različita stanja površine, vrijeme zavarivanja 14 s

Stanje površine nehrđajućeg austenitnog čelika 316L nije imalo utjecaj na karakteristične dimenzije zona taljenja za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 14 s. Isti zaključak izveden je za vrijeme zavarivanja od 7 s. Širina i dubina zone taljenja nisu se značajnije promijenile bez obzira jesu li površine uzorka brušene ili ostavljene u izvornom stanju. Ponovljivost TIG

procesa obzirom na širinu zone taljenja bila je veoma dobra ali se ponovljivost obzirom na dubinu zone taljenja pogoršala u odnosu na vrijeme zavarivanja od 7 s.

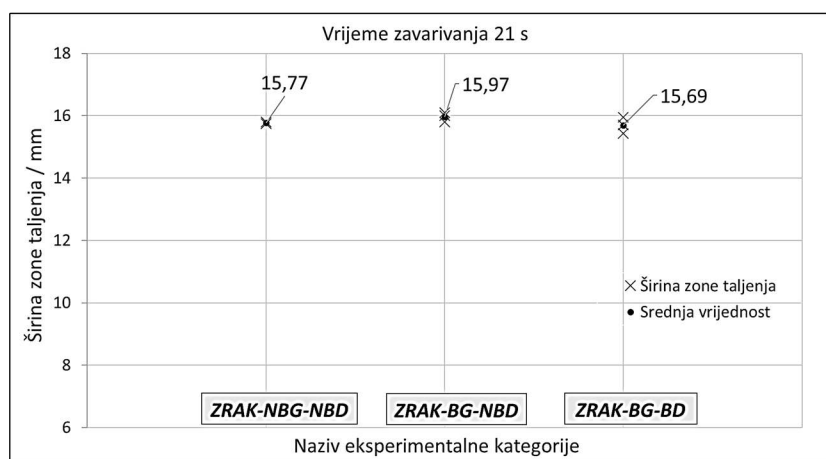
5.3.3 Vrijeme zavarivanja 21 s

Na slici 5.76 prikazane su tri odabrane fotografije makrostrukture poprečnog presjeka zone taljenja formirane na uzorcima s različitim stanjima površine. Može se vidjeti da se oblik i dimenzije zone taljenja nastale pod stacionarnim TIG zavarivanjem vidljivo ne razlikuju što je i potvrđeno detaljnim mjerenjima i analizom provedenom u nastavku ovog podpoglavlja.



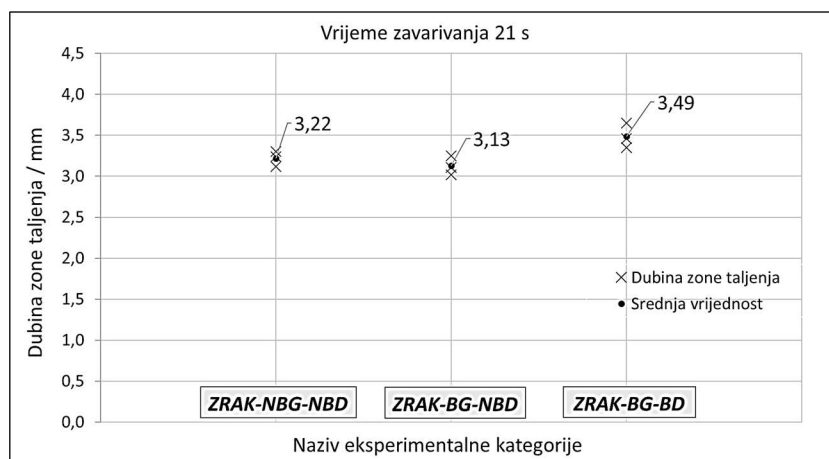
Slika 5.76 Zona taljenja za uzorke s površinom u a) izvornom stanju, b) brušenom gornjom stranom i c) brušenom gornjom i donjom stranom; vrijeme zavarivanja 21 s

Izmjerene širine zona taljenja i pripadne srednje vrijednosti za uzorke čija je površina ostavljena u izvornom stanju (kategorija ZRAK-NBG-NBD), uzorke čija je gornja površina kontrolirano brušena (kategorija ZRAK-BG-NBD) te uzorke čija je gornja i donja površina kontrolirano brušena (kategorija ZRAK-BG-BD) prikazane su na slici 5.77. Iz rezultata je očito kako stanje površine uzoraka nije imalo značajniji utjecaj na širinu zona taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s. Odstupanja izmjerenih vrijednosti unutar eksperimentalnih kategorija su mala (maksimalno $\pm 0,26$ mm, kategorija ZRAK-BG-BD) što ukazuje na odličnu ponovljivost stacionarnog TIG zavarivanja obzirom na širinu zone taljenja.



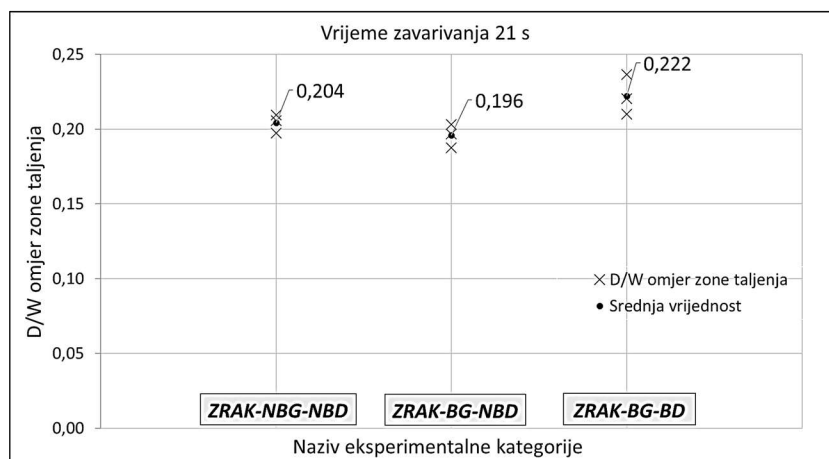
Slika 5.77 Širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 21 s

Izmjerene dubine zona taljenja formiranih na uzorcima s različitim stanjima površine za vrijeme zavarivanja od 21 prikazane su na slici 5.78. Upoređujući izračunate srednje vrijednosti može se primjetiti kako kontrolirano brušenje gornje strane uzorka (srednja vrijednost 3,31 mm) nije rezultiralo bitno drugačijom penetracijom u odnosu na uzorke čija je površina ostavljena u izvornom stanju (srednja vrijednost 3,22 mm). Srednja vrijednost penetracije za uzorke čija su gornja i donja površina kontrolirano brušene (3,49 mm) veća je za približno 8 % ali ova razlika vjerojatno je posljedica rasipanja i ne može se smatrati značajnom.



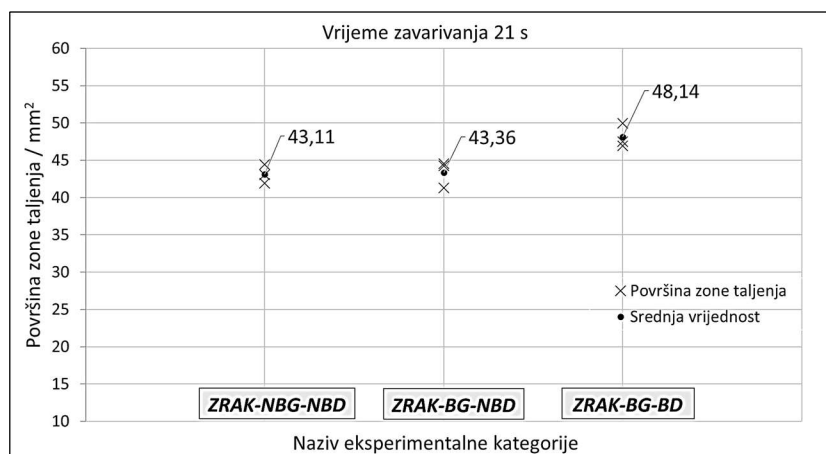
Slika 5.78 Dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 21 s

Odnos dubine i širine zone taljenja, odnosno njihov D/W omjer za tri eksperimentalne kategorije i vrijeme zavarivanja od 21 s vidljiv je na slici 5.79. Ovaj jednostavni pokazatelj oblika zone taljenja iznosio je približno 0,204 za uzorke kojima je gornja i donja površina ostavljena u izvornom stanju. Kod uzoraka na kojima je provedeno brušenje samo gornje površine D/W omjer zone taljenja ostao je praktički jednak (0,196). Nešto veći D/W omjer (0,222) izračunat je za uzorke kojima su brušene gornja i donja površina ali ova razlika ne može se smatrati značajnom.



Slika 5.79 D/W omjeri zone taljenja i njihove srednje vrijednosti, vrijeme zavarivanja 21 s

Izmjerene površine poprečnih presjeka zona taljenja i pripadne srednje vrijednosti raspoređene u tri eksperimentalne kategorije obzirom na stanje površine uzoraka prikazane su na slici 5.80. Srednja vrijednost površine poprečnog presjeka zone taljenja nije se binije promjenila ukoliko je uzorcima brušena gornja površina ($43,36 \text{ mm}^2$) u odnosu na uzorke kojima je površina ostavljena u izvornom stanju ($43,11 \text{ mm}^2$). Malo veća srednja vrijednost izmjerenih površina za uzorke kojima je kontrolirano brušena gornja i donja površina ($48,14 \text{ mm}^2$) posljedica je nešto dublje prosječne penetracije u ovoj eksperimentalnoj kategoriji. Međutim, ova razlika nije uzrokovana stanjem površine uzorka nego je vjerojatno posljedica manjih odstupanja u dubini penetracije za zone taljenja nastale pod jednakim zavarivačkim parametrima.



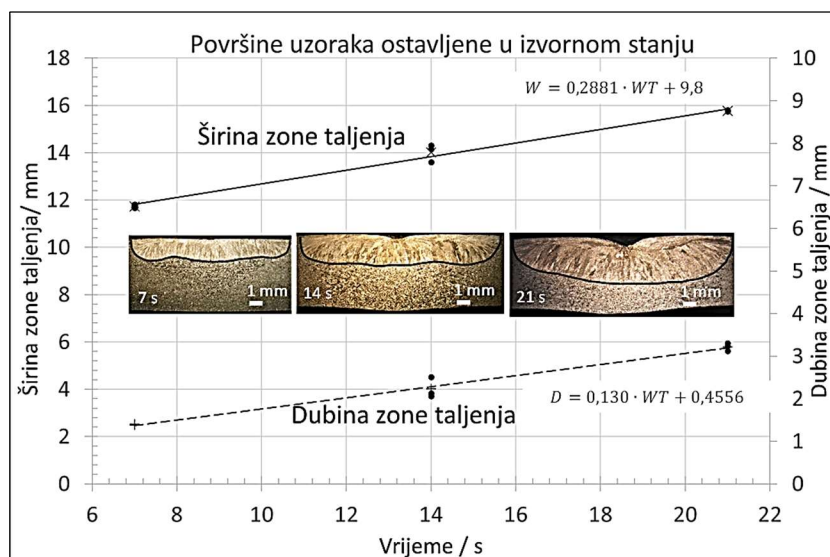
Slika 5.80 Površine poprečnog presjeka zone taljenja s pripadnim srednjim vrijednostima, vrijeme zavarivanja 21 s

Stanje površine nehrđajućeg austenitnog čelika 316L nije imalo utjecaj na dimenzije zona taljenja za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 21 s. Isto zapažanje uočeno je za kraća vremena zavarivanja od 7 s i 14 s. Zone taljenja na uzorcima čija je površina ostavljena u izvornom stanju nisu se razlikovale od zona taljenja formiranih na uzorcima čije su površine podvrgnute kontroliranom brušenju. Ponovljivost TIG procesa obzirom na širinu zone taljenja ostala je veoma dobra ali se ponovljivost obzirom na dubinu zone taljenja pogoršala u odnosu na vrijeme zavarivanja od 7 s.

5.3.4 Vremenska evolucija zone taljenja

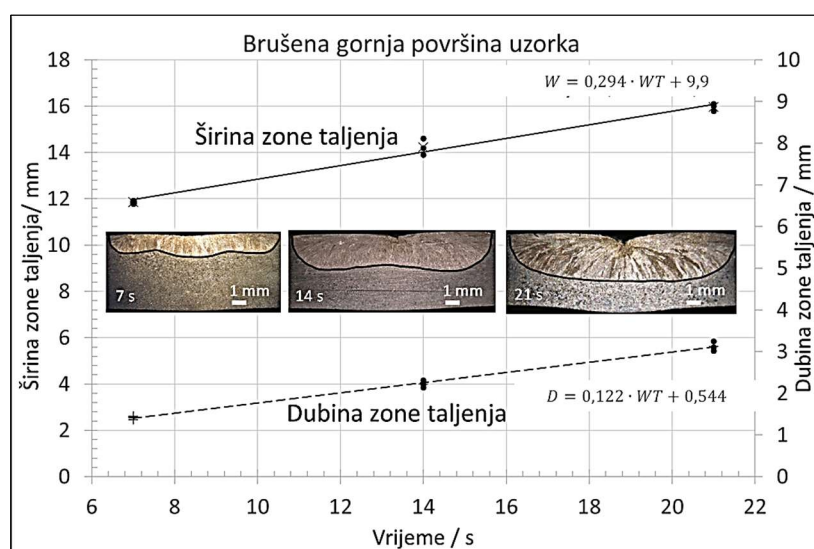
U ovome podpoglavlju analizirana je vremenska promjena karakterističnih dimenzija zone taljenja za uzorke s tri različita stanja površine: površina uzorka ostavljena u izvornom stanju, brušena gornja površina uzorka i brušena gornja i donja površina uzorka. Eksperimenti provedeni za vremena zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s pružaju dobar uvid u dinamiku širenja zone taljenja u promatranom vremenskom okviru.

Na slici 5.81 prikazana je promjena širine (W) i dubine (D) zone taljenja za uzorke čija površina nije podvrgnuta kontroliranom brušenju nego je ostavljena u izvornome stanju. Širina zone taljenja povećala se s prosječne vrijednosti od 11,73 mm za vrijeme zavarivanja (WT) od 7 s do prosječne vrijednosti od 15,77 mm za vrijeme zavarivanja od 21 s. Prosječna brzina rasta širine zone taljenja u intervalu od 7 s do 21 s iznosila je 0,29 mm/s što je značajno manje u odnosu na interval od 0 s do 7 s gdje je iznosila 1,68 mm/s. Dubina zone taljenja povećala se s prosječne vrijednosti od 1,39 mm (7 s) do prosječne vrijednosti od 3,22 mm (21 s). Iz ovoga proizlazi i prosječna brzina povećanja penetracije od 0,13 mm/s u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s što je također manje u odnosu na brzinu penetracije u intervalu od 0 s do 7 s od 0,20 mm/s. U dijagramu je vidljivo i da se opisane vremenske evolucije širine i dubine zone taljenja u intervalu zavarivanja od 7 s do 21 s mogu dobro opisati linearnim jednadžbama.



Slika 5.81 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, površine uzoraka u izvornom stanju

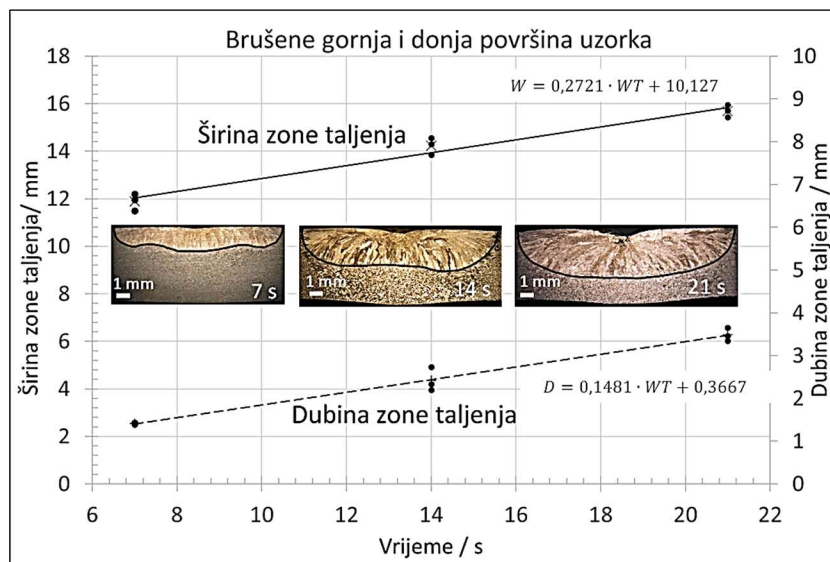
Vremenska evolucija širine (W) i dubine (D) zone taljenja za uzorke kojim je brušena samo gornja površina prikazana je na slici 5.82. Širina zone taljenja u intervalu od 7 s do 21 s povećavala se prosječnom brzinom od 0,29 mm/s što je uzrokovalo njezin rast od 4,12 mm (prosječna širina povećala se s 11,85 mm na 15,97 mm). Prosječno povećanje širine do sedme sekunde bilo je znatno brže i iznosilo je 1,69 mm/s. Povećanje dubine zone taljenja bilo je značajno sporije: prosječna penetracije povećala se s vrijednosti od 1,42 mm (7 s) na vrijednost 3,13 mm (21 s). Ovo povećanje od 1,72 mm tijekom 14 s definira prosječnu brzinu povećanja penetracije od 0,12 mm/s. Može se napomenuti kako je prosječna brzina povećanja penetracije do 7 s bila veća i iznosila 0,2 mm/s. Povećanje širine i dubine zone taljenja u funkciji vremena zavarivanja (WT) dobro opisuju u dijagramima navedene linearne jednadžbe.



Slika 5.82 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, brušena gornja površina uzorka

Promjena širine (W) i dubine (D) zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s za uzorke kojima su prije zavarivanja brušene gornja i donja površina prikazana je na slici 5.83. Obje

promjene u funkciji vremena zavarivanja (WT) opisane su jednadžbama pravaca navedenim u dijagramu. Prosječna brzina rasta širine zone taljenja iznosila je 0,27 mm/s što je rezultiralo povećanjem širine s 11,88 mm (7 s) na 15,69 mm (21 s) kroz vremenski period od 14 s. Širina zone taljenja povećavala se znatno brže u intervalu od 0 s do 7 s i iznosila je 1,7 mm/s. Dubina zone taljenja se u vremenskom periodu od 7 s do 21 s povećavala brzinom od 0,15 mm/s od prosječne vrijednosti 1,41 mm (7 s) do 3,49 mm (21 s). S druge strane, penetracija se od početka zavarivanja do 7 s povećavala brže, brzinom koja je iznosila prosječno 0,2 mm/s.



Slika 5.83 Promjena širine i dubine zone taljenja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s, brušena gornja i donja površina uzorka

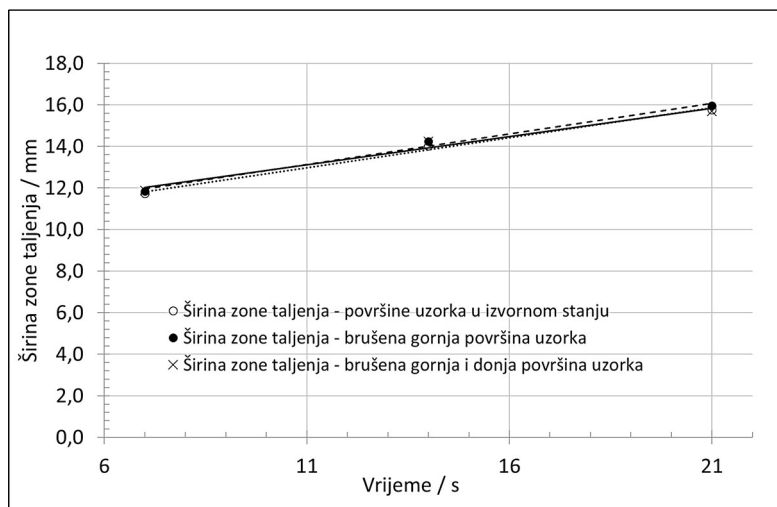
U tablici 5.4 prikazane su spomenute linearne jednadžbe koje opisuju vremensku evoluciju širine (W) i dubine (D) zona taljenja u ovisnosti o tri različita stanja površine za analizirani vremenski interval zavarivanja od 7 s do 21 s. Pregledom jednadžbi uočava se kako su koeficijenti koje sadrže veoma slični. Ovo znači da se vremenska promjena širine i dubine zone taljenja nije značajnije mijenjala ukoliko je uzorcima brušena gornja i donja površina u odnosu na uzorke čija je površina ostavljena u izvornom stanju. Očekivano, ovaka tvrdnja je u skladu s analizama provedenim za svako vrijeme zavarivanja pojedinačno.

Tablica 5.4 Vremenske promjene širine i dubine zone taljenja ovisno o stanju površine uzorka

Stanje površine	Širina zone taljenja (W)	Broj jednadžbe
Izvorno stanje	$W = 0,281 \cdot WT + 9,806$	5.22
Brušena gornja strana uzorka	$W = 0,294 \cdot WT + 9,900$	5.23
Brušena gornja i donja strana uzorka	$W = 0,272 \cdot WT + 10,127$	5.24
	Dubina zone taljenja (D)	Broj jednadžbe
Izvorno stanje	$D = 0,131 \cdot WT + 0,456$	5.25
Brušena gornja strana uzorka	$D = 0,122 \cdot WT + 0,544$	5.26
Brušena gornja i donja strana uzorka	$D = 0,148 \cdot WT + 0,367$	5.27

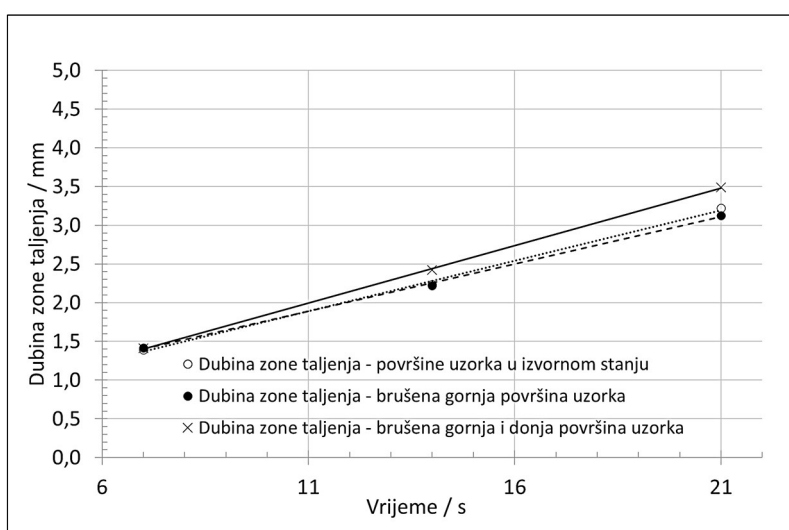
U dijagramu na slici 5.84 zbirno su prikazane srednje vrijednosti širine zona taljenja za uzorke s tri različita stanja površine i tri analizirana vremena djelovanja električnog luka na uzorke. U

ovakvom prikazu jasno je vidljivo da su širine zona taljenja formiranih za vrijeme zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s bile neovisne o tome da li su površine uzoraka ostavljene u izvornom stanju ili su gornja i donja strana podvrgnute kontroliranom brušenju. Zbog navedenog se i pravci kojima je opisana promjena širine zone taljenja u funkciji vremena praktički preklapaju.



Slika 5.84 Vremenska evolucija širine zone taljenja za uzorke s različitim stanjima površine

Prosječne dubine zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s kod uzoraka s različitim stanjima površine prikazane su na slici 5.85. Na dijagramu su vidljivi i pravci koji opisuju vremensku evoluciju dubine zone taljenja za tri analizirana slučaja. Može se zaključiti kako brušenje gornje površine uzorka nije rezultiralo promjenom dubine zone taljenja u odnosu na uzorke kojim je površina ostavljena u izvornom stanju. Pravci koji pripadaju ovim dvjema eksperimentalnim kategorijama usko se preklapaju kroz cijeli vremenski interval. Kod uzoraka kojima su kontrolirano brušene gornja i donja površina izmjerena je nešto veća penetracija za vrijeme zavarivanja od 14 s i 21 s, što se očituje i kroz povećani nagib pravca koji pripada ovoj eksperimentalnoj kategoriji. Međutim, ovo povećanje iznosilo je 9 % i 8 % te se ne može smatrati značajnim.

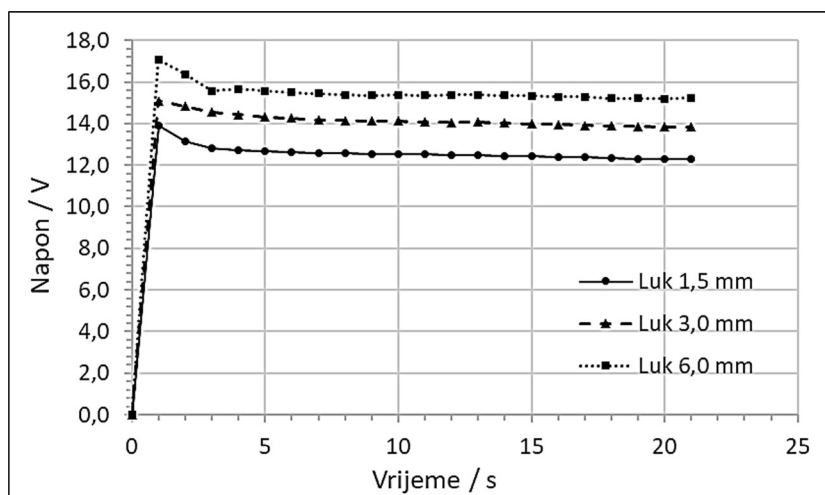


Slika 5.85 Vremenska evolucija dubine zone taljenja za uzorke s različitim stanjima površine

Eksperimenti provedeni za vremena stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s pokazali su kako stanje površine austenitnog nehrđajućeg čelika nije imalo bitniji utjecaj na širinu, dubinu i površinu zone taljenja u poprečnom presjeku. Naravno, isto vrijedi i za D/W omjer zone taljenja koji proizlazi direktno iz njezine dubine i širine. Izmjerene dimenzije zona taljenja nisu se značajnije razlikovale bez obzira jesu li formirane na uzorcima čije su površine ostavljene u izvornom stanju ili su kontrolirano brušene. Ponovljivost stacionarnog TIG procesa obzirom na širinu zone taljenja bila je zadovoljavajuća, bez obzira na vrijeme zavarivanja. Ponovljivost obzirom na dubinu penetracije pogoršala se za dulja vremena zavarivanja (14 s i 21 s).

5.4 Utjecaj duljine električnog luka na dimenzije zone taljenja

Duljina električnog luka ima složeno djelovanje na zonu taljenja budući da njezina promjena utječe na brzinu strujanja plazme u luku, veličinu anodne površine na osnovnom metalu, iskoristivost električnog luka i pad napona kroz stupac luka [15]. U nastavku ovog podpoglavlja analiziran je utjecaj duljine električnog luka kod stacionarnog TIG zavarivanja na karakteristične dimenzije zone taljenja: njezinu širinu, dubinu i površinu u poprečnom presjeku. Analizirane duljine električnog luka iznose 1,5 mm, 3 mm, i 6 mm. Eksperimenti su provedeni za tri različita vremena zavarivanja: 7 s, 14 s i 21 s. Gornja i donja površina svih uzoraka je neposredno prije zavarivanja obrađena sukladno planu brušenja, a zatim odmašćena. Zaštitni plin na korijenskoj strani uzoraka nije korišten, odnosno korijenska strana zavara bila je izložena zraku. Pad napona za tri električna luka različite duljine tijekom stacionarnog TIG zavarivanja od 21 s prikazana su na slici 5.86. Očekivano, povećanjem duljine električnog luka povećavao se i pad napona kroz luk: za duljinu luka od 1,5 mm iznosio je prosječnih 12,6 V, za duljinu luka od 3 mm prosječnih 14,2 V, a za duljinu luka od 6 mm prosječnih 15,5 V.

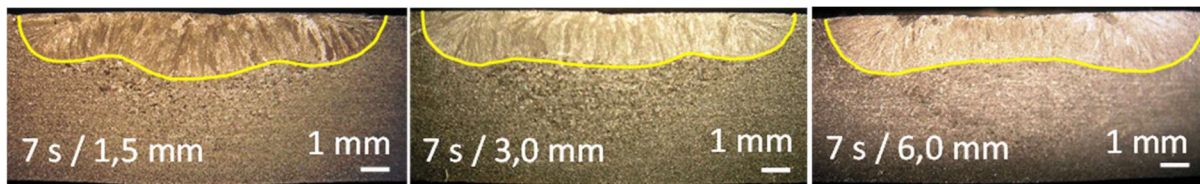


Slika 5.86 Pad napona u električnom luku duljine 1,5 mm, 3 mm i 6 mm

5.4.1 Vrijeme zavarivanja 7 s

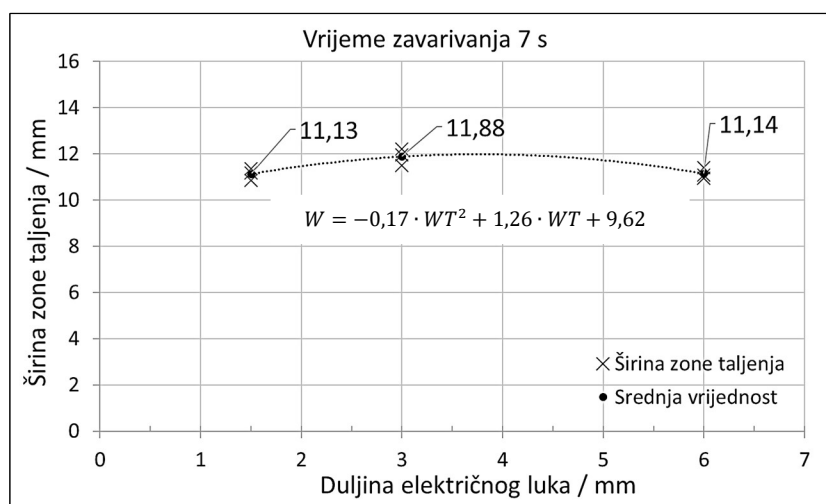
Tri odabrana profila penetracije za duljine električnog luka od 1,5 mm, 3 mm i 6 mm prikazane su na slici 5.87. Zone taljenja imaju približno sličnu širinu. Međutim, iz fotografija je vidljivo kako se penetracija na sredini zone taljenja povećava kod kraćeg električnog luka. Ovo povećanje može biti uzrokovano povećanjem gustoće električnog toka (A/mm^2) na osnovnom metalu uslijed smanjenja anodne površine na kojoj luk djeluje. To rezultira snažnijom

elektromagnetskom silom u talini koja pregrijani tekući metal transportira prema dnu zone taljenja povećavajući tako dubinu penetracije. Povećanjem duljine električnog luka lokacija maksimalne penetracije premješta se bliže rubu zone taljenja. U tom slučaju zona taljenja poprima oblik karakterističan za nehrđajuće čelike s malim udjelom sumpora u kemijskom sastavu. U talini dominira prijenos topline Marangonijevom konvekcijom koja transportira tekući metal od sredine prema rubu taline.



Slika 5.87 Zone taljenja za tri različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 7 s

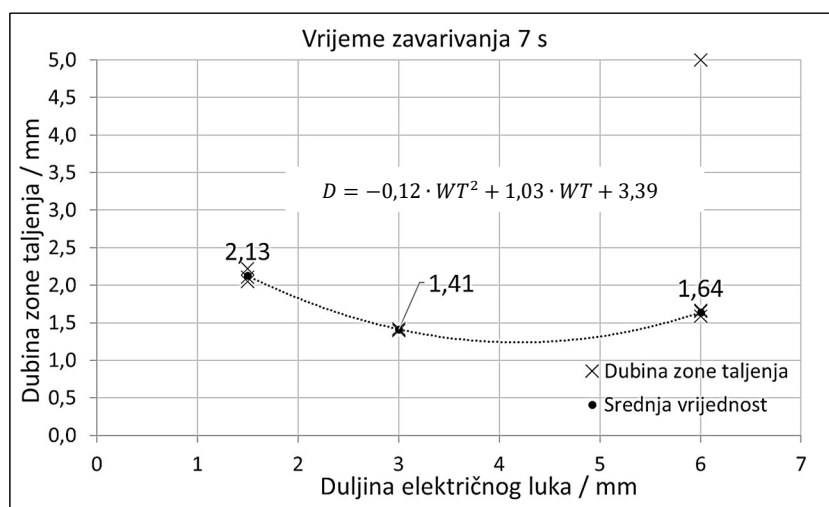
Na slici 5.88 prikazane su izmjerene širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti u funkciji duljine električnog luka. Ponovljivost procesa obzirom na širinu zone taljenja bila je veoma dobra što se očituje kroz relativno mala odstupanja u izmjerenim širinama zona taljenja formiranim pod jednakim duljinama električnog luka. Povećanjem duljine luka s 1,5 mm na 3 mm prosječna širina zone taljenja povećala se za 6,7 %. Daljnjim povećanjem duljine luka s 3 mm na 6 mm prosječna vrijednost se smanjila za 6,2 %. Navedene promjene nisu značajne i može se smatrati kako promjena duljine električnog luka nije snažno utjecala na širinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s.



Slika 5.88 Širina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 7 s

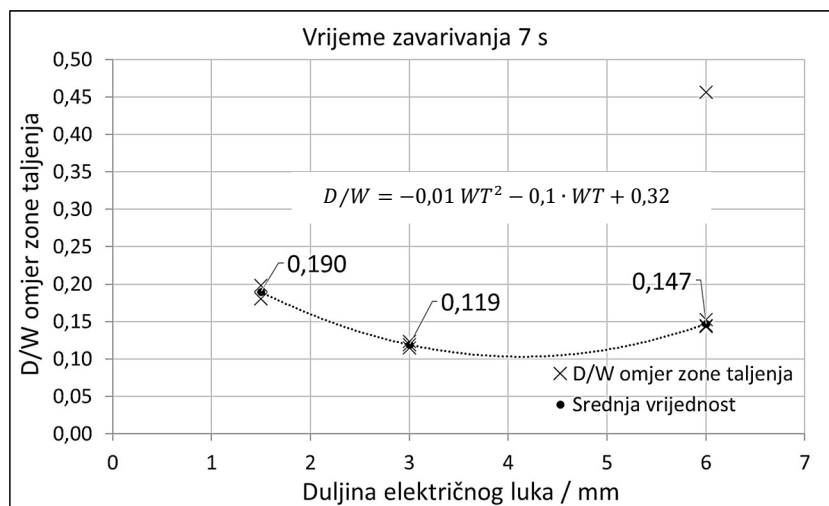
Na slici 5.89 prikazane su izmjerene dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti za tri različite duljine električnog luka. Ponovljivost stacionarnog TIG procesa obzirom na dubinu zone taljenja pri jednakim duljinama električnog luka bila je zadovoljavajuća. Može se uočiti kako je povećanje duljine luka s 1,5 mm na 3 mm rezultiralo smanjenjem prosječne dubine zone taljenja za 33,8 %. S druge strane, povećanje duljine električnog luka s 3 mm na 6 mm rezultiralo je povećanjem prosječne dubine zone taljenja za 16,3 %. Jedan od eksperimenata za duljinu luka od 6 mm rezultirao je potpunom penetracijom od 5 mm zbog čega je za duljinu luka od 6 mm provedeno još jedno ponavljanje. Eksperiment koji je rezultirao potpunom penetracijom prikazan je u dijagramu ali je izuzet iz izračuna srednje vrijednosti. Ovakve pojave mogu značajno narušiti ponovljivost TIG procesa. Iz navedenog se može zaključiti kako je

promjena duljine električnog luka svakako imala značajan utjecaj na dubinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s. Ovaj složeni odnos može se relativno dobro opisati polinomom drugog stupnja.



Slika 5.89 Dubina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 7 s

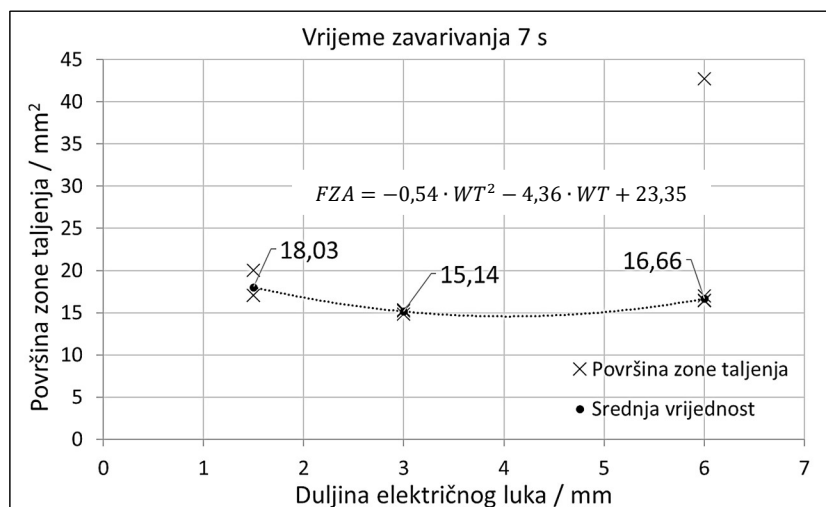
Izračunati omjeri dubine i širine zone taljenja (D/W omjeri) za tri duljine električnog luka prikazani su na slici 5.90. Budući da su zone taljenja imale sličnu širinu, D/W omjer je ovisio primarno o dubini zone taljenja. Najveći D/W omjer postignut je za duljinu električnog luka od 1,5 mm (0,190). Njegova vrijednost smanjila se za 37,4 % za duljinu luka od 3 mm, odnosno 22,6 % za duljinu luka od 6 mm. Napomena: eksperiment koji je rezultirao potpunom penetracijom za luk duljine 6 mm prikazan je na dijagramu ali nije obuhvaćen u izračun srednje vrijednosti.



Slika 5.90 D/W omjer zone taljenja za različite duljine luka, vrijeme zavarivanja 7 s

Površine zona taljenja u poprečnom presjeku i pripadne srednje vrijednosti za različite duljine električnog luka prikazane su na slici 5.91. Izražene razlike u dubini penetracije odrazile su se na površine presjeka zona taljenja. Najveća prosječna površina postignuta je za električni luk duljine 1,5 mm, ona se smanjila za 16 % za električni luk duljine 3 mm, odnosno za 7,6 % za električni luk duljine 6 mm. Napomena: eksperiment koji je rezultirao potpunom penetracijom

za luk duljine 6 mm rezultirao je izrazito velikom površinom zone taljenja u poprečnom presjeku ($42,76 \text{ mm}^2$). Ova vrijednost je prikazana u dijagramu ali nije obuhvaćena u izračun srednje vrijednosti.

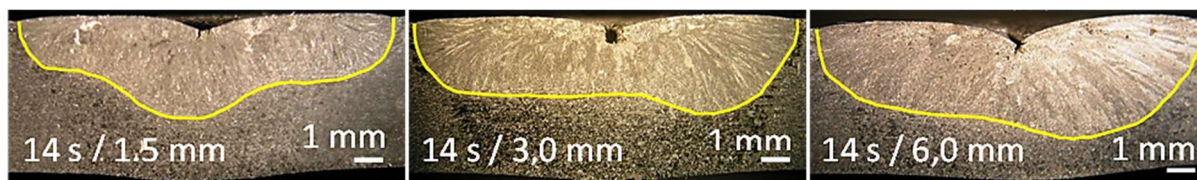


Slika 5.91 Površina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 7 s

Promjena duljine električnog luka pokazala je značajan utjecaj na dubinu penetracije za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s. Ovo se također odrazilo na površinu zone taljenja i njezin D/W omjer. Utvrđeno je da se produljenjem duljine luka s 1,5 mm na 3 mm prosječna penetracija smanjuje ali zatim opet povećava za luk duljine 6 mm. Nije utvrđen značajan utjecaj duljine luka na širinu zone taljenja. Jedan od eksperimenata za duljinu luka od 6 mm rezultirao je potpunom penetracijom nakon svega 7 s zavarivanja. Ovo pokazuje kako se pod jednakim zavarivačkim parametrima mogu očekivati velike razlike u penetraciji kod nehrđajućih čelika, čak i za relativno kratka vremena djelovanja električnog luka na osnovni metal.

5.4.2 Vrijeme zavarivanja 14 s

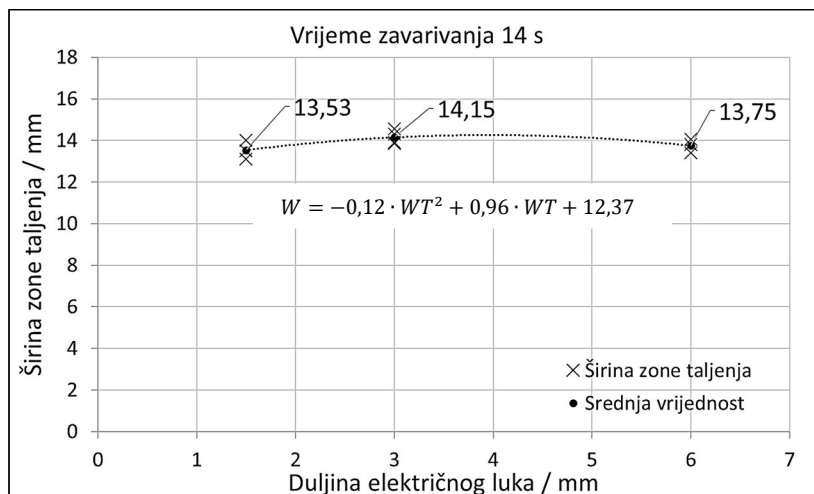
Tri uobičajene zone taljenja za duljinu električnog luka od 1,5 mm, 3 mm i 6 mm uz vrijeme zavarivanja od 14 s prikazane su na slici 5.92. Vidljivo je da kratki električni luk (1,5 mm) povećava dubinu penetracije u sredini zone taljenja. Produženjem duljine luka na 3 mm i 6 mm lokacija maksimalne penetracije u pravilu nije u sredini zone taljenja nego se pomiče bočno, bliže rubu taljenja.



Slika 5.92 Zone taljenja za tri različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 14 s

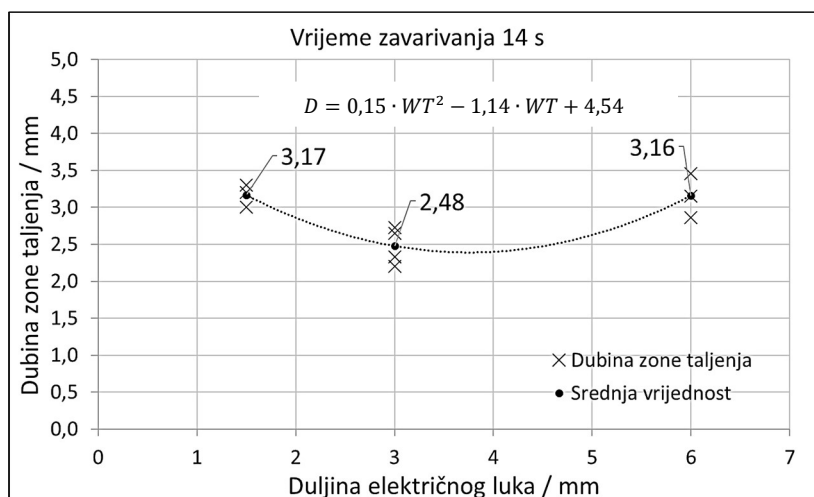
Sličan nalaz ustanovljen je i za vrijeme zavarivanja od 7 s. Ova promjena profila penetracije se također može objasniti slabljenjem elektromagnetske sile u talini kod povećanja duljine električnog luka. Izražena elektromagnetska sila kod kratkog električnog luka snažno transportira pregrijani tekući metal prema dnu zone taljenja što povećava dubinu penetracije u sredini zone taljenja.

Na slici 5.93 prikazane su izmjerene širine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti za tri duljine električnog luka i vrijeme zavarivanja od 7 s. Postignuta je dobra ponovljivost stacionarnog TIG procesa obzirom na širinu zone taljenja, odnosno nije bilo većeg rasipanja izmjerenih vrijednosti za jednaku duljinu luka. Povećanje duljine električnog luka nije imalo snažan utjecaj na širinu zone taljenja. Tako je povećanje duljine luka s 1,5 mm na 3 mm rezultiralo povećanjem prosječne širine zone taljenja za 4,6 % koja je potom smanjena za 2,8 % daljnjim povećanjem duljine luka na 6 mm.



Slika 5.93 Širina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 14 s

Na slici 5.94 prikazane su izmjerene vrijednosti dubine zone taljenja i prosječne vrijednosti u funkciji duljine luka za vrijeme zavarivanja 14 s. Ponovljivost procesa obzirom na dubinu zone taljenja lošija je u odnosu na njezinu širinu. Iz rezultata je vidljivo kako je povećanje duljine električnog luka u ovom istraživanju imalo značajan utjecaj na penetraciju. Naime, iako je prosječna dubina penetracije za duljinu električnog luka 1,5 mm i 6 mm približno slična (3,17 mm i 3,16 mm), eksperimenti provedeni uz duljinu luka od 3 mm rezultirali su približno 22 % manjom prosječnom penetracijom.

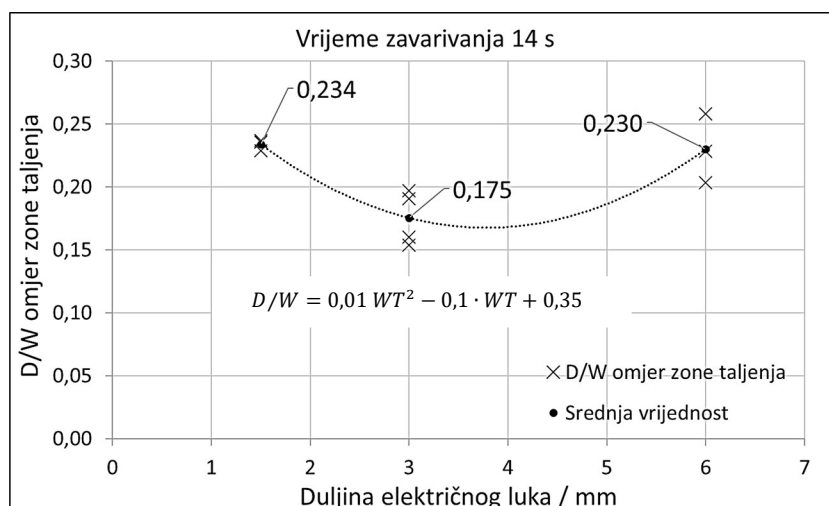


Slika 5.94 Dubina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 14 s

Ovakav odnos posljedica je složenog utjecaja duljine električnog luka na količinu generirane topline i dinamiku njezinog prijenosa u osnovnom metalu. Promjena duljine luka utječe na pad

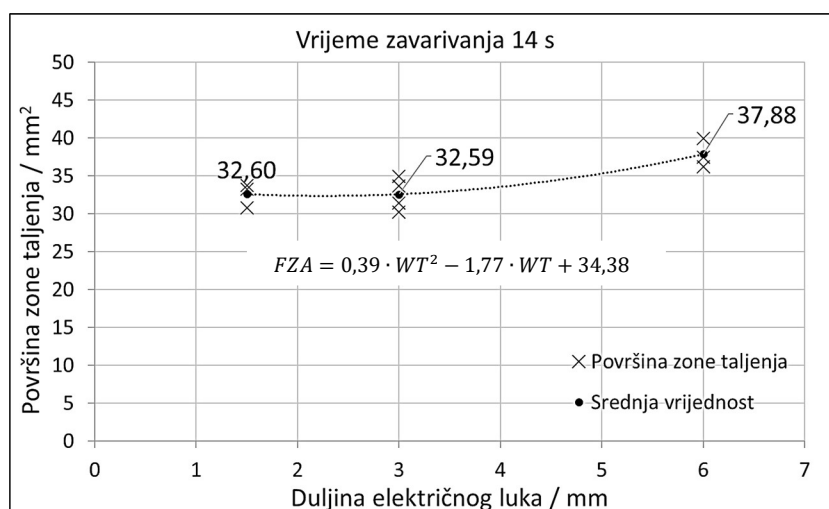
napona u luku i iskoristivost električnog luka ali i na sile koje pokreću konvekciju tekućeg metala poput elektromagnetske sile i sile otpora strujanju plazme.

D/W omjer zone taljenja za tri analizirane duljine luka i vrijeme zavarivanja od 14 s prikazan je na slici 5.95. Odnos duljine luka i D/W omjera ovisio je primarno o razlikama u dubini zone taljenja budući da su širine zona taljenja bile približno jednake. Tako je utvrđeno da je D/W omjer za duljine luka od 1,5 mm i 6 mm bio približno jednak dok je za duljinu luka od 3 mm bio 24,6 % manji.



Slika 5.95 D/W omjer zone taljenja za različite duljine luka, vrijeme zavarivanja 14 s

Na slici 5.96 prikazane su izmjerene vrijednosti površine zona taljenja u poprečnom presjeku i pripadne srednje vrijednosti za vrijeme zavarivanja od 14 s i tri različite duljine električnog luka. Prosječne vrijednosti površina za duljinu luka od 1,5 mm i 3 mm približno su jednake.



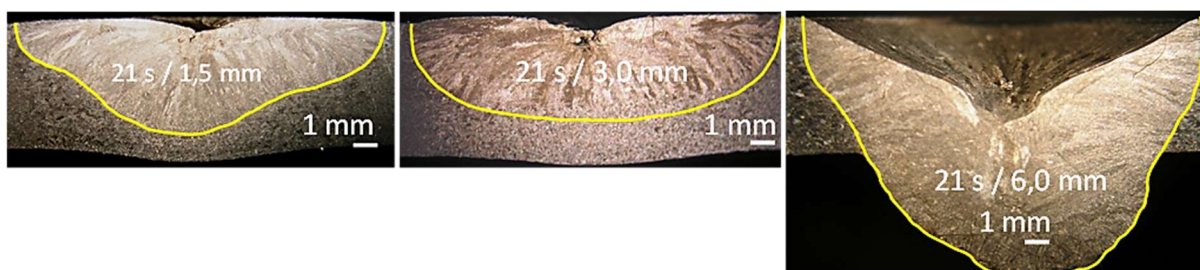
Slika 5.96 Površina zone taljenja za različite duljine luka, vrijeme zavarivanja 14 s

Ovo je zanimljivo jer su prosječne širine zone taljenja za ove dvije duljine luka slične ali je dubina penetracije za luk duljine 1,5 mm značajno veća. Razlog leži u bitno različitim profilu penetracije koji kod duljine luka od 1,5 mm ima naglašeno povećanje dubine u središnjem dijelu zone taljenja. Prosječna površina zone taljenja za luk duljine 6 mm povećala se za 16,2 % što može ukazivati na veći unos topline za ovu duljinu luka.

Promjena duljine električnog luka pokazala je značajan utjecaj na dubinu penetracije i za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 14 s. Kao i za vrijeme zavarivanja od 7 s, utvrđeno je da se produljenjem duljine luka s 1,5 mm na 3 mm prosječna penetracija smanjuje, a zatim opet povećava za luk duljine 6 mm. Također nije utvrđen značajan utjecaj duljine luka na širinu zone taljenja. Ponovljivost procesa obzirom na širinu zone taljenja bila je veoma dobra, znatno bolja u odnosu na dubinu zone taljenja.

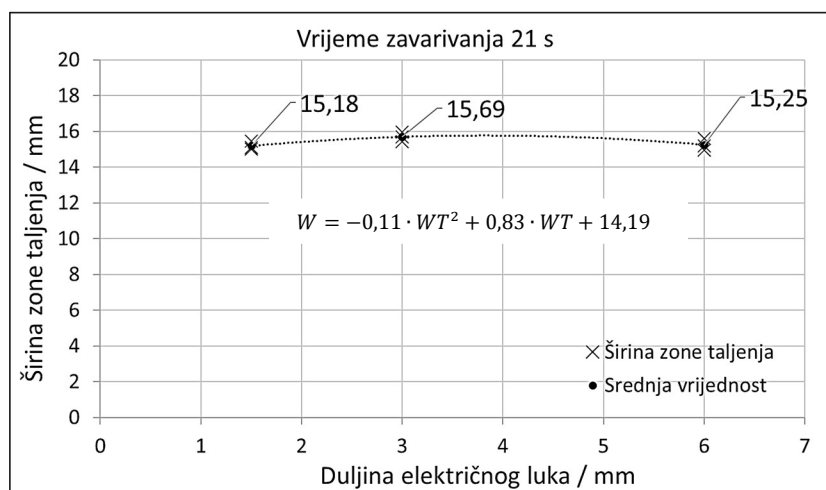
5.4.3 Vrijeme zavarivanja 21 s

Na slici 5.97 vidljive su tri uobičajene zone taljenja formirane pod različitim duljinama električnog luka (1,5 mm / 3 mm / 6 mm) za stacionarno TIG zavarivanje u trajanju od 21 s. Profil penetracije za duljinu električnog luka od 1,5 mm ima naglašenije povećanje dubine zone taljenja u središnjem dijelu u odnosu na luk duljine 3 mm s približno konkavnim profilom. Relativno sličan odnos utvrđen je za kraća vremena zavarivanja od 7 s i 14 s. Kod luka duljine 6 mm postignuta je puna penetracija, a zona taljenja ima vidljivo veću površinu u odnosu na kraće električne lukove.



Slika 5.97 Zone taljenja za tri različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 21 s

Širine zone taljenja i prosječne vrijednosti za tri duljine električnog luka i vrijeme zavarivanja od 21 s prikazane su na slici 5.98. Kao i za kraća vremena stacionarnog TIG zavarivanja (7 s i 14 s), ponovljivost procesa obzirom na širinu zone taljenja bila je veoma dobra.

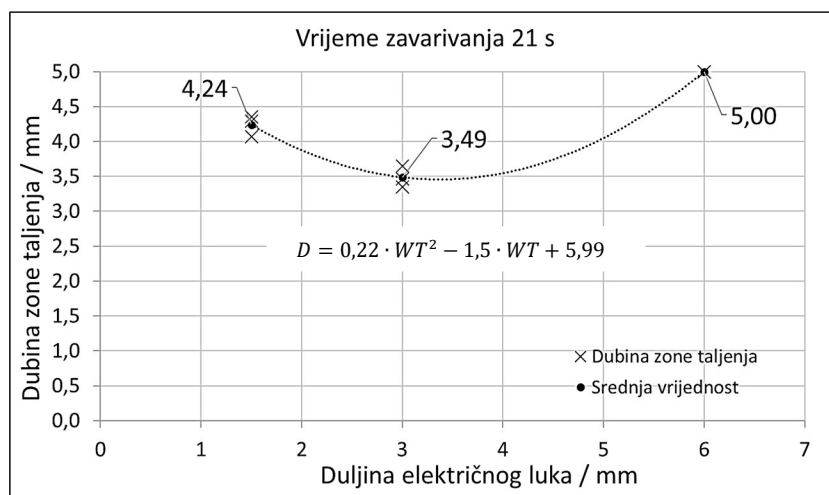


Slika 5.98 Širina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 21 s

Također, nije utvrđen značajniji utjecaj duljine električnog luka na prosječnu širinu zone taljenja. Prosječna vrijednost povećala se svega 3,4 % produljenjem luka s 1,5 mm na 3 mm, a

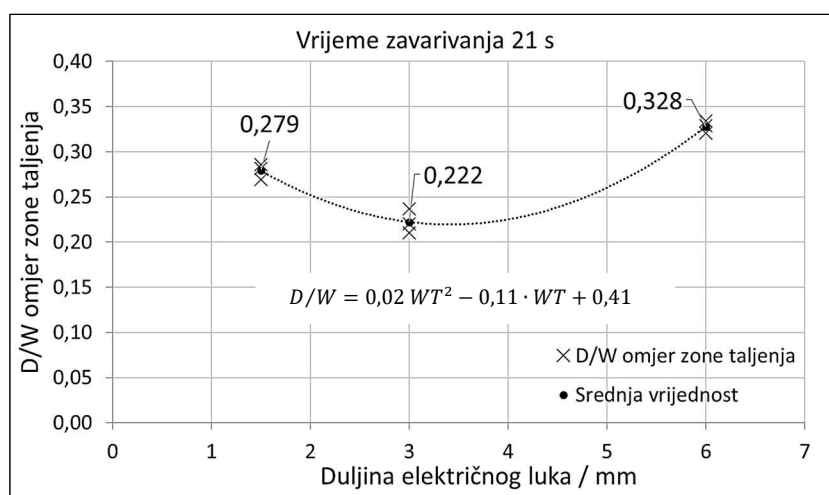
potom se smanjila za 2,8 % za luk duljine 6 mm. Slični odnosi utvrđeni su kod kraćih vremena zavarivanja.

Utjecaj duljine luka na dubinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s prikazan je na slici 5.99. Prosječna vrijednost dubine penetracije za duljinu luka od 1,5 mm bila je 21,5 % veća u odnosu na eksperimente provedene s električnim lukom duljine 3 mm. Najveća penetracija postignuta je za duljinu električnog luka od 6 mm gdje su svi provedeni eksperimenti rezultirali potpunom penetracijom (5 mm), a prosječna širina zone taljenja s korijenske strane uzorka iznosila je 8,39 mm. Kvalitativno sličan odnos duljine luka i dubine penetracije utvrđen je i za kraća vremena zavarivanja.



Slika 5.99 Dubina zone taljenja za različite duljine električnog luka, vrijeme zavarivanja 21 s

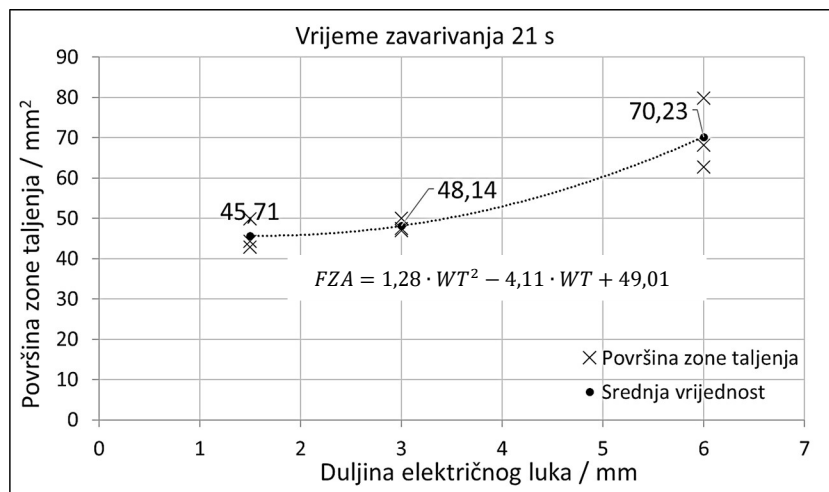
Izračunati D/W omjeri zone taljenja za tri različite duljine električnog luka i vrijeme zavarivanja od 21 s prikazani su na slici 5.100. Prikazani odnos ovisio je prvenstveno o dubini penetracije budući da su širine zone taljenja kod svih eksperimenata bile podjednake.



Slika 5.100 D/W omjer zone taljenja za različite duljine luka, vrijeme zavarivanja 21 s

Najveći D/W omjer postignut je za duljinu luka od 6 mm, dok su D/W omjer za duljine luka od 3 mm i 1,5 mm bili za 32,3 % i 14,9 % manji. Prikazani rezultati ukazuju da je promjena duljine električnog luka imala značajan utjecaj na karakteristični D/W omjer rezultirajuće zone taljenja.

Na slici 5.101 je vidljiv odnos duljine električnog luka i površina poprečnog presjeka zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s. Za luk duljine 6 mm prosječna vrijednost površine bila je daleko najveća: 45,9 % veća u odnosu na luk duljine 3 mm i 53,6 % veća u odnosu na luk duljine 1,5 mm. Prosječna površina za luk duljine 1,5 mm bila je 5 % manja u odnosu na luk duljine 3 mm. Ovo je zanimljivo jer su prosječne širine zone taljenja za obje duljine luka bile slične ali je prosječna penetracija za luk duljine 1,5 mm bila 20,6 % veća. Razlog su značajno drugačiji profili penetracije.



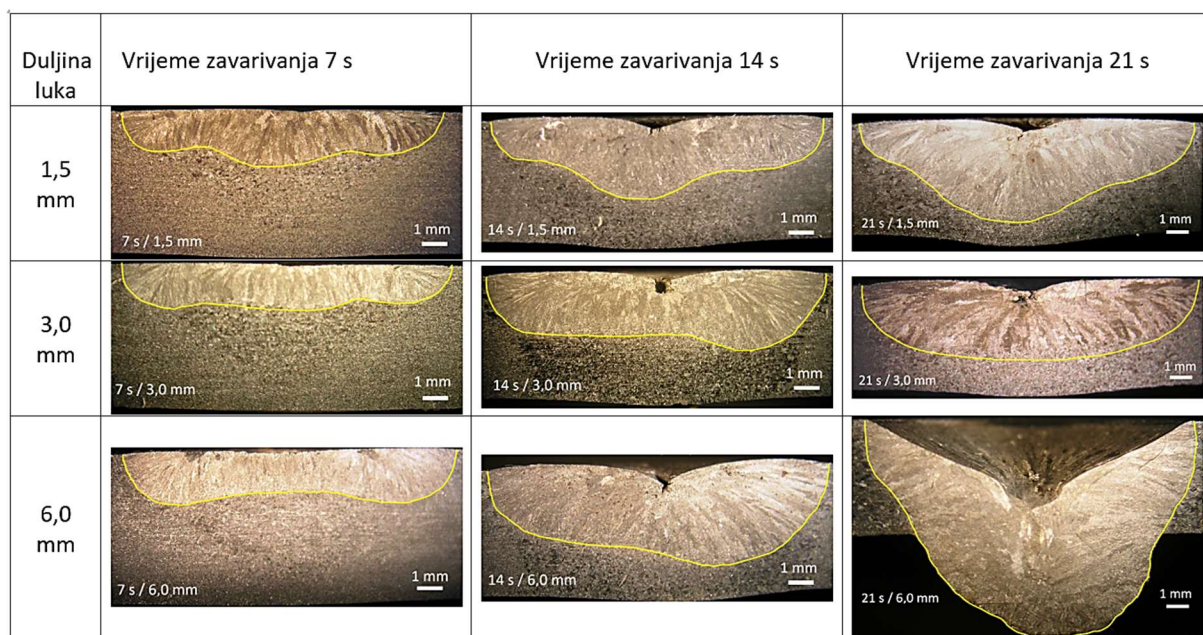
Slika 5.101 Površine zone taljenja za različite duljine luka, vrijeme zavarivanja 21 s

Promjena duljine električnog luka za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 21 s pokazala je značajan utjecaj na dubinu zone taljenja. Kao i za vremena zavarivanja od 7 s i 14 s, utvrđeno je da se produljenjem duljine luka s 1,5 mm na 3 mm prosječna penetracija smanjuje, a zatim za luk duljine 6 mm opet povećava gdje doseže svoju maksimalnu vrijednost. Nije utvrđen značajan utjecaj duljine luka na širinu zone taljenja. Ponovljivost TIG procesa obzirom na širinu zone taljenja bila je veoma dobra, bolja u odnosu na ponovljivost dubine zone taljenja.

5.4.4 Vremenska evolucija zone taljenja

Budući da su eksperimenti s promjenjivom duljinom električnog luka provedeni za različita vremena stacionarnog TIG zavarivanja rezultati pružaju uvid u vremensku evoluciju zone taljenja u promatranom vremenskom intervalu od 7 s do 21 s. U ovome podpoglavlju analizirana je vremenska promjena karakterističnih dimenzija zone taljenja (širina, dubina, površina poprečnog presjeka) za tri analizirane duljine električnog luka: 1,5 mm, 3 mm i 6 mm. U tablici 5.5 zbirno su prikazane odabrane zone taljenja za navedene duljine električnog luka i vremena zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s.

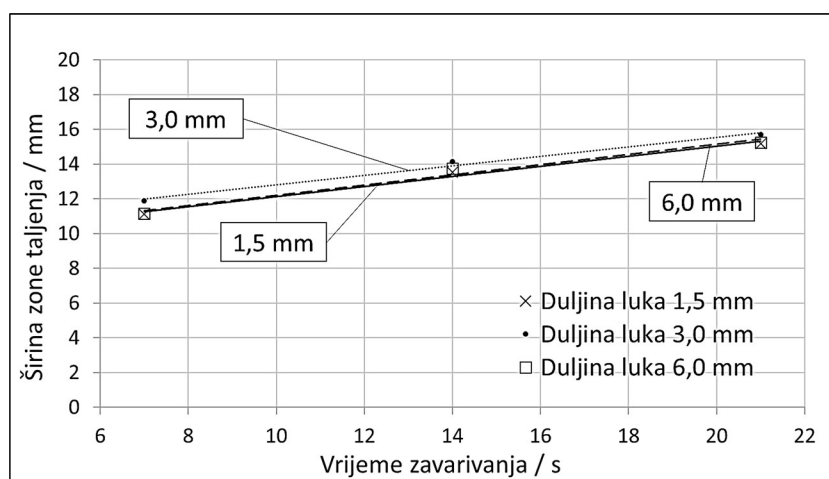
Tablica 5.5 Zone taljenja za različite duljine električnog luka i vremena zavarivanja



Na slici 5.102 prikazana je vremenska evolucija prosječne širine zone taljenja za tri različite duljine električnog luka kod stacionarnog TIG zavarivanja. Izračunate srednje vrijednosti širine zone taljenja (W) za vremenski interval od 7 s do 21 s i pripadne jednadžbe pravaca koje opisuju njezinu promjenu u funkciji vremena zavarivanja (WT) prikazane su u tablici 5.6.

Tablica 5.6 Prosječne širine zone taljenja (mm) i jednadžbe njezine vremenske promjene

Duljina luka	Vrijeme zavarivanja			Jednadžba	Broj jednadžbe
	7 s	14 s	21 s		
1,5 mm	11,27	13,53	15,18	$W = 0,29 \cdot WT + 9,22$	5.28
3,0 mm	11,88	14,15	15,69	$W = 0,27 \cdot WT + 10,01$	5.29
6,0 mm	11,02	13,75	15,25	$W = 0,29 \cdot WT + 9,27$	5.30



Slika 5.102 Vremenska promjena širine zone taljenja za različite duljine električnog luka

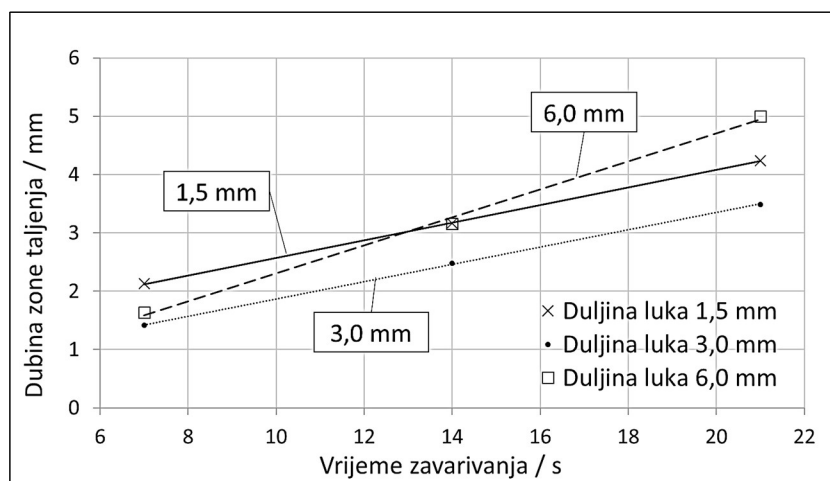
Iz rezultata je vidljivo kako nije postojala značajnija razlika u povećanju širine zone taljenja u ovisnosti o duljini luka. Pravci koji opisuju promjene širine zone taljenja se gotovo preklapaju.

Prosječna brzina rasta širine zone taljenja u intervalu od 7 s do 14 s iznosila je 0,29 mm/s za luk duljine 1,5 mm, 0,27 mm/s za luk duljine 3 mm i 0,29 mm/s za luk duljine 6 mm. Treba spomenuti kako je iz podataka moguće izračunati i prosječnu brzinu rasta širine u intervalu od 0 s do 7 s koja je značajno veća te je iznosila približno 1,63 mm/s za sve tri duljine luka.

U tablici 5.7 su prikazane izračunate srednje vrijednosti dubine zone (D) taljenja za tri električna luka različite duljine i vremena zavarivanja (WT) od 7 s, 14 s i 21 s. U tablici su također za tri luka navedene jednačbe pravaca koji opisuju vremensku promjenu penetracije u vremenskom intervalu od 7 s do 14 s. Na slici 5.103 u dijagramu su prikazane navedene prosječne vrijednosti dubine zone taljenja u funkciji vremena te pripadni pravci. Luk duljine 1,5 mm u usporedbi s lukom duljine 3 mm rezultirao je većom prosječnom penetracijom u cijelom vremenskom intervalu. Brzina povećanja penetracije za oba luka bila je 0,15 mm/s tj. pripadni pravci su paralelni. Za luk duljine 6 mm utvrđena je značajno veća brzina povećanja penetracije (0,24 mm/s) u promatranom intervalu (od 7 s do 21 s) što je rezultiralo potpunom penetracijom (5 mm) za vrijeme zavarivanja od 21 s. Podaci upućuju na zaključak kako duljina električnog luka značajno utječe na dubinu zone taljenja ali u obzir treba uzeti i vrijeme djelovanja luka na osnovni metal. Tako je primjerice za vrijeme zavarivanja od 7 s najveća penetracija postignuta za električni luk duljine 1,5 mm dok je za vrijeme zavarivanja od 21 s najveća penetracija postignuta za električni luk duljine 6 mm.

Tablica 5.7 Prosječne penetracije (mm) i jednačbe koje opisuju njezinu vremensku promjenu

Duljina luka	Vrijeme zavarivanja			Jednačba	Broj jednačbe
	7 s	14 s	21 s		
1,5 mm	2,13	3,17	4,24	$D = 0,15 \cdot WT + 1,07$	5.31
3,0 mm	1,41	2,48	3,49	$D = 0,15 \cdot WT + 0,39$	5.32
6,0 mm	1,64	3,16	5,00	$D = 0,24 \cdot WT - 0,10$	5.33



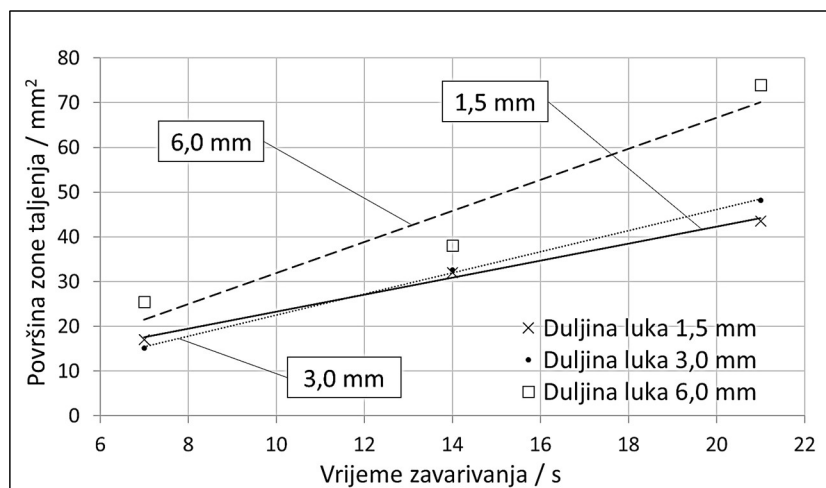
Slika 5.103 Vremenska promjena dubine zone taljenja za različite duljine električnog luka

U tablici 5.8 prikazane su izračunate srednje vrijednosti površine zone taljenja (FZA) u poprečnom presjeku za tri električna luka različite duljine i vremena zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s. U tablici su također navedene jednačbe pravaca koje opisuju njihovu promjenu u funkciji vremena zavarivanja (WT). Na slici 5.104 vidljive su vrijednosti površine poprečnog presjeka zone taljenja za tri luka različite duljine u ovisnosti o vremenu zavarivanja. Prosječne brzine povećanja površine zone taljenja za tri analizirana slučaja u vremenskom intervalu od 7 s do 21 s su iznosile: 1,98 mm/s za duljinu luka 1,5 mm; 2,36 mm/min za duljinu luka 3 mm; 3,83 mm/s za duljinu luka 6 mm. Iz navedenih podataka vidljivo je da se poprečni presjek zone

taljenja za električni luk duljine 6 mm povećavao značajno brže u odnosu na lukove manje duljine.

Tablica 5.8 Prosječne površine zone taljenja (mm^2) i jednačbe njezine vremenske promjene

Duljina luka	Vrijeme zavarivanja			Jednačba	Broj jednačbe
	7 s	14 s	21 s		
1,5 mm	18,03	32,60	45,71	$FZA = 1,98 \cdot WT + 4,44$	5.34
3,0 mm	15,14	32,59	48,14	$FZA = 2,36 \cdot WT - 1,04$	5.35
6,0 mm	16,16	37,88	70,23	$FZA = 3,83 \cdot WT - 12,0$	5.36



Slika 5.104 Vremenska promjena površine zone taljenja za različite duljine električnog luka

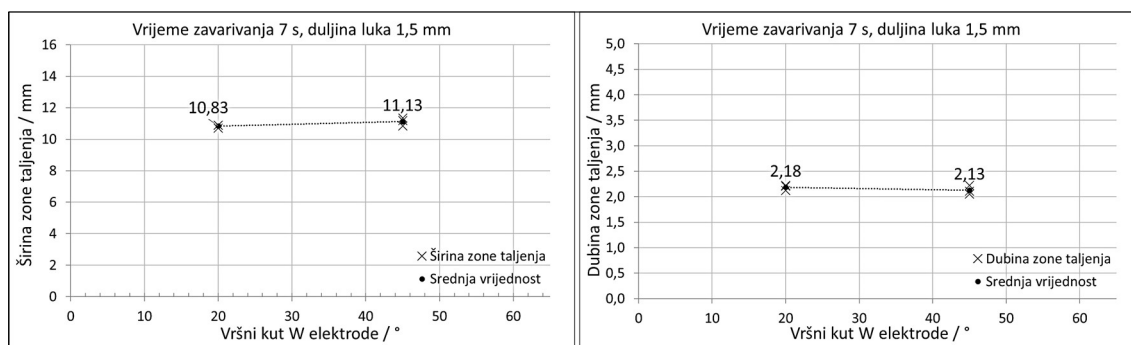
Istraženi utjecaj promjene duljine električnog luka iskazao je značajan utjecaj na dubinu penetracije i D/W omjer zone taljenja za vremena stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s. Duljina luka načelno je imala jednak utjecaj na penetraciju i D/W omjer, bez obzira na vrijeme zavarivanja: povećanjem duljine luka s 1,5 mm na 3 mm dubina penetracije i D/W omjer su se smanjili da bi se potom za luk duljine 6 mm ponovo povećali. Promjena duljine električnog luka nije iskazala značajniji utjecaj na širinu zone taljenja.

5.5 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na dimenzije zone taljenja

U ovom podpoglavlju analiziran je utjecaj vršnog kuta volframove elektrode stacionarnog TIG zavarivanja na karakteristične dimenzije zone taljenja. Promjena vršnog kuta netaljive volframove elektrode može utjecati na dimenzije zone taljenja budući da ima utjecaj na veličinu anodne površine na osnovnom metalu. Promjena anodne površine utječe na gustoću električnog i toplinskog opterećenja na osnovnom metalu, elektromagnetsku silu i brzinu strujanja plazme [15]. Utjecaj promjene vršnog kuta analiziran je za tri električna luka različite duljine (1,5 mm, 3 mm, 6 mm) i za tri različita vremena zavarivanja (7 s, 21 s, 14 s). Uzorcima od nehrđajućeg čelika 316L je neposredno prije zavarivanja gornja i donja površina obrađena sukladno planu brušenja, a potom odmašćena. Nije korišten zaštitni plin na korijenskoj uzoraka tj. korijenska strana zavara bila je izložena zraku.

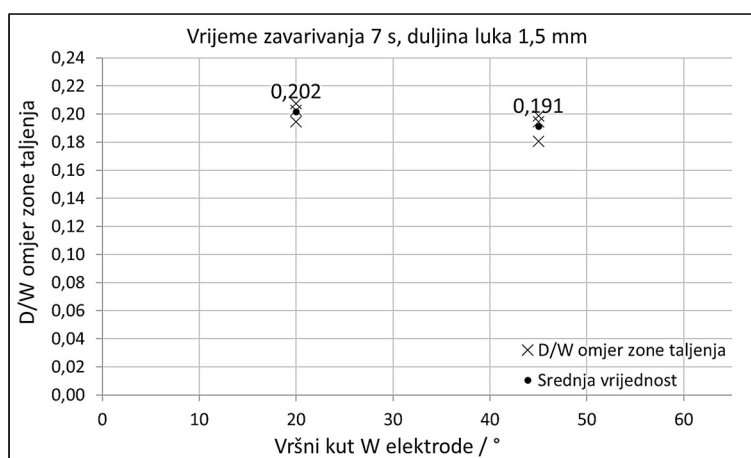
5.5.1 Vrijeme zavarivanja 7 s

Na slici 5.105 prikazana je promjena širine i dubine za zone taljenja formirane pod vršnim kutom volframove elektrode od 20 ° i 45 ° uz duljinu električnog luka od 1,5 mm. Vrijeme zavarivanja iznosilo je 7 s. Iz rezultata je vidljivo kako analizirana promjena vršnog kuta nije značajnije utjecala na dimenzije zone taljenja. Povećanje vršnog kuta rezultiralo je povećanjem prosječne širine zone taljenja za 2,8 % i smanjenjem prosječne dubine zone taljenja za 2,3 %.



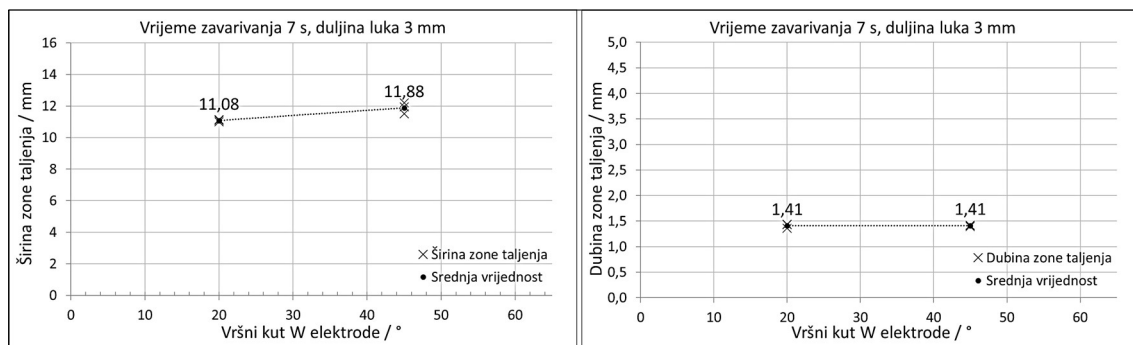
Slika 5.105 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 1,5 mm

Iz dubine i širine zone taljenja direktno proizlazi njezin D/W omjer prikazan na slici 5.106 za duljinu luka od 1,5 mm i vrijeme zavarivanja od 7 s. Povećanje vršnog kuta volframove elektrode rezultiralo je manjim smanjenjem D/W omjera od 5,4 %.



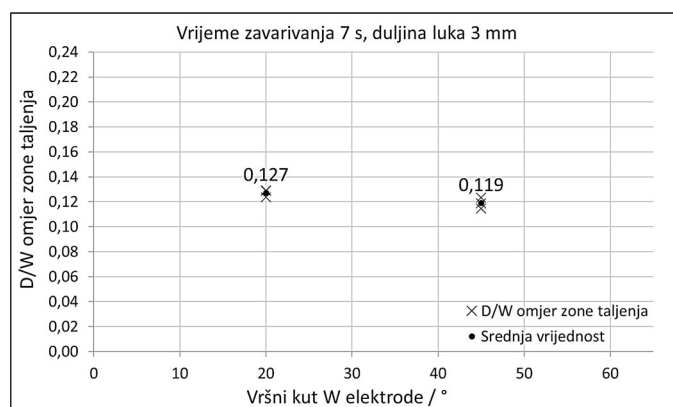
Slika 5.106 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 1,5 mm

Karakteristične dimenzije zone taljenja za eksperimente provedene uz duljinu električnog luka od 3 mm za dva različita vršna kuta volframove elektrode (20 ° i 45 °) vidljive su na slici 5.107. Promjena vršnog kuta nije imala snažan utjecaj na izmjerene dimenzije zona taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s, što je utvrđeno i za duljinu luka od 1,5 mm. Povećanjem vršnog kuta prosječna širina zone taljenja povećala se za 7,2 %, dok je prosječna dubina zone taljenja ostala nepromijenjena.



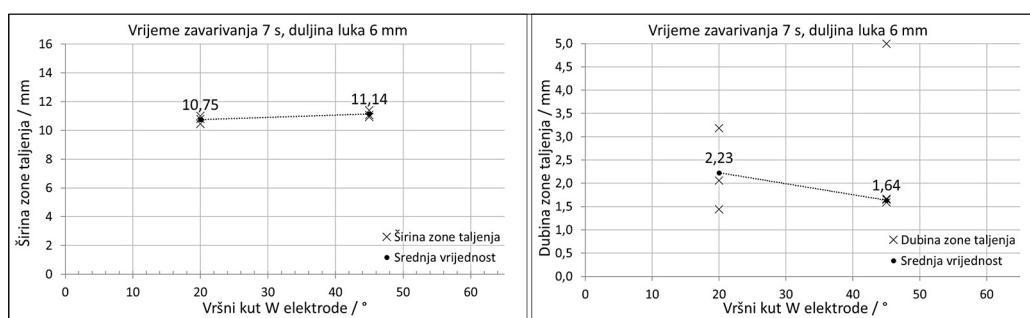
Slika 5.107 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 3 mm

Utjecaj promjene vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer zone taljenja za duljinu električnog luka od 3 mm i vrijeme zavarivanja od 7 s prikazan je na dijagramu na slici 5.108. Povećanje vršnog kuta uzrokovalo je relativno malo smanjenje D/W omjera od 6,3 %.



Slika 5.108 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 1,5 mm

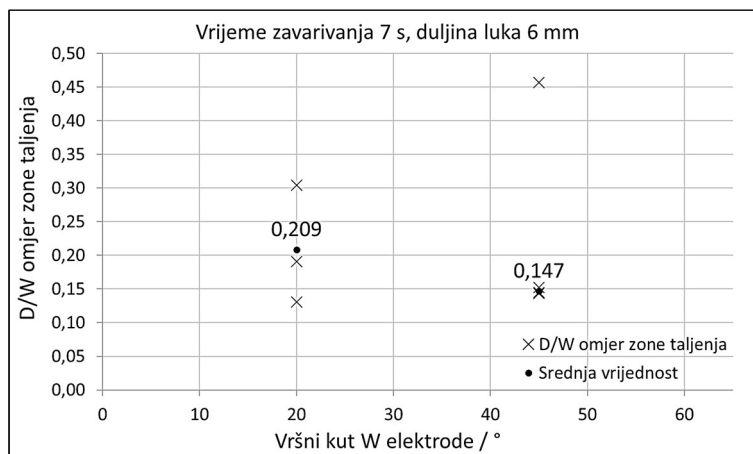
Ekspерименти s promjenom vršnog kuta volframove elektrode i vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s provedeni su i uz duljinu luka od 6 mm. Rezultati mjerenja širine i dubine zone taljenja prikazani su na slici 5.109.



Slika 5.109 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 6 mm

Povećanje kuta nije značajnije utjecalo na prosječnu širinu zone taljenja koja se povećala za 3,6 % dok se prosječna vrijednost penetracije smanjila za značajnih 26,5 %.

Utjecaj promjene vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer zone taljenja za duljinu električnog luka od 6 mm i vrijeme zavarivanja od 7 s vidljiv je na slici 5.110. Povećanje vršnog kuta s 20° na 45° uzrokovalo je značajnije smanjenje D/W omjera zone taljenja i to za 29,7 %. Ovo je očekivano budući da su zone taljenja imale podjednaku širinu ali je zona taljenja formirana pod vršnim kutom volframove elektrode imala veću dubinu.

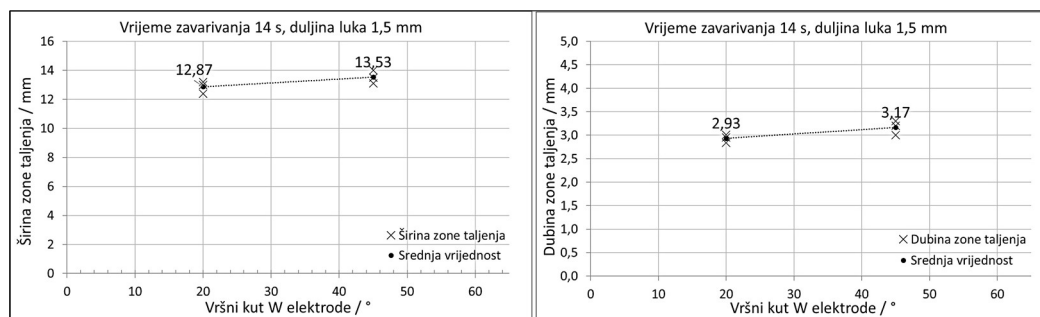


Slika 5.110 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 6 mm

Rezultati predstavljeni u ovom podpoglavlju omogućili su analizu odnosa dimenzija zona taljenja i promjene vršnog kuta volframove elektrode s 20° na 45° uz vrijeme zavarivanja od 7 s i tri različite duljine električnog luka. Promjena vršnog kuta nije značajnije utjecala na prosječne širine zona taljenja, bez obzira na duljinu električnog luka. Za duljinu električnog luka od 6 mm manji vršni kut elektrode rezultirao je većom prosječnom penetracijom i D/W omjerom uz lošiju ponovljivost procesa (veće rasipanje dubine penetracije). Vršni kut volframove elektrode nije utjecao na dubinu penetracije za eksperimente s duljinom električnog luka od 1,5 mm i 3 mm.

5.5.2 Vrijeme zavarivanja 14 s

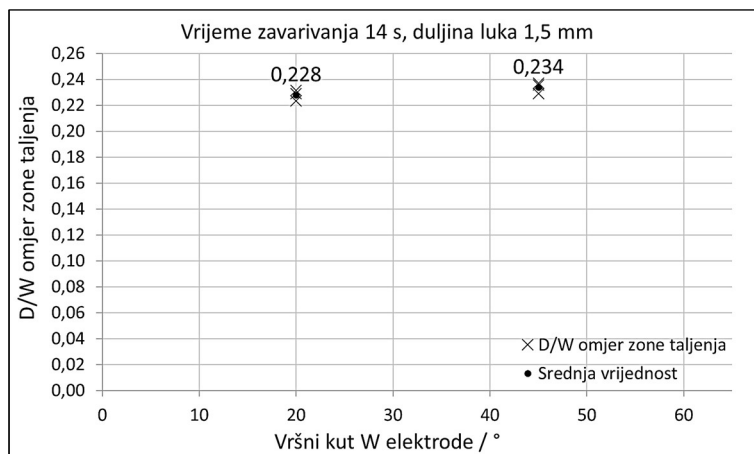
Na slici 5.111 prikazan je odnos širine i dubine zone taljenja s vršnim kutom volframove elektrode uz duljinu električnog luka od 1,5 mm i vrijeme zavarivanja od 14 s.



Slika 5.111 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 1,5 mm

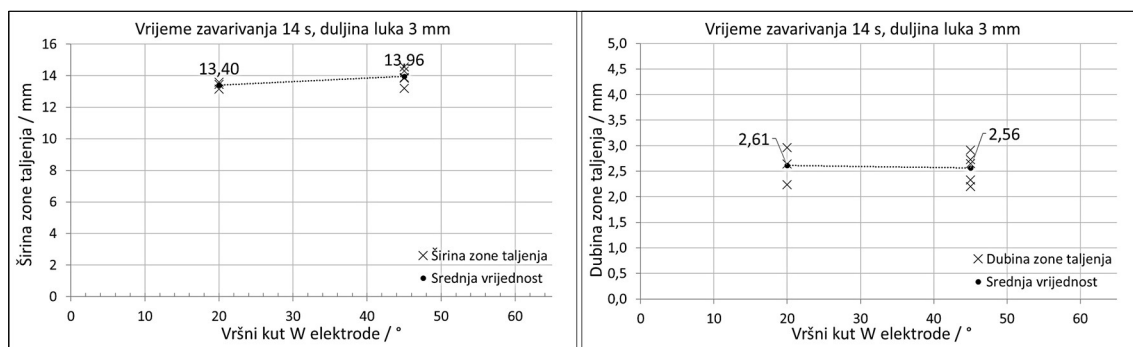
Iz rezultata je vidljivo kako analizirana promjena vršnog kuta (20° i 45°) nije snažno utjecala na promatrane dimenzije zone taljenja. Povećanje vršnog kuta rezultiralo je povećanjem širine

zone taljenja za 5,1 % i smanjenjem dubine zone taljenja za 8,2 %. Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer zone taljenja za duljinu električnog luka od 1,5 mm i vrijeme zavarivanja od 14 s prikazan je na dijagramu na slici 5.112. Povećanje vršnog kuta volframove elektrode nije značajnije utjecalo na D/W omjer budući da je došlo do njegovog povećanja od svega 2,6 %.



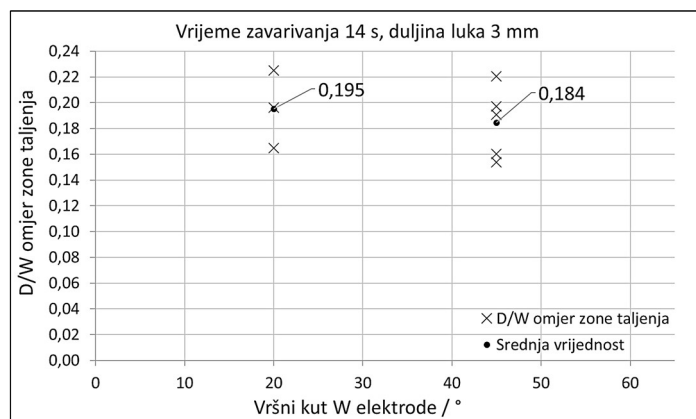
Slika 5.112 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 1,5 mm

Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubine zone taljenja istražen je i za duljinu električnog luka od 3 mm, slika 5.113. Iz rezultata je vidljivo kako povećanje kuta s 20 ° na 45 ° nije imalo bitniji utjecaj na mjerene veličine: širina zone taljenja povećala se 4,2 %, a penetracija se smanjila za 1,9 %.



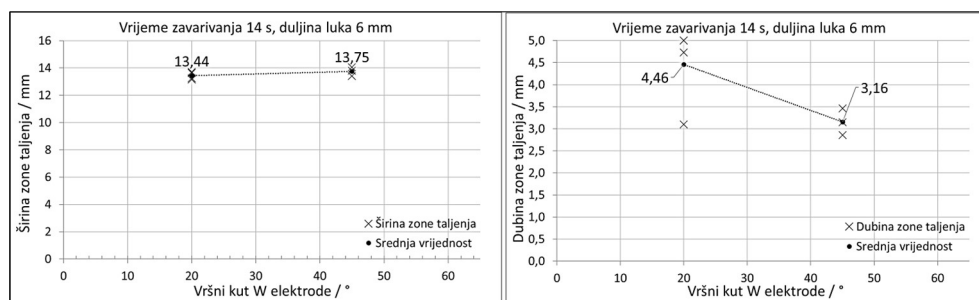
Slika 5.113 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 3 mm

Utjecaj povećanja vršnog kuta volframove elektrode za 20 ° na D/W omjer zone taljenja za duljinu električnog luka od 3 mm i vrijeme zavarivanja od 14 s prikazan je na slici 5.114. Karakteristični D/W omjer zone taljenja smanjio se za 5,6 % kad se vršni kut volframove elektrode povećao s 20 ° na 45 °.



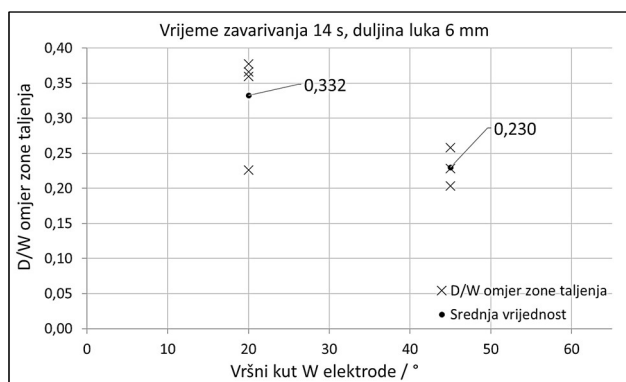
Slika 5.114 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 3 mm

Odnos vršnog kuta volframove elektrode sa širinom i dubinom zone taljenja za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 14 s uz duljinu električnog luka od 6 mm prikazan je na slici 5.115. Iz podataka se može zaključiti kako je promjena vršnog kuta s 20 ° na 45 ° smanjila prosječnu dubinu zone taljenja za gotovo 30 %. Ovakav odnos zabilježen je i za vrijeme zavarivanja od 7 s uz jednaku duljinu električnog luka (6 mm).



Slika 5.115 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 6 mm

Utjecaj promjene vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer zone taljenja za duljinu električnog luka od 6 mm i vrijeme zavarivanja od 14 s prikazan je u dijagramu na slici 5.116.



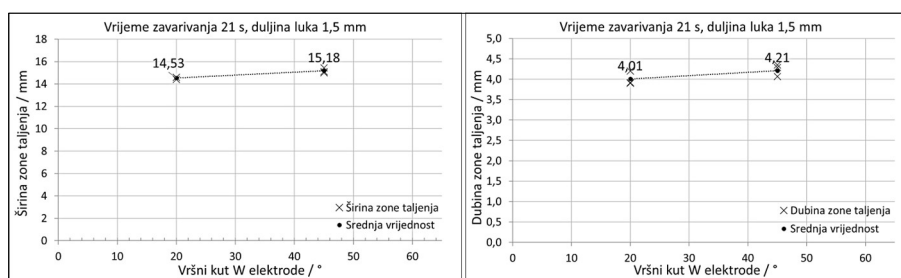
Slika 5.116 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 6 mm

Povećanje vršnog kuta uzrokovalo je značajnije smanjenje D/W (30,7 %) omjera zone taljenja. Sličan odnos zabilježen je za vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s. Ovaj rezultat direktna je posljedica veće penetracije za vršni kut od 20 ° jer su prosječne širine zone taljenja za oba analiziran kuta bile podjednake.

Prikazani rezultati opisuju širinu i dubinu zona taljenja u funkciji vršnog kuta volframove elektrode za vrijeme zavarivanja od 14 s i tri različite duljine električnog luka. Promjena vršnog kuta nije značajnije utjecala na prosječne širine zona taljenja, bez obzira na duljinu električnog luka. Eksperimenti provedeni s električnim lukom duljine 6 mm rezultirali su većom prosječnom penetracijom i D/W omjerom zone taljenja pri manjem vršnom kutu volframove elektrode (20 °) uz nešto lošiju ponovljivost procesa. Vršni kut volframove elektrode nije utjecao na dubinu penetracije ni D/W omjer za eksperimente s duljinom električnog luka od 1,5 mm i 3 mm. Slični odnosi utvrđeni su za kraće vrijeme zavarivanja od 7 s.

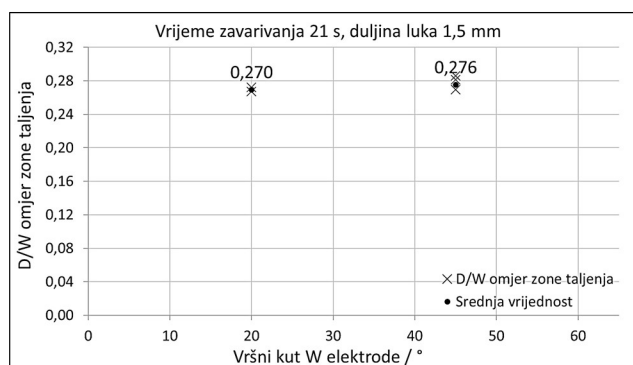
5.5.3 Vrijeme zavarivanja 21 s

Na slici 5.117 prikazana je promjena širine i dubine zona taljenja formiranih uz vršni kut volframove elektrode od 20 ° i 45 ° i duljinu električnog luka od 1,5 mm. Vrijeme djelovanja stacionarnog TIG zavarivanja na osnovni metal iznosilo je 21 s. Prikazani rezultati ukazuju da promjena vršnog kuta nije značajnije utjecala na izmjerene dimenzije zone taljenja. Povećanje vršnog kuta rezultiralo je povećanjem širine zone taljenja za 4,5 % i penetracije za 5 %.



Slika 5.117 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 1,5 mm

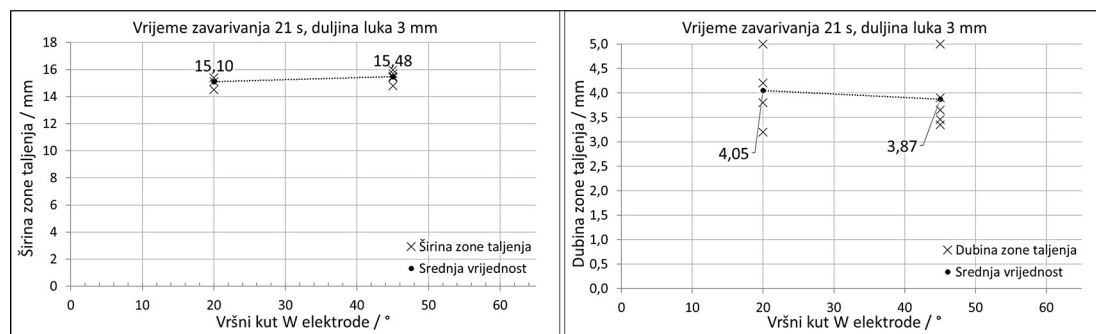
Utjecaj promjene vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer zone taljenja za duljinu električnog luka od 1,5 mm i vrijeme zavarivanja od 21 s vidljiv je na slici 5.118.



Slika 5.118 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 1,5 mm

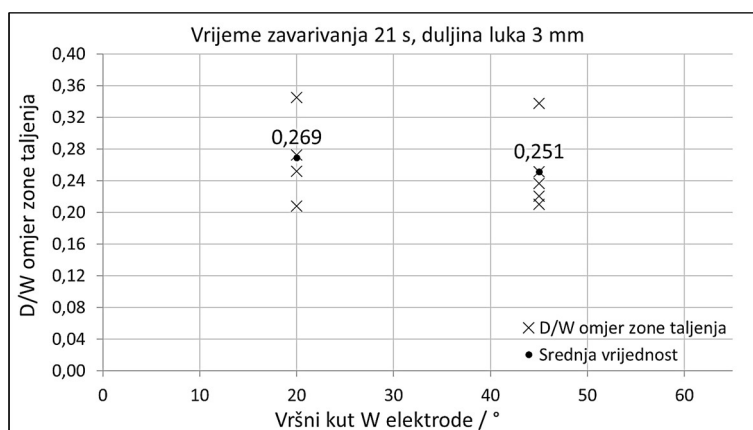
Povećanje vršnog kuta uzrokovalo je smanjenje D/W omjera za samo 2,2 % što upućuje na zaključak kako promjena kuta nije imala značajan utjecaj na promatrani odnos.

Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 21 s uz duljinu električnog luka od 3 mm prikazan je na slici 5.119. Iz podataka se može zaključiti kako promjena vršnog kuta s 20° na 45° nije snažno utjecala na širinu zone taljenja koja se povećala za 2,5 %. Za istu promjenu vršnog kuta prosječna penetracija se smanjila 4,4 % što se ne može smatrati značajnim.



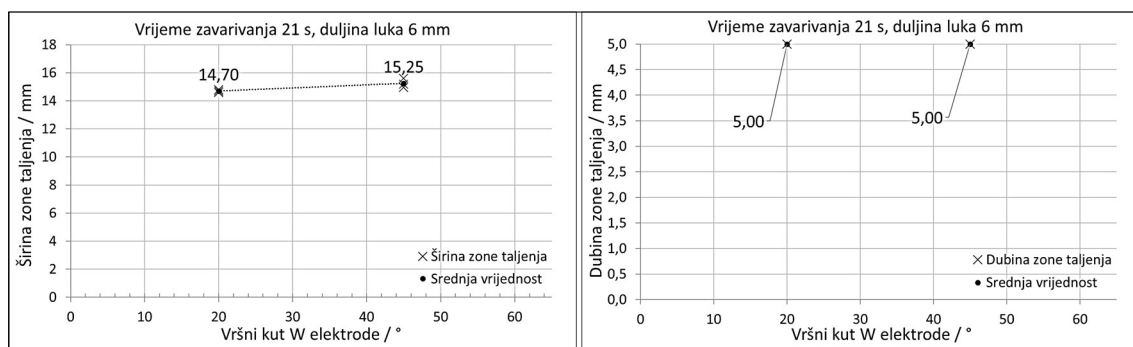
Slika 5.119 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 3 mm

Utjecaj promjene vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer zone taljenja za duljinu električnog luka od 3 mm i vrijeme zavarivanja od 21 s vidljiv je na slici 5.120. Povećanje vršnog kuta elektrode s 20° na 45° uzrokovalo je relativno malo smanjenje D/W omjera zone taljenja koje je iznosilo 6,7 %.



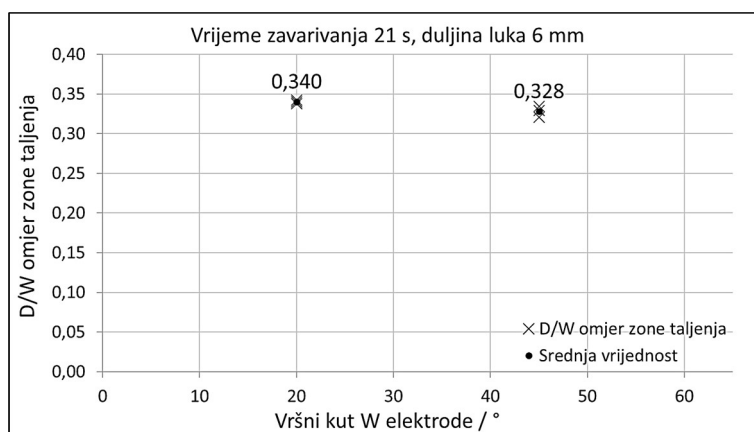
Slika 5.120 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 3 mm

Na slici 5.121 prikazane su izmjerene širine i dubine zone taljenja u ovisnosti o vršnom kutu volframove elektrode uz duljinu električnog luka od 6 mm i vrijeme zavarivanja od 21 s. Iz rezultata je vidljivo kako promjena vršnog kuta elektrode s 20° na 45° nije bitnije utjecala na širinu zone taljenja koja se povećala za 2,5 %. Promjena vršnog kuta nije imala utjecaja ni na dubinu zone taljenja: potpuna penetracija (5 mm) postignuta je kod svih eksperimenata za oba vršna kuta. Međutim, izmjerena prosječna širina zone taljenja s korijenske strane bila je veća za vršni kut od 20° (13,52 mm) u odnosu na 45° (8,93 mm).



Slika 5.121 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na širinu i dubinu zone taljenja; duljina električnog luka 6 mm

Utjecaj promjene vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer zone taljenja za duljinu električnog luka od 6 mm i vrijeme zavarivanja od 21 s vidljiv je na slici 5.122. Povećanje vršnog kuta uzrokovalo je smanjenje D/W omjera za 3,5 %. Ovaj rezultat je direktna posljedica manje razlike u prosječnim širinama zona taljenja formiranim pod vršnim kutovima elektrode od 20 ° i 45 ° budući da su penetracije u oba slučaja bile jednake (5 mm) za oba kuta.



Slika 5.122 Utjecaj vršnog kuta volframove elektrode na D/W omjer; luk duljine 6 mm

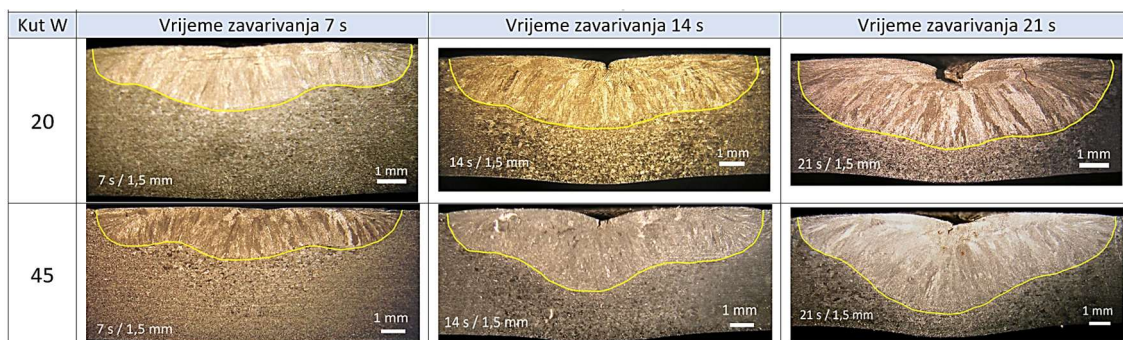
Na temelju predstavljenih rezultata analiziran je odnos dimenzija zona taljenja i vršnog kuta volframove elektrode uz vrijeme zavarivanja od 21 s i tri različite duljine električnog luka. Promjena vršnog kuta nije značajnije utjecala na prosječne širine zona taljenja, bez obzira na duljinu električnog luka što je utvrđeno i na kraćim vremenima zavarivanja (7 s i 14 s). Promjena vršnog kuta volframove elektrode s 20 ° na 45 ° nije značajnije utjecala na dubinu penetracije za eksperimente s duljinom električnog luka od 1,5 mm i 3 mm. U svim eksperimentima provedenim uz duljinu električnog luka od 6 mm postignuta je potpuna penetracija ali je manji vršni kut elektrode rezultirao većom prosječnom širinom zone taljenja s korijenske strane.

5.5.4 Vremenska evolucija zone taljenja

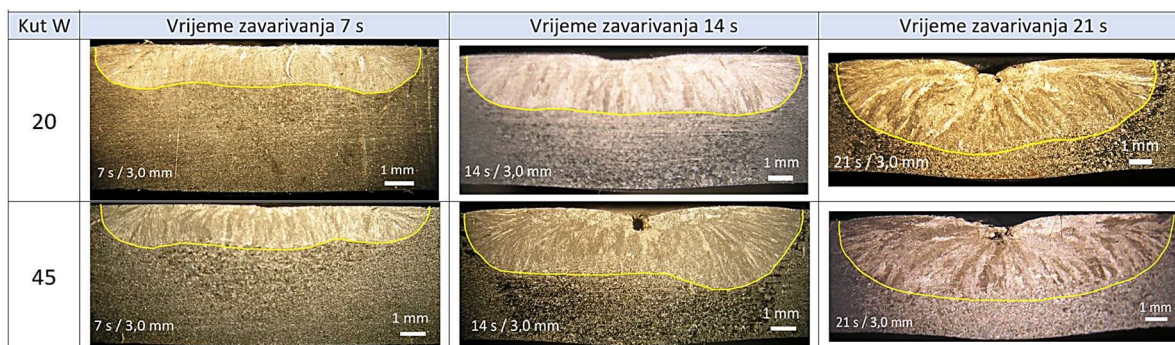
Istraživanje utjecaja vršnog kuta volframove elektrode na zonu taljenja provedeno je za tri različita vremena stacionarnog TIG zavarivanja (7 s, 14 s i 21 s). Dobiveni rezultati pružaju uvid u vremensku evoluciju širine, dubine i površine zone taljenja u vremenskom intervalu od

7 s do 21 s. U ovome podpoglavlju obrađena je promjena navedenih karakterističnih dimenzija zone taljenja u funkciji vremena za vršne kutove volframove elektrode od 20° i 45° . Rezultati su prikazani za tri duljine električnog luka (1,5 mm, 3 mm i 6 mm) na kojima su eksperimenti provedeni. U tablicama 5.9, 5.10 i 5.11 prikazane su fotografije makrostrukture odabranih zona taljenja formiranih uz vršne kuteve volframove elektrode od 20° i 45° . Fotografije su podjeljene obzirom na vrijeme zavarivanja i duljinu električnog luka koja je korištena u pojedinom eksperimentu.

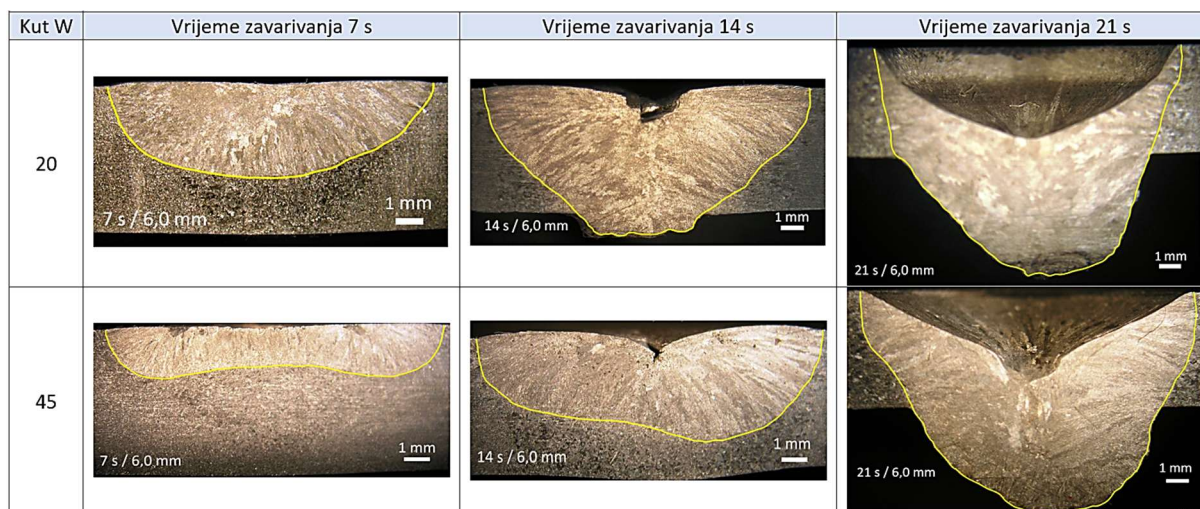
Tablica 5.9 Zone taljenja za različite vršne kutove volframove elektrode i vremena zavarivanja; duljina električnog luka 1,5 mm



Tablica 5.10 Zone taljenja za različite vršne kutove volframove elektrode i vremena zavarivanja; duljina električnog luka 3 mm



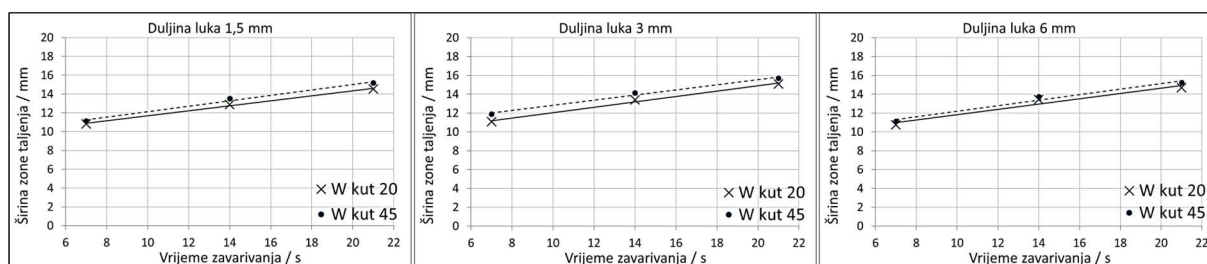
Tablica 5.11 Zone taljenja za različite vršne kutove volframove elektrode i vremena zavarivanja; duljina električnog luka 6 mm



Na slici 5.123 prikazana je vremenska promjena prosječne širine zone taljenja za vršne kutove volframove elektrode od 20 ° i 45 ° uz tri različite duljine električnog luka (1,5 mm, 3 mm i 6 mm). Srednje vrijednosti širine zone taljenja (W) za vremenski interval od 7 s do 21 s i jednadžbe pravaca koje opisuju njezinu promjenu u funkciji vremena zavarivanja (WT) prikazane su u tablici 5.12. Rezultati ukazuju da nije postojala značajnija razlika u dinamici širenja zone taljenja u ovisnosti o vršnom kutu volframove elektrode za sve tri duljine električnog luka. Pravci koji opisuju vremensku promjenu približno se preklapaju. Prosječne brzine rasta širine zone taljenja u promatranom vremenskom intervalu veoma su slične i nalaze su u uskom rasponu od 0,26 mm/s do 0,29 mm/s. Iz podataka se jednostavno može izračunati i prosječna brzina rasta zone taljenja u intervalu od 0 s do 7 s koja je značajno veća, a iznosila je 1,55 mm/s za vršni kut volframove elektrode od 20 ° i 1,63 mm/s za vršni kut od 45 °.

Tablica 5.12 Prosječne širine zone taljenja (mm) i jednadžbe njezine vremenske promjene

Kut W	Duljina luka	Vrijeme zavarivanja			Jednadžba	Broj jednadžbe
		7 s	14 s	21 s		
20 °	1,5 mm	10,83	12,87	14,53	$W = 0,26 \cdot WT + 9,04$	5.37
45 °	1,5 mm	11,13	13,53	15,18	$W = 0,29 \cdot WT + 9,22$	5.38
20 °	3,0 mm	11,08	13,40	15,10	$W = 0,29 \cdot WT + 9,18$	5.39
45 °	3,0 mm	11,88	14,15	15,69	$W = 0,27 \cdot WT + 10,10$	5.40
20 °	6,0 mm	10,75	13,44	14,70	$W = 0,28 \cdot WT + 9,01$	5.41
45 °	6,0 mm	11,14	13,75	15,25	$W = 0,29 \cdot WT + 9,27$	5.42



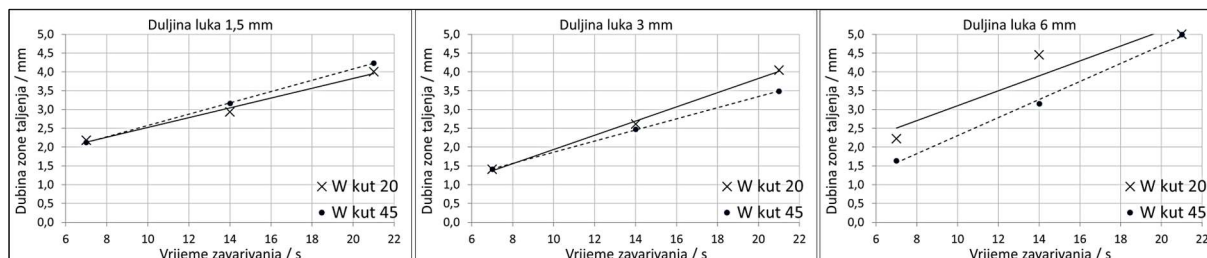
Slika 5.123 Vremenska promjena širine zone taljenja za vršni kut volframove elektrode od 20 ° i 45 ° i različite duljine električnog luka

U tablici 5.13 prikazane su izračunate srednje vrijednosti dubine zone (D) taljenja za vršni kut volframove elektrode od 20 ° i 45 ° i tri vremena stacionarnog TIG zavarivanja. Povećanje vršnog kuta provedeno je za tri električna luka različite duljine (1,5 mm, 3 mm i 6 mm). U istoj tablici prikazane su i jednadžbe pravaca koje opisuju promjenu penetracije u funkciji vremena za interval zavarivanja od 7 s do 14 s.

Tablica 5.13 Prosječne dubine zone taljenja (mm) i jednadžbe njezine vremenske promjene

Kut W	Duljina luka	Vrijeme zavarivanja			Jednadžba	Broj jednadžbe
		7 s	14 s	21 s		
20 °	1,5 mm	2,18	2,93	4,01	$D = 0,13 \cdot WT + 1,22$	5.43
45 °	1,5 mm	2,13	3,17	4,24	$D = 0,15 \cdot WT + 1,07$	5.44
20 °	3,0 mm	1,41	2,61	4,05	$D = 0,19 \cdot WT + 0,05$	5.45
45 °	3,0 mm	1,41	2,48	3,49	$D = 0,15 \cdot WT + 0,39$	5.46
20 °	6,0 mm	2,23	4,46	5,00	$D = 0,20 \cdot WT + 1,12$	5.47
45 °	6,0 mm	1,64	3,16	5,00	$D = 0,24 \cdot WT - 0,10$	5.48

Na slici 5.124 su grafički prikazani navedeni podaci. Prosječne brzine rasta dubine zone taljenja u promatranom vremenskom intervalu nalaze su u rasponu od 0,13 mm/s do 0,24 mm/s. Razlike u dinamici povećanja penetracije obzirom na vršni kut volframove elektrode najizraženije su za električni luk duljine 6 mm gdje je vršni kut od 20 ° iskazao nešto brže postizanje potpune penetracije.

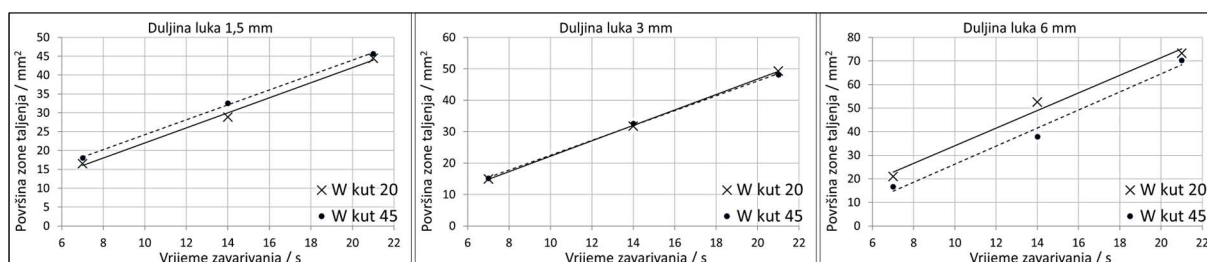


Slika 5.124 Vremenska promjena dubine zone taljenja za vršni kut volframove elektrode od 20 ° i 45 ° i različite duljine električnog luka

U tablici 5.14 prikazane su srednje vrijednosti površine zone taljenja (FZA) u poprečnom presjeku za vršne kutove volframove elektrode od 20 ° i 45 ° te vremena stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s. Eksperimenti su provedeni za duljine električnog luka od 1,5 mm, 3 mm i 6 mm. U istoj tablici su navedene jednadžbe pravaca koje upisuju promjenu prosječne površine zone taljenja u funkciji vremena zavarivanja (WT). Slika 5.125 prikazuje iste podatke grafički. Prosječne brzine rasta površine zone taljenja u promatranom vremenskom intervalu nalaze su u rasponu od 1,98 mm²/s do 3,83 mm²/s. Najveći rast površine zone taljenja postignut je za vršni kut volframove elektrode od 20 ° i to uz duljinu električnog luka od 6 mm.

Tablica 5.14 Prosječne površine zone taljenja (mm²) i jednadžbe njezine vremenske promjene

Kut W	Duljina luka	Vrijeme zavarivanja			Jednadžba	Broj jednadžbe
		7 s	14 s	21 s		
20 °	1,5 mm	16,53	23,89	44,48	$FZA = 2,00 \cdot WT + 2,02$	5.49
45 °	1,5 mm	18,03	32,60	45,71	$FZA = 1,98 \cdot WT + 4,44$	5.50
20 °	3,0 mm	14,98	31,72	49,29	$FZA = 2,45 \cdot WT - 2,31$	5.51
45 °	3,0 mm	15,14	32,59	48,14	$FZA = 2,36 \cdot WT - 1,04$	5.52
20 °	6,0 mm	20,98	52,64	73,30	$FZA = 3,74 \cdot WT - 3,35$	5.53
45 °	6,0 mm	16,66	37,88	70,23	$FZA = 3,83 \cdot WT - 11,98$	5.54



Slika 5.125 Vremenska promjena površine zone taljenja za vršni kut volframove elektrode od 20 ° i 45 ° i različite duljine električnog luka

Istraživanje utjecaja povećanja vršnog kuta volframove elektrode s 20 ° na 45 ° pokazalo je kako vršni kut nije imao bitniji utjecaja na širinu zone taljenja, bez obzira na duljinu električnog luka (1,5 mm, 3 mm i 6 mm). Utjecaj promjene vršnog kuta na penetraciju uz duljine električnog luka od 1,5 mm i 3 mm također nije zabilježen. S druge strane, eksperimenti

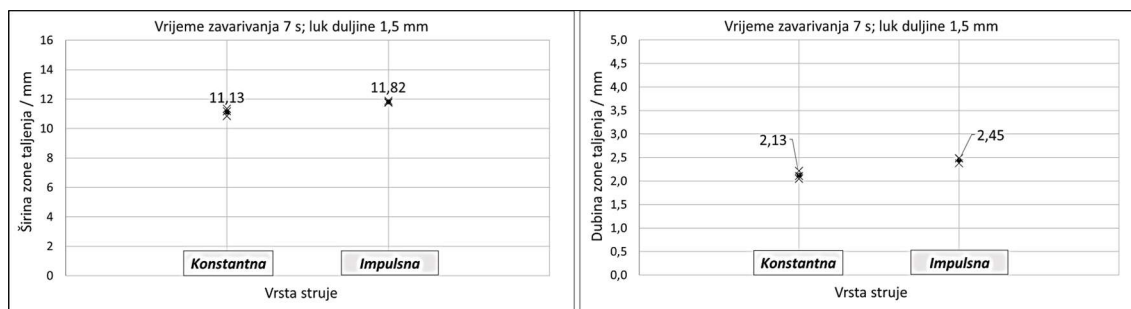
provedeni s električnim lukom duljine 6 mm i vršnim kutom elektrode od 20° rezultirali su većom prosječnom penetracijom i D/W omjerom u odnosu na vršni kut od 45° .

5.6 Utjecaj P-TIG zavarivanja na zonu taljenja

U ovom podpoglavlju provedena je analiza utjecaja impulsnog TIG (P-TIG) zavarivanja na zonu taljenja formiranu na uzorcima od austenitnog nehrđajućeg čelika 316L. Postojeća znanstvena literatura ukazuje na neke od potencijalnih prednosti P-TIG zavarivanja u odnosu na konvencionalni TIG proces poput bolje kontrole nad tekućim metalom, pogodnije mikrostrukture zavara te smanjenog unosa topline u osnovni metal [39], [48]. Osim toga, neka od istraživanja pokazala su kako P-TIG zavarivanje može rezultirati povećanjem dubine penetracije zahvaljujući sužavanju električnog luka na visokim frekvencijama impulsne struje [78]. Karakteristične dimenzije zona taljenja formiranih P-TIG zavarivanjem uspoređene su s konvencionalnim TIG procesom. Za vrijednosti bazne i impulsne struje P-TIG odabrano je 100 A i 200 A što je uz jednako vrijeme trajanja bazne i impulsne faze rezultiralo prosječnom vrijednošću struje od 150 A. Ovako odabrani strujni parametri P-TIG procesa omogućili su njegovu usporedbu s konvencionalnim TIG procesom u kojem se koristila konstantna jakost struje od 150 A. Tako su obje inačice procesa imale jednaku efektivnu jakost struje. Eksperimenti su provedeni za duljine električnog luka od 1,5 mm, 3 mm i 6 mm. Analiza rezultata podijeljena je na tri dijela sukladno različitim vremenima zavarivanja (7 s, 14 s i 21 s) koja su korištena u eksperimentima. Površine svih uzoraka podvrgnute su kontroliranom brušenju i odmašćene neposredno prije zavarivanja. Zaštitni plin na korijenskoj strani uzoraka nije korišten.

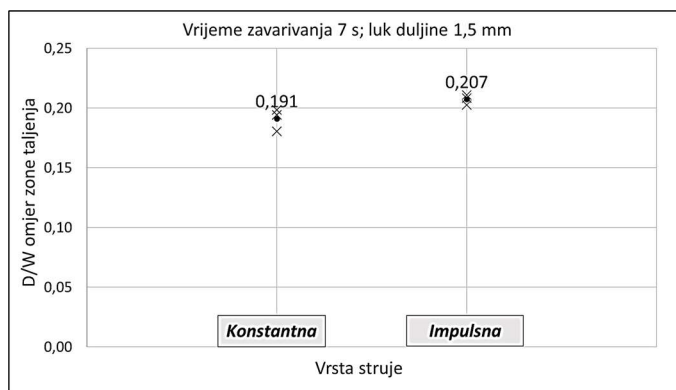
5.6.1 Vrijeme zavarivanja 7 s

Na slici 5.126 prikazane su širine i dubine zona taljenja te pripadne srednje vrijednosti za konvencionalni i impulsni stacionarni TIG proces. Eksperimenti su provedeni uz jednaku efektivnu jakost struje i duljinu električnog luka od 1,5 mm a vrijeme zavarivanja iznosilo je 7 s. Iz rezultata je vidljivo da je promjena konstantne jakosti struje u impulsnu rezultirala manjim povećanjem prosječne širine zone taljenja (6,2 %) i značajnijim povećanjem dubine zone taljenja za 15 %.



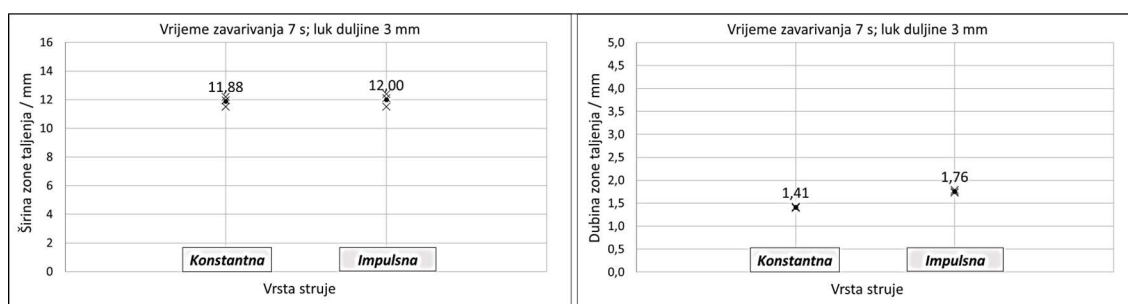
Slika 5.126 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm

Slika 5.127 prikazuje vrijednosti D/W omjera zona taljenja formiranih konvencionalnim i impulsnim stacionarnim TIG procesima uz vrijeme zavarivanja od 7 s i duljinu električnog luka od 1,5 mm. Prosječna vrijednost D/W omjera zone taljenja povećala se za 8,4 % u slučaju P-TIG procesa.



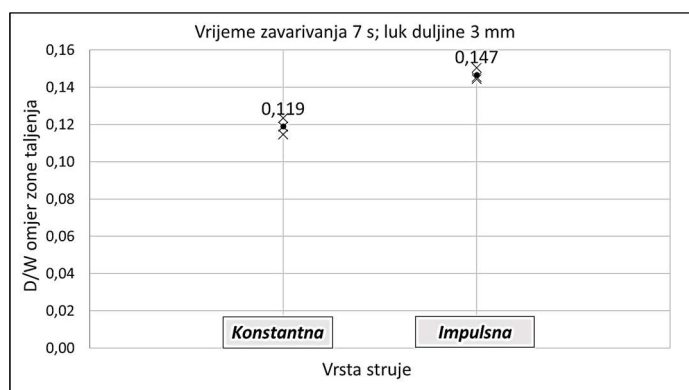
Slika 5.127 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm

Rezultati mjerenja širine i dubine zone taljenja i pripadne srednje vrijednosti za konvencionalni i impulsni TIG proces uz duljinu luka od 3 mm i vrijeme zavarivanja od 7 s vidljivi su na slici 5.128. Zavari formirani P-TIG procesom imali su 24,8 % veću prosječnu penetraciju u odnosu na konvencionalni TIG proces. Prosječna širina zone taljenja nije se bitnije mijenjala (6,2 %).



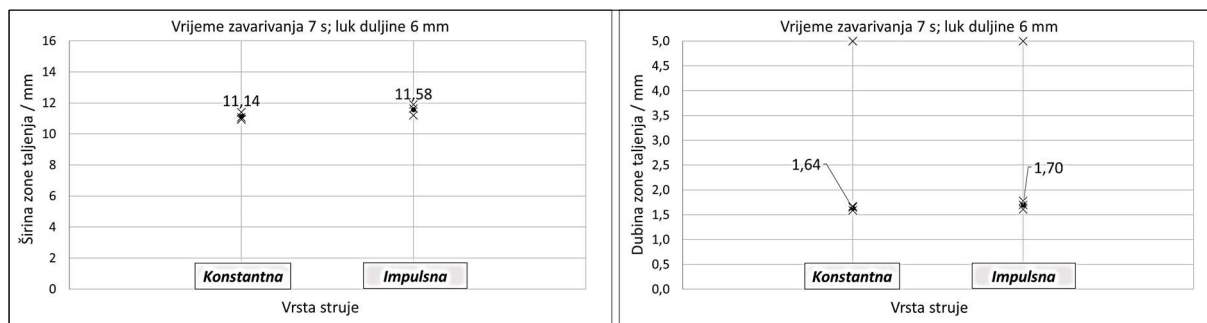
Slika 5.128 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 3 mm

Slika 5.129 prikazuje vrijednosti D/W omjera zona taljenja formiranih konvencionalnim i impulsnim stacionarnim TIG procesima jednake efektivne jakosti struje. Vrijeme zavarivanja iznosilo je 7 s a duljina električnog luka 3 mm. Prosječna vrijednost D/W omjera zone taljenja povećala se za 23,5 % u slučaju P-TIG procesa.



Slika 5.129 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 3 mm

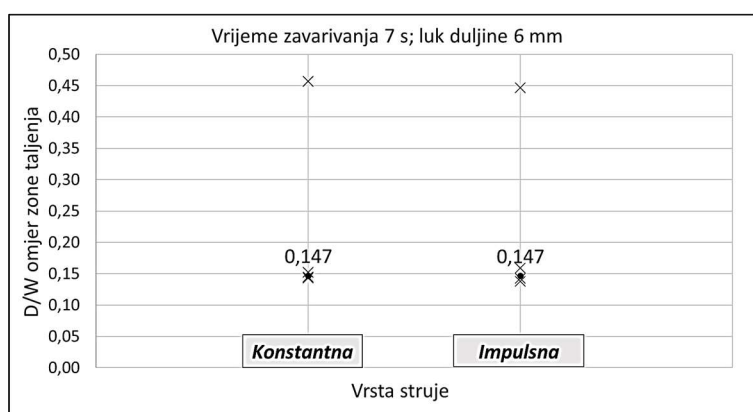
Serijski eksperimenti provedeni su u svrhu usporedbe konvencionalnog i P-TIG procesa uz duljinu električnog luka od 6 mm i vrijeme zavarivanja od 7 s. Rezultati mjerenja širine i dubine rezultirajućih zona taljenja i njihove prosječne vrijednosti prikazane su na slici 5.130.



Slika 5.130 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 6 mm

Prosječna vrijednost širine zone taljenja povećala se za 3,9 % kad se umjesto konvencionalnog TIG procesa koristila P-TIG inačica jednake efektivne jakosti struje. Prosječna dubina zone taljenja povećala se za 3,7 % u slučaju korištenja impulsne struje.

Slika 5.131 prikazuje vrijednosti D/W omjera zona taljenja formiranih konvencionalnim i impulsnim stacionarnim TIG procesima jednake efektivne jakosti struje tijekom 7 s uz duljinu električnog luka od 6 mm. Mjerenja u ovom slučaju pokazuju kako vrsta struje nije imala utjecaja na D/W omjer.



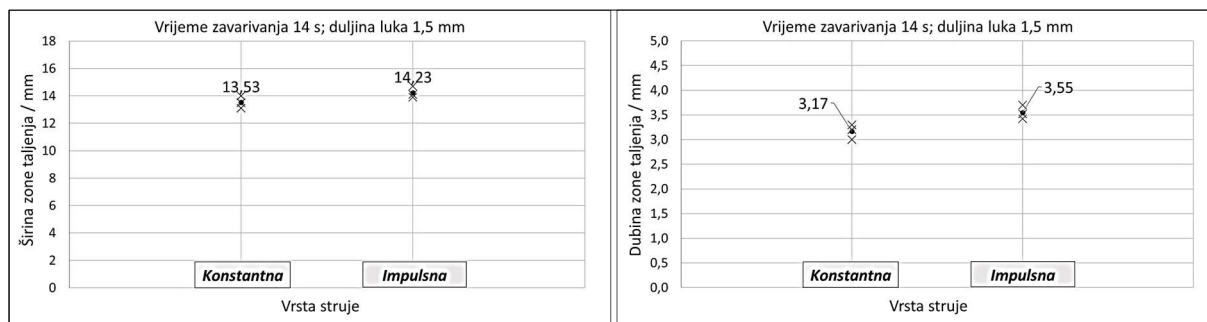
Slika 5.131 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 6 mm

Provedeni eksperimenti omogućili su usporedbu širine i dubine zona taljenja formiranih stacionarnim TIG i P-TIG zavarivanjem jednake efektivne jakosti struje (150 A) tijekom vremena zavarivanja od 7 s. Iz rezultata je vidljivo kao je upotreba impulsne struje u pravilu povećala prosječnu dubinu zone taljenja i njezin D/W omjer. Povećanje nije bilo veoma izraženo za duljinu električnog luka od 6 mm. Vrsta struje nije imala veći utjecaj na prosječnu širinu zona taljenja bez obzira na duljinu električnog luka na kojoj su eksperimenti provedeni.

5.6.2 Vrijeme zavarivanja 14 s

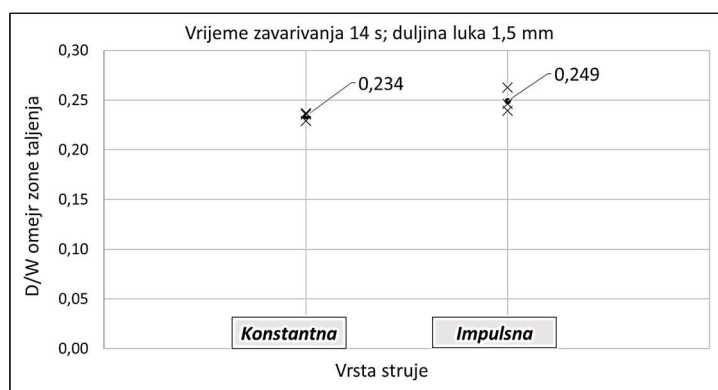
Širine i dubine zone taljenja te njihove srednje vrijednosti za konvencionalni (konstantna jakost struje) i P-TIG proces (impulsna struja) uz duljinu luka od 1,5 mm prikazane su na slici 5.132. Vrijeme djelovanja električnog luka na osnovni metal (316L) iznosilo je 14 s. Prosječna širina

zone taljenja nije se bitnije promjenila kad je konstantna jakost struje zamijenjena impulsnom jednake efektivne jakosti. S druge strane, zone taljenja formirane P-TIG procesom imale su 12 % veću prosječnu penetraciju u odnosu na konvencionalni TIG proces. Sličan odnos utvrđen je za vrijeme zavarivanja od 7 s.



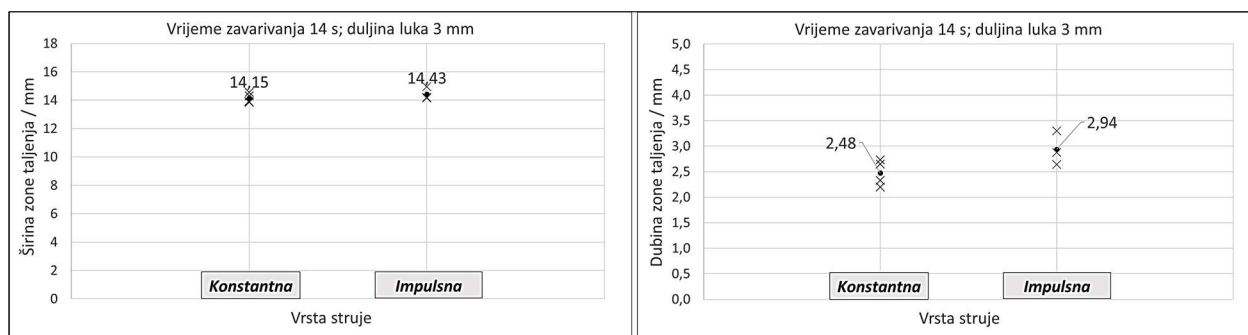
Slika 5.132 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm

Slika 5.133 prikazuje D/W omjere zona taljenja formiranih konvencionalnim i impulsnim stacionarnim TIG procesima. Duljina električnog luka iznosila je 1,5 mm a vrijeme zavarivanja 14 s. Prosječna vrijednost D/W omjera zone taljenja povećala za 6,4 % u slučaju P-TIG procesa koji koristi impulsnu struju za zavarivanje.



Slika 5.133 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm

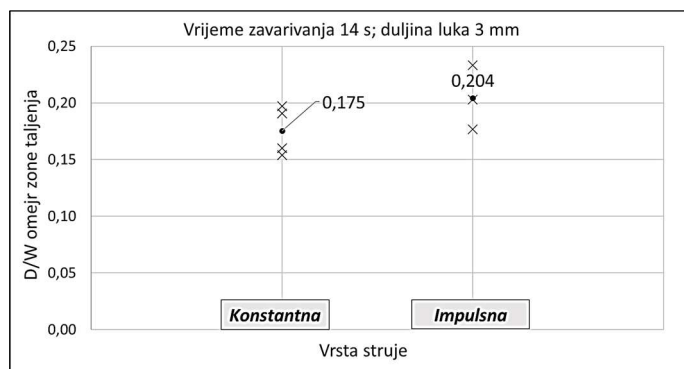
Širine i dubine zone taljenja te njihove srednje vrijednosti za konvencionalni i impulsni TIG proces uz duljinu luka od 3 mm i vrijeme zavarivanja od 14 s uspoređeni su na slici 5.134.



Slika 5.134 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 3 mm

Zone taljenja formirane P-TIG procesom imale su 18,5 % veću prosječnu penetraciju u odnosu na konvencionalni TIG proces. Ova razlika nije bila toliko izražena za vrijeme zavarivanja od 7 s. Prosječna širina zone taljenja nije se bitnije mijenjala obzirom na vrstu korištene struje.

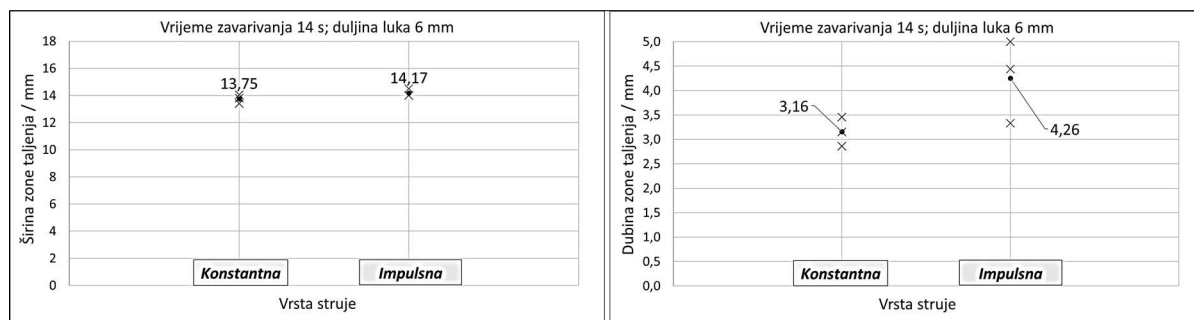
Slika 5.135 prikazuje vrijednosti D/W omjera zona taljenja formiranih konvencionalnim i impulsnim stacionarnim TIG procesima.



Slika 5.135 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 3 mm

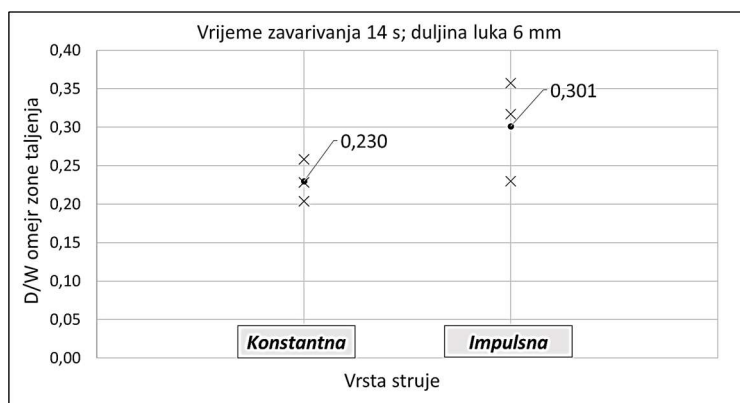
Vrijeme zavarivanja iznosilo je 14 s a duljina luka 6 mm. Vidljivo je značajno povećanje prosječne vrijednosti D/W omjera zone taljenja od 16,6 % u slučaju stacionarnog P-TIG procesa odnosno impulsne struje. Budući da su širine zona taljenja za obje inačice procesa bile podjednake, ovaj rezultat je direktna posljedica povećane dubine zone taljenja kod P-TIG zavarivanja.

Eksperimenti u svrhu usporedbe konvencionalnog i P-TIG procesa uz vrijeme zavarivanja od 14 s provedeni su i za duljinu električnog luka od 6 mm. Širine i dubine rezultirajućih zona taljenja te njihove prosječne vrijednosti prikazane su na slici 5.136. Prosječna vrijednost širine zone taljenja nije se bitnije mijenjala obzirom na inačicu TIG procesa uz jednaku efektivnu jakost struje. Prosječna penetracija bila je veća za značajnih 34,8 % u slučaju P-TIG procesa.



Slika 5.136 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 6 mm

D/W omjeri zona taljenja formiranih konvencionalnim i impulsnim TIG procesima prikazani su na slici 5.137. Vrijeme zavarivanja iznosilo je 14 s a duljina električnog luka 6 mm. Prosječna vrijednost D/W omjera zone taljenja povećala se za značajnih 30,1 % u slučaju P-TIG procesa jer je on povećao dubinu penetracije bez značajnog utjecaja na njezinu širinu.

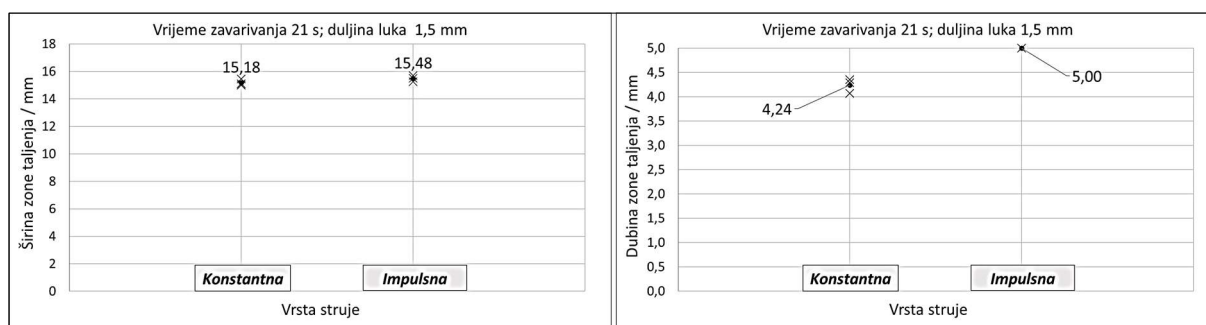


Slika 5.137 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 6 mm

Rezultati prezentirani u ovom podpoglavlju omogućili su usporedbu dimenzija zona taljenja formiranih stacionarnim TIG i P-TIG zavarivanjem jednake efektivne jakosti struje (150 A) tijekom vremena zavarivanja od 14 s. Iz rezultata je vidljivo kao je upotreba impulsne struje povećala prosječnu dubinu zone taljenja i njezin D/W omjer za električni luk duljine 1,5 mm, 3 mm i 6 mm. Snažniji utjecaj vrste struje na prosječnu širinu zona taljenja nije zabilježen. Navedeni nalazi u skladu su s rezultatima za vrijeme zavarivanja od 7 s.

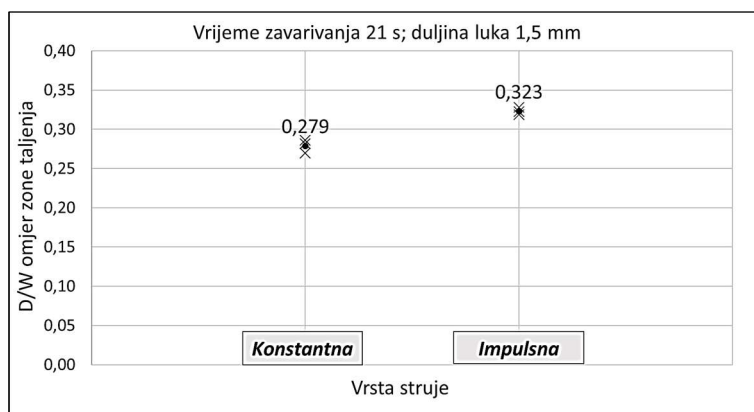
5.6.3 Vrijeme zavarivanja 21 s

Širine zone taljenja, dubine penetracije te njihove srednje vrijednosti za konvencionalni i impulsni TIG proces jednake efektivne jakosti struje uz duljinu luka od 1,5 mm i vrijeme zavarivanja od 21 s uspoređene su na slici 5.138. Zone taljenja formirane P-TIG procesom imale su 17,9 % veću prosječnu penetraciju u odnosu na konvencionalni TIG proces. Štoviše, svi eksperimenti provedeni stacionarnim P-TIG procesom rezultirali su potpunom penetracijom (5 mm). Prosječna širina zone taljenja nije se bitnije mijenjala obzirom na vrstu korištene struje (razlika od 2 %).



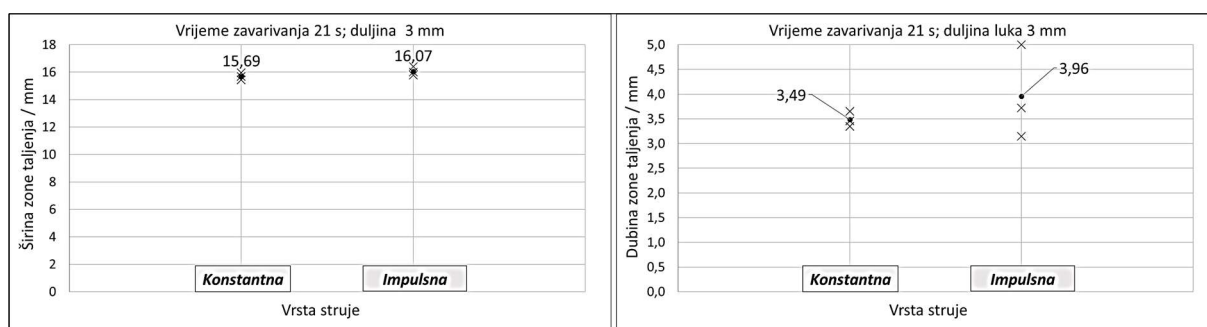
Slika 5.138 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm

Slika 5.139 prikazuje D/W omjere zona taljenja za konvencionalni i impulsni TIG proces jednake efektivne jakosti struje uz vrijeme zavarivanja od 21 s i duljinu električnog luka od 1,5 mm. Prosječna vrijednost D/W omjera zone taljenja povećala se za značajnih 15,8 % u slučaju P-TIG procesa zbog veće dubine penetracije koja je postignuta.



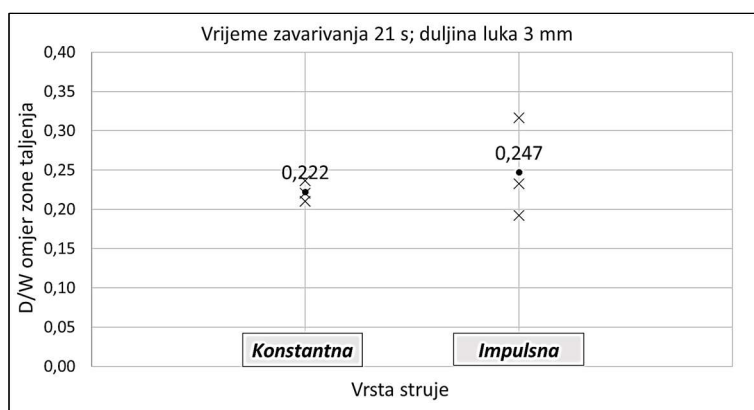
Slika 5.139 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 1,5 mm

Rezultati eksperimenata provedenih u svrhu usporedbe konvencionalnog i P-TIG procesa uz duljinu električnog luka od 3 mm i vrijeme zavarivanja od 21 s prikazani su na slici 5.138. Prosječna širina zone taljenja nije ovisila o tome da li je vrsta struje bila konstantna (konvencionalni TIG) ili impulsna (P-TIG) jednake efektivne jakosti. Međutim, prosječna dubina zone taljenja bila je veća za 13,5 % u slučaju korištenja impulsne struje.



Slika 5.140 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 3 mm

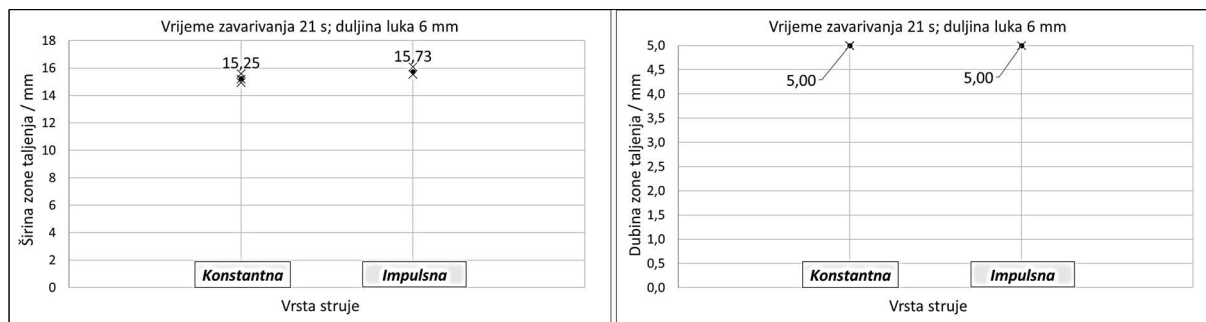
Na slici 5.141 prikazane su vrijednosti D/W omjera zona taljenja i njihove prosječne vrijednosti za konvencionalno i impulsno TIG zavarivanje jednake efektivne jakosti struje.



Slika 5.141 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 3 mm

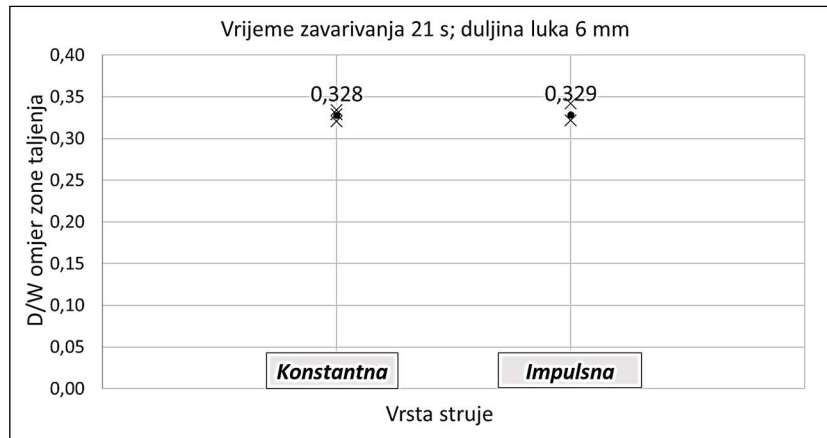
Vrijeme zavarivanja iznosilo je 21 s, a duljina električnog luka 3 mm. Prosječna vrijednost D/W omjera zone taljenja povećala se za 11,3 % u slučaju P-TIG procesa.

Rezultati eksperimenata provedenih uz vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 21 s i duljinu luka od 6 mm za dvije inačice TIG procesa (konvencionalni i impulsni) prikazani su na slici 5.142. Različita vrsta struje jednake efektivne jakosti očito nije imala bitniji utjecaj na prosječnu širinu zone taljenja. Obje inačice procesa su postizale potpunu penetraciju (5 mm) u svim eksperimentima, ali je prosječna površina zone taljenja u slučaju P-TIG procesa bila nešto veća.



Slika 5.142 Usporedba širine i dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina luka 6 mm

Slika 5.143 prikazuje vrijednosti D/W omjera za zone taljenja formirane konvencionalnim i impulsnim stacionarnim TIG procesima jednake efektivne jakosti struje. Vrijeme zavarivanja iznosilo je 21 s a duljina električnog luka 6 mm. Nije bilo veće razlike u D/W omjerima budući da je u oba razmatrana slučaja postignuta potpuna penetracija (5 mm) a širine zona taljenja su bile podjednake.



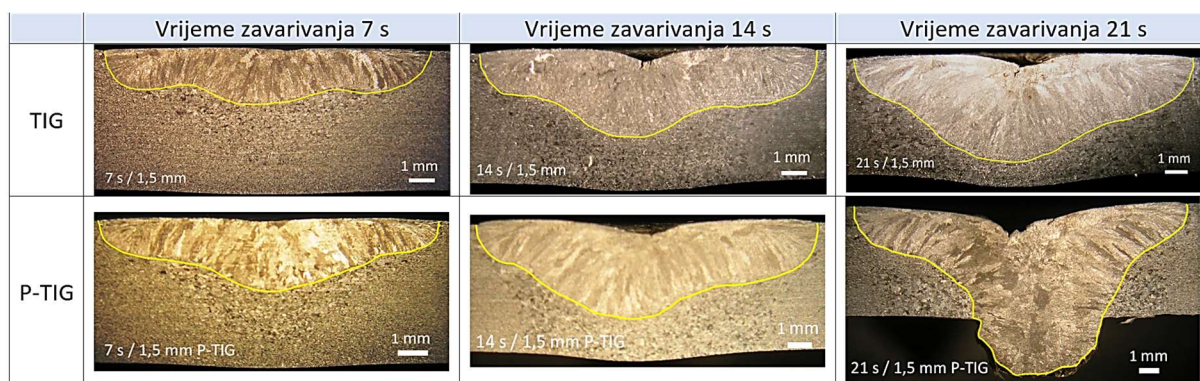
Slika 5.143 Usporedba D/W omjera zone taljenja za TIG i P-TIG; duljina luka 6 mm

Eksperimenti opisani u ovom podpoglavlju omogućili su usporedbu dimenzija zona taljenja formiranih stacionarnim TIG i P-TIG procesima jednake efektivne jakosti struje (150 A) tijekom vremena zavarivanja od 21 s. Iz rezultata je vidljivo kao je upotreba impulsne struje povećala prosječnu dubinu zone taljenja i njezin D/W omjer za električni luk duljine 1,5 mm i 3 mm. Svi eksperimenti provedeni uz duljinu luka od 6 mm rezultirali su potpunom penetracijom od 5 mm ali su zone taljenja formirane P-TIG procesom imale veću površinu poprečnog presjeka. Analogni nalazi utvrđeni su i na kraćim vremenima zavarivanja (7 s i 14 s).

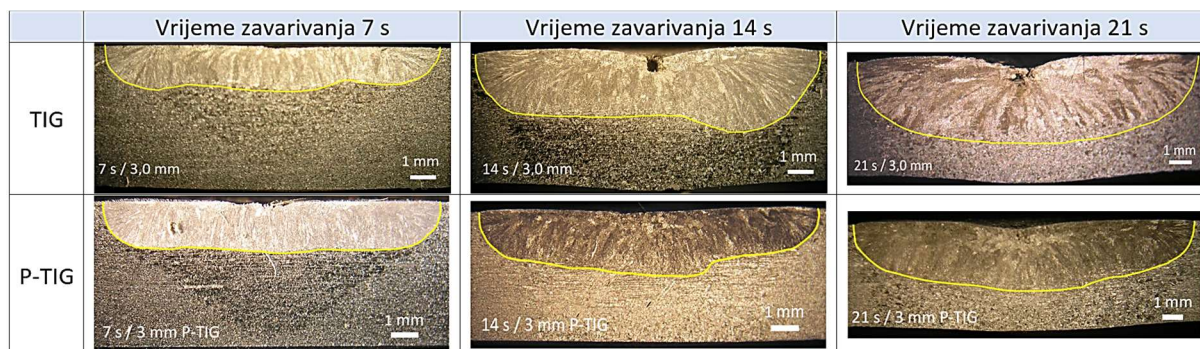
5.6.4 Vremenska evolucija zone taljenja

Istraživanje utjecaja vrste struje kod stacionarnog TIG zavarivanja na zonu taljenja provedeno je za tri različita vremena stacionarnog TIG zavarivanja (7 s, 14 s i 21 s). Dobiveni rezultati pružaju dobar uvid u vremensku evoluciju širine, dubine i površine zone taljenja za konvencionalni i impulsni TIG proces unutar vremenskog intervala od 7 s do 21 s. U ovome podpoglavlju obrađena je promjena navedenih karakterističnih dimenzija zone taljenja u funkciji vremena zavarivanja za dvije navedene inačice TIG procesa koje su u eksperimentima imale jednaku efektivnu jakost struje od 150 A. Rezultati su obrađeni za duljine električnog luka od 1,5 mm, 3 mm i 6 mm na kojima su eksperimenti i provedeni. U tablicama 5.15, 5.16 i 5.17 prikazane su odabrane fotografije makrostrukture zona taljenja formiranih konvencionalnim TIG i P-TIG procesom za tri različite duljine električnog luka. Fotografije su podjeljene obzirom na vrijeme zavarivanja i inačicu stacionarnog TIG procesa koja je korištena za zavarivanje.

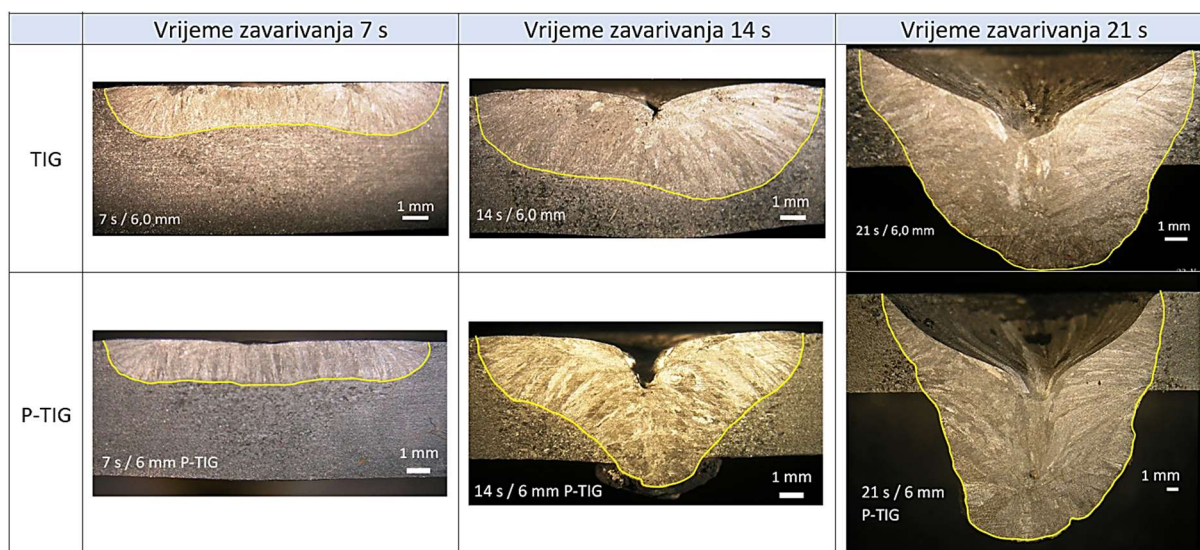
Tablica 5.15 Zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina električnog luka 1,5 mm



Tablica 5.16 Zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina električnog luka 3 mm



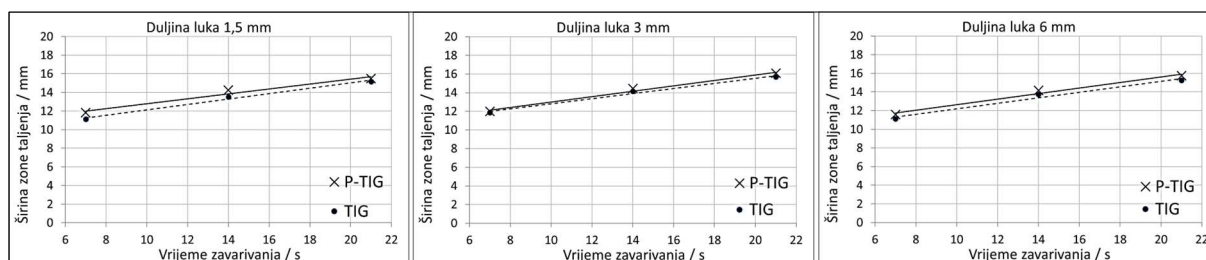
Tablica 5.17 Zone taljenja za TIG i P-TIG proces; duljina električnog luka 6 mm



Na slici 5.144 prikazana je vremenska promjena prosječne širine zone taljenja TIG i P-TIG procese uz tri različite duljine električnog luka (1,5 mm, 3 mm i 6 mm). Srednje vrijednosti širine zone taljenja (W) za vremenski interval od 7 s do 21 s i jednadžbe pravaca koje opisuju njezinu promjenu u funkciji vremena zavarivanja (WT) prikazane su u tablici 5.18. Iz podataka se može zaključiti kako nije postojala značajnija razlika u dinamici širenja zone taljenja bez obzira jesu li one formirane konvencionalnim ili impulsnim TIG zavarivanjem. Ovaj zaključak vrijedi za sve tri duljine električnog luka. Pravci koji opisuju vremensku evoluciju prosječnih širina zona taljenja približno se preklapaju. Prosječne brzine rasta širine zone taljenja u promatranom vremenskom intervalu nalaze su u uskom rasponu od 0,27 mm/s do 0,30 mm/s. Iz dostupnih podataka se može izračunati i prosječna brzina rasta zone taljenja u intervalu od 0 s do 7 s koja je bila značajno veća: prosječno 1,63 mm/s za TIG i 1,69 mm/s za P-TIG inačicu.

Tablica 5.18 Prosječne širine zone taljenja (mm) i jednadžbe njezine vremenske promjene za TIG i P-TIG proces

Proces	Duljina luka	Vrijeme zavarivanja			Jednadžba	Broj jednadžbe
		7 s	14 s	21 s		
TIG	1,5 mm	11,13	13,53	15,18	$W = 0,29 \cdot WT + 9,22$	5.55
P-TIG	1,5 mm	11,82	14,23	15,48	$W = 0,26 \cdot WT + 10,2$	5.56
TIG	3,0 mm	11,88	14,15	15,69	$W = 0,27 \cdot WT + 10,1$	5.57
P-TIG	3,0 mm	12,00	14,43	16,07	$W = 0,29 \cdot WT + 10,01$	5.58
TIG	6,0 mm	11,14	13,75	15,25	$W = 0,29 \cdot WT + 9,27$	5.59
P-TIG	6,0 mm	11,18	14,17	15,73	$W = 0,30 \cdot WT + 9,68$	5.60

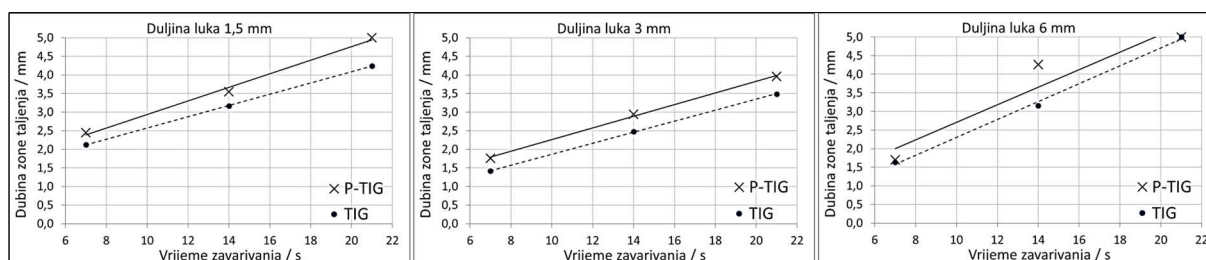


Slika 5.144 Vremenska promjena širine zone taljenja za TIG i P-TIG proces uz različite duljine električnog luka

U tablici 5.19 navedene su izračunate srednje vrijednosti dubine zone taljenja (D) za stacionarni TIG i P-TIG proces uz vrijeme zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s. Eksperimenti su provedeni za tri električna luka različite duljine (1,5 mm, 3 mm i 6 mm). U tablici su prikazane i jednadžbe pravaca koje opisuju promjenu penetracije u funkciji vremena zavarivanja (WT) za interval od 7 s do 14 s. Slika 5.145 grafički prikazuje navedene podatke. Vidljivo je da stacionarni P-TIG proces rezultira većom prosječnom penetracijom za sve tri duljine električnog luka, i to tijekom cijelog intervala od 7 s do 14 s. Pravci koji opisuju vremensku dinamiku procesa približno su paralelni što svjedoči o sličnim brzinama rasta penetracije za TIG i P-TIG proces uz jednaku duljinu električnog luka. Međutim, treba naglasiti kako je brzina rasta penetracije za luk duljine 6 mm (0,24 mm/s) bila primjetno veća u odnosu na duljinu luka 3 mm (0,16 mm/s) i 1,5 mm (0,18 mm/s).

Tablica 5.19 Prosječne dubine zone taljenja (mm) i jednadžbe njezine vremenske promjene za TIG i P-TIG proces

Proces	Duljina luka	Vrijeme zavarivanja			Jednadžba	Broj jednadžbe
		7 s	14 s	21 s		
TIG	1,5 mm	2,13	3,17	4,24	$D = 0,15 \cdot WT + 1,07$	5.61
P-TIG	1,5 mm	2,45	3,55	5,00	$D = 0,18 \cdot WT + 1,12$	5.62
TIG	3,0 mm	1,41	2,48	3,49	$D = 0,15 \cdot WT + 0,39$	5.63
P-TIG	3,0 mm	1,76	2,94	3,96	$D = 0,16 \cdot WT + 0,69$	5.64
TIG	6,0 mm	1,64	3,16	5,00	$D = 0,24 \cdot WT - 0,10$	5.65
P-TIG	6,0 mm	1,70	4,26	5,00	$D = 0,24 \cdot WT + 0,35$	5.66



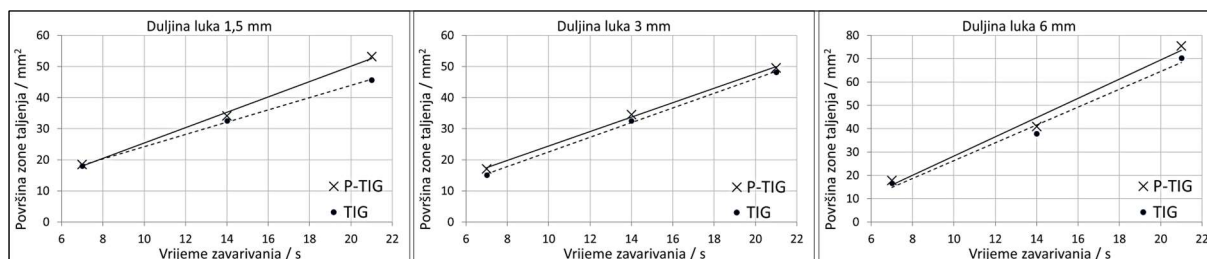
Slika 5.145 Vremenska promjena dubine zone taljenja za TIG i P-TIG proces uz različite duljine električnog luka

U tablici 5.20 prikazane su srednje vrijednosti površine zone taljenja (FZA) u poprečnom presjeku za TIG i P-TIG proces te vremena stacionarnog zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s. Eksperimenti su provedeni za duljine električnog luka od 1,5 mm, 3 mm i 6 mm. U tablici su navedene i jednadžbe pravaca koje opisuju promjenu prosječne površine zone taljenja u funkciji vremena zavarivanja (WT). Ovi podaci grafički su prikazani na slici 5.146. P-TIG proces

rezultirao je nešto većim prosječnim vrijednostima površine zone taljenja u odnosu na konvencionalni TIG proces. Rezultat je očekivan budući da su zone taljenja za dvije inačice TIG procesa imale približno sličnu širinu ali je P-TIG zavarivanje rezultiralo većom prosječnom dubinom penetracije. Brzine povećanja površine zone taljenja našle su se u relativno širokom rasponu od 1,98 mm²/s (konvencionalni TIG, duljina luka 1,5 mm) do 4,12 mm²/s (P-TIG, duljina luka 6 mm).

Tablica 5.20 Prosječne površine zone taljenja (mm²) i jednadžbe njezine vremenske promjene za TIG i P-TIG proces

Proces	Duljina luka	Vrijeme zavarivanja			Jednadžba	Broj jednadžbe
		7 s	14 s	21 s		
TIG	1,5 mm	18,03	32,60	47,51	$FZA = 1,98 \cdot WT + 4,44$	5.67
P-TIG	1,5 mm	18,54	34,14	53,19	$FZA = 2,47 \cdot WT + 0,64$	5.68
TIG	3,0 mm	15,14	32,59	48,14	$FZA = 2,36 \cdot WT - 1,04$	5.69
P-TIG	3,0 mm	17,07	34,53	49,50	$FZA = 2,32 \cdot WT + 1,27$	5.70
TIG	6,0 mm	16,66	37,88	70,23	$FZA = 3,83 \cdot WT - 11,98$	5.71
P-TIG	6,0 mm	17,76	40,94	75,49	$FZA = 4,12 \cdot WT - 13,00$	5.72



Slika 5.146 Vremenska promjena površine zone taljenja za TIG i P-TIG proces uz različite duljine električnog luka

Usporedba konvencionalnog i P-TIG procesa pokazala je kako upotreba impulsne struje povećava prosječnu dubinu penetracije dok istovremeno nema veći utjecaj na prosječnu širinu zone taljenja. Pojava je zabilježena za električne lukove duljine 1,5 mm, 3 mm i 6 mm i vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s.

5.7 Utjecaj istraženih faktora na D/W omjer zone taljenja

U tablici 5.21 zbirno su navedeni faktori čiji je utjecaj na zonu taljenja kod stacionarnog TIG zavarivanja čelika 316L istražen. Za svaki od faktora navedena je maksimalna postignuta vrijednost D/W omjera zone taljenja i vrijednost ili kategorija za koje je taj maksimum ostvaren. Faktori su istraženi jedan po jedan, jednostavnom OVAT metodom čiji je glavni nedostatak nemogućnost utvrđivanja interakcije među parametrima. Unatoč tome, unutar okvira provedenog istraživanja, može se tvrditi kako je za povećanje D/W omjera zone taljenja kod stacionarnog autogenog TIG zavarivanja austenitnog nehrđajućeg čelika 316L poželjno odabrati zaštitu korijenske strane zavora minimalno potrebnim protokom argona, duljinu električnog luka od 6 mm, vršni kut volframove elektrode od 20 ° i impulsnu inačicu TIG procesa.

Tablica 5.21 Maksimalni postignuti D/W omjer zone taljenja za istražene faktore

Istraženi faktor	Maksimalni postignuti D/W	Vrijednost ili kategorija faktora za maksimalni postignuti D/W
Vrsta zaštitnog plina na korijenskoj strani zavara	0,248	Argon 10 l/min
Protok zaštitnog plina na korijenskoj strani zavara	0,305	Argon 4 l/min
Stanje površine osnovnog metala	faktor nema utjecaja	-
Duljina električnog luka	0,328	6 mm
Vršni kut volframove elektrode	0,340	20 °
Vrsta struje	0,329	Impulsna (P-TIG)

6. ZAKLJUČCI

Kroz ovu doktorsku disertaciju istražen je utjecaj autogenog stacionarnog TIG zavarivanja na profil penetracije kod austenitnog nehrđajućeg čelika 316L. Stacionarna zavarivačka konfiguracija nije dovoljno zastupljena u postojećoj znanstvenoj literaturi unatoč tome što se na njoj temelji proces točkastog zavarivanja. Osim toga, stacionarno djelovanje električnog luka na osnovni metal prisutno je na početku svakog zavarenog spoja, u fazi formiranja taline. Jedna od glavnih eksperimentalnih varijabli u ovom istraživanju bilo je vrijeme zavarivanja koje je iznosilo 7 s, 14 s ili 21 s. Eksperimenti su provedeni na uzorcima dimenzija 100 mm x 100 mm debljine 5 mm uz jakost istosmjerne struje od 150 A. Na temelju provedenog istraživanja i analize dobivenih rezultata izvedeni su sljedeći zaključci:

- Mjerenja ukazuju kako upotreba argona na korijenskoj strani zavara u odnosu na helij povećava prosječnu dubinu zone taljenja i njezin D/W omjer za približno 20 % kod dužeg vremena stacionarnog TIG zavarivanja (14 s i 21 s). Vrsta plina na korijenskoj strani zavara nije utjecala na širinu zone taljenja bez obzira na vrijeme zavarivanja.
- Protok zaštitnog plina na korijenskoj strani zavara kod dužeg vremena stacionarnog TIG zavarivanja može utjecati na penetraciju i D/W omjer. Povećanje protoka argona i helija na korijenskoj strani zavara s 4 l/min na 10 l/min imalo je suprotno djelovanje na dubinu penetracije i D/W omjer zone taljenja: u slučaju argona prosječna penetracija i D/W omjer smanjili su se približno 20 % dok su se u slučaju helija povećali za sličan iznos.
- Utvrđeno je kako stanje površine nehrđajućeg čelika nema značajniji utjecaj na dubinu i širinu zone taljenja kod stacionarnog TIG zavarivanja.
- Promjena duljine električnog luka u rasponu od 1,5 mm do 6 mm iskazala je značajan utjecaj na penetraciju i D/W omjer zone taljenja za vrijeme zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s. Povećanjem duljine luka s 1,5 mm na 3 mm prosječna penetracija i D/W omjer smanjili su se približno 25 %, a zatim opet povećali za više od 30 % za luk duljine 6 mm koji je rezultirao najvećom prosječnom penetracijom. Promjena duljine luka nije bitnije utjecala na širinu zone taljenja.
- Utjecaj promjene vršnog kuta volframove elektrode na dubinu penetracije uz duljine električnog luka od 1,5 mm i 3 mm nije zabilježen. Međutim, eksperimenti provedeni uz duljinu električnog luka od 6 mm i vršni kut elektrode od 20 ° rezultirali su gotovo 40 % većom penetracijom i D/W omjerom u odnosu na vršni kut od 45 ° za vrijeme zavarivanja od 7 s i 14 s. Vršni kut elektrode nije imao veći utjecaj na širinu zone taljenja.
- Usporedba impulsnog TIG zavarivanja (P-TIG) i konvencionalnog TIG procesa jednake efektivne jakosti struje provedena je za duljine električnog luka od 1,5 mm, 3 mm i 6 mm te vrijeme stacionarnog TIG zavarivanja od 7 s, 14 s i 21 s. Utvrđeno je da impulsno TIG zavarivanje u prosjeku povećava dubinu zone taljenja i njezin D/W omjer za gotovo 20 % bez većeg utjecaja na njezinu širinu.

Na temelju opsežnog istraživanja utjecaja stacionarnog TIG procesa na profil penetracije kod austenitnog nehrđajućeg čelika (316L) može se potvrditi postavljena hipoteza kako je odabirom prikladnih parametara moguće postići željeni profil zone taljenja. Za maksimizaciju D/W omjera zone taljenja u okvirima ovog istraživanja potrebno je odabrati što manji protok argona na korijenskoj strani zavara, duljinu električnog luka od 6 mm, vršni kut volframove elektrode od 20 ° i impulsnu inačicu TIG procesa.

Svakako treba naglasiti kako su ponavljanjem zavarivačkih eksperimenata pod jednakim zavarivačkim parametrima utvrđena značajna rasipanja u dubini penetraciji kod uzoraka koji

potječu iz iste šarže i načelno imaju jednak kemijski sastav. Zapažena pojava bila je posebno naglašena kod dužeg vremena stacionarnog zavarivanja u prisutnosti veće količine tekućeg metala, a vjerojatno je povezana s lokalnim promjenama količine površinskih aktivnih elemenata (S, O) u osnovnom metalu. Ovaj nalaz sugerira da bi se kod automatiziranog zavarivanja nehrđajućeg čelika mogle očekivati poteškoće s ostvarivanjem konstantne dubine penetracije.

Kvantitativni dio rezultata ovog istraživanja ograničen na osnovni metal (316L) debljine 5 mm. Analogno istraživanje s promjenom debljine osnovnog metala generiralo bi novi skup podataka koji bi se mogao korelirati s postojećim i tako opisati utjecaj debljine osnovnog metala na dimenzije zone taljenja. Štoviše, sistematizirano prikupljanje ovakvih rezultata može biti dobar temelj za bazu podataka koja bi poboljšala mogućnost predviđanja dimenzija zone taljenja na temelju odabranih zavarivačkih parametara te vrste i debljine osnovnog metala.

Također, u ovom istraživanju nije provedena analiza kemijskog sastava osnovnog metala s ciljem određivanja točnih udjela (ppm) površinskih aktivnih elemenata (S, O) na lokaciji djelovanja električnog luka prije i poslije zavarivanja. Ova analiza bi se mogla provesti u budućem istraživanju što bi moglo još bolje razjasniti zabilježene razlike u dubini zona taljenja formiranih pod jednakim zavarivačkim parametrima. Iako metodološki veoma složeno, snimanje smjera i intenziteta strujanja površine tekućeg metala pomoću odgovarajuće opreme pružilo bi vrijedne informacije o konvektivnom prijenosu topline u talini.

LITERATURA

- [1] J. C. Lippold, D. J. Kotecki, *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2005.
- [2] American Welding Society, *Welding Handbook: Welding Processes, Part 1*, American Welding Society, Miami, 2004.
- [3] M. Tanaka, *Gas Tungsten Arc Welding*, Springer, Singapore, 2019.
- [4] L. Aucott, H. Dong, W. Mirihanage, R. Atwood, A. et al. Kidess, Revealing internal flow behaviour in arc welding and additive manufacturing of metals, *Nature Communications*, 9, 1–7, 2018.
- [5] J. F. Lancaster, *The Physics of Welding*, Pergamon Press, Oxford, 1986.
- [6] A. B. Murphy, J. J. Lowke, *Heat Transfer in Arc Welding*, Springer International Publishing, Cham, 2018.
- [7] S. Kou, Fluid flow and solidification in welding: Three decades of fundamental research at the University of Wisconsin, *Welding Journal*, 91, 287–302, 2012.
- [8] T. DebRoy, S. A. David, Physical processes in fusion welding, *Reviews of Modern Physics*, 67, 85–112, 1995.
- [9] A. Shirali, K. Mills, The effect of welding parameters on penetration in GTA welds, *Welding journal*, 72, 347–353, 1993.
- [10] S. P. Lu, H. Fujii, K. Nogi, T. Sato, Effect of oxygen content in He-O₂ shielding gas on weld shape in ultra deep penetration TIG, *Science and Technology of Welding and Joining*, 12, 689–695, 2007.
- [11] M. Stadler, P. Freton, J. J. Gonzalez, Influence of welding parameters on the weld pool dimensions and shape in a TIG configuration, *Applied Sciences*, 7, 1–16, 2017.
- [12] M. Abu-Aesh, M. Taha, A. El-Sabbagh, L. Dorn, Welding of fully –Austenitic stainless steel using pcgtaw process; Part I: Bead structure, *Journal of Manufacturing Processes*, 38, 21–29, 2019.
- [13] D. Pandya, A. Badgujar, N. Ghetiya, A novel perception toward welding of stainless steel by activated TIG welding: a review, *Materials and Manufacturing Processes*, 36, 877–903, 2021.
- [14] Y. Feng, Z. Luo, Z. Liu, Y. Li, Y. Luo, Y. Huang, Keyhole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel, *Materials and Design*, 85, 24–31, 2015.
- [15] K. C. Mills, B. J. Keene, Factors affecting variable weld penetration, *International Materials Reviews*, 35, 185–216, 1990.
- [16] S. A. Vendan, L. Gao, A. Garg, P. Kavitha, G. Dhivyasri, R. SG, *Interdisciplinary Treatment to Arc Welding Power Sources*, Springer, Singapore, 2019.
- [17] P. W. Muncaster, *Practical TIG (GTA) welding*, Abington Publishing, Cambridge, 1991.
- [18] K. C. Hsu, K. Etemadi, E. Pfender, Study of the free-burning high-intensity argon arc, *Journal of Applied Physics*, 54, 1293–1301, 1983.
- [19] American Welding Society, *Welding Handbook: Welding Science and Tehnology*, American Welding Society, Miami, 2001.

- [20] A. Javidi Shirvan, I. Choquet, A review of cathode-arc coupling modeling in GTAW, *Welding in the World*, 60, 821–835, 2016.
- [21] M. Tanaka, J. J. Lowke, Predictions of weld pool profiles using plasma physics, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40, 1–23, 2007.
- [22] A. Javidi Shirvan, "Modelling of Electric Arc Welding : arc-electrode coupling", doktorska disertacija, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2013.
- [23] O. H. Nestor, Heat Intensity and Current Density Distributions at the Anode of High Current, Inert Gas Arcs, *Journal of Applied Physics*, 33, 1638–1648, 1962.
- [24] S. C. Snyder, R. E. Bentley, A measurement of axial velocity and temperature in a free-burning arc using Thomson scattering, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29, 3045–3049, 1996.
- [25] M. L. Lin, T. W. Eagar, Pressures produced by gas tungsten arcs, *Metallurgical Transactions B*, 17, 601–607, 1986.
- [26] N. Stenbacka, I. Choquet, K. Hurtig, Review of Arc Efficiency Values for Gas Tungsten Arc Welding, *IIW Commission IV-XII-SG212*, 1–21, 2012.
- [27] G. M. D. Cantin, J. A. Francis, Arc power and efficiency in gas tungsten arc welding of aluminium, *Science and Technology of Welding and Joining*, 10, 200–210, 2005.
- [28] J. Haidar, A. J. D. Farmer, Surface temperature measurements for tungsten-based cathodes of high-current free-burning arcs, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 28, 2089–2094, 1995.
- [29] M. Tanaka, H. Terasaki, M. Ushio, J. J. Lowke, A unified numerical modeling of stationary tungsten-inert-gas welding process, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33, 2043–2052, 2002.
- [30] A. B. Murphy, A Perspective on Arc Welding Research: The Importance of the Arc, Unresolved Questions and Future Directions, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 35, 471–489, 2015.
- [31] F. Matsuda, M. Ushio, T. Kumagai, Fundamental arc characteristics of La-, Y- and Ce-oxide tungsten electrodes, *Welding International*, 3, 497–502, 1989.
- [32] F. Lago, J. J. Gonzalez, P. Freton, A. Gleizes, A numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: Part I. The two-dimensional model, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37, 883–897, 2004.
- [33] J. J. Lowke, M. Tanaka, 'LTE-diffusion approximation' for arc calculations, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39, 3634–3643, 2006.
- [34] R. Bini, M. Monno, M. I. Boulos, Numerical and experimental study of transferred arcs in argon, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39, 3253–3266, 2006.
- [35] G. M. Oreper, J. Szekely, Heat and fluid-flow phenomena in weld pools, *Journal of Fluid Mechanics*, 147, 53–79, 1984.
- [36] F. Wu, K. V. Falch, D. Guo, P. English, M. Drakopoulos, W. Mirihanage, Time evolved force domination in arc weld pools, *Materials & Design*, 190, 1–8, 2020.
- [37] R. I. Hsieh, Y. T. Pan, H. Y. Liou, Study of minor elements and shielding gas on penetration in TIG welding of type 304 stainless steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 8, 68–74, 1999.
- [38] R. E. Leitner, G. H. McElhinney, E. L. Pruitt, An Investigation of Pulsed GTA Welding

Variables, *Welding Journal*, 62, 405–410, 1973.

[39] C. L. Tsai, C. A. Hou, Theoretical analysis of weld pool behavior in the pulsed current GTAW process, *Journal of Heat Transfer*, 110, 160–165, 1988.

[40] R. Sarrafi, R. Kovacevic, Cathodic cleaning of oxides from aluminum surface by variable-polarity arc, *Welding Journal*, 89, 1–10, 2010.

[41] L. H. Phan, S. Tashiro, H. Van Bui, T. Suga, T. Sato, M. Tanaka, Investigating cathode spot behavior in argon alternating current tungsten inert gas welding of aluminum through experimental observation, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52, 1–8, 2019.

[42] L. H. Phan, S. Tashiro, H. Van Bui, T. Suga, T. Sato, M. Tanaka, Influence of shielding gas on cathode spot behaviours in alternating current tungsten inert gas welding of aluminium, *Science and Technology of Welding and Joining*, 25, 258–264, 2020.

[43] M. Tanaka, S. Tashiro, T. Satoh, A. B. Murphy, J. J. Lowke, Influence of shielding gas composition on arc properties in TIG welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 13, 225–231, 2008.

[44] A. Durgutlu, Experimental investigation of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas on TIG welding of austenitic stainless steel, *Materials and Design*, 25, 19–23, 2004.

[45] S. Lu, H. Fujii, K. Nogi, Arc ignitability, bead protection and weld shape variations for He-Ar-O₂ shielded GTA welding on SUS304 stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 1231–1239, 2009.

[46] J. F. Key, Anode/Cathode Geometry and Shielding Gas Interrelationships in GTAW, *Welding Journal*, 59, 364–370, 1980.

[47] P. Burgardt, C. R. Heiple, Interaction between Impurities and Welding Variables in Determining GTA Weld Shape, *Welding Journal*, 2, 150–155, 1986.

[48] American Welding Society, *Welding Handbook: Materials and Applications, Part 1*, American Welding Society, Miami, 2011.

[49] ASM International, *ASM Metals Handbook Volume 1 - Properties and Selections - Irons Steels and High and Performance*, ASM International, Ohio, 1993.

[50] American Welding Society, *AWS A30M/A3.0 - Standard Welding Terms and Definitions*, American Welding Society, Miami, 2010.

[51] J. C. Lippold, *Welding Metallurgy and Weldability*, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, 2015.

[52] E. Folkhard, *Welding Metallurgy of Stainless Steels*, Springer Vienna, Vienna, 1988.

[53] V. Kujanpaa, N. Suutala, T. Takalo, T. Moisio, Correlation Between Solidification Cracking and Microstructure in Austenitic and Austenitic-Ferritic Stainless Steel Welds, *Welding Research International*, 9, 55–76, 1979.

[54] R. E. Craine, On determining the shape of weld pools, *Applied Scientific Research*, 44, 261–275, 1987.

[55] M. L. Lin, T. W. Eagar, Influence of Arc Pressure on Weld Pool Geometry, *Welding Journal*, 64, 163–169, 1985.

[56] M. Tanaka, T. Shimizu, H. Terasaki, M. Ushio, F. Koshi-Ishi, C. L. Yang, Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, 5, 397–402, 2000.

- [57] R. S. Vidyarthi, D. K. Dwivedi, Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration, *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 211–228, 2016.
- [58] S. Mohan Kumar, N. Siva Shanmugam, Studies on the weldability, mechanical properties and microstructural characterization of activated flux TIG welding of AISI 321 austenitic stainless steel, *Materials Research Express*, 5, 1–47, 2018.
- [59] E. Ahmadi, A. R. Ebrahimi, Welding of 316L Austenitic Stainless Steel with Activated Tungsten Inert Gas Process, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 1065–1071, 2015.
- [60] K. A. Yushchlnko, D. V. Kovalenko, I. V. Krivtsun, V. F. Demchenko, I. V. Kovalenko, A. B. Lesnoy, Experimental studies and mathematical modelling of penetration in TIG and A-TIG stationary arc welding of stainless steel, *Welding in the World*, 53, 253–263, 2009.
- [61] C. R. Heiple, J. R. Roper, Mechanism for Minor Element Effect on GTA Fusion Zone Geometry, *Welding Journal*, 61, 97–102, 1982.
- [62] W. Pitscheneder, T. DebRoy, K. Mundra, R. Ebner, Role of sulfur and processing variables on the temporal evolution of weld pool geometry during multikilowatt laser beam welding of steels, *Welding Journal*, 75, 71–80, 1996.
- [63] A. Rodrigues, A. Loureiro, Effect of shielding gas and activating flux on weld bead geometry in tungsten inert gas welding of austenitic stainless steels, *Science and Technology of Welding and Joining*, 10, 760–765, 2005.
- [64] B. Pollard, Effects of Minor Elements on the Welding Characteristics of Stainless Steel, *Welding Journal*, 67, 202–214, 1988.
- [65] Y. Takeuchi, R. Takagi, T. Shinoda, Effect of bismuth on weld joint penetration in austenitic stainless steel, *Welding journal*, 71, 283–290, 1992.
- [66] N. S. Tsai, T. W. Eagar, Distribution of the Heat and Current Fluxes in Gas Tungsten Arcs, *Metallurgical Transactions B*, 16, 841–846, 1985.
- [67] S. Lu, H. Fujii, K. Nogi, Sensitivity of Marangoni convection and weld shape variations to welding parameters in O₂-Ar shielded GTA welding, *Scripta Materialia*, 51, 271–277, 2004.
- [68] H. Huang, S. Shyu, K. Tseng, C. Chou, Effects of the Process Parameters on Austenitic Stainless Steel by TIG-Flux Welding, *Journal of Materials Science & Technology*, 22, 367–374, 2006.
- [69] H. Jamshidi Aval, A. Farzadi, S. Serajzadeh, A. H. Kokabi, Theoretical and experimental study of microstructures and weld pool geometry during GTAW of 304 stainless steel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42, 1043–1051, 2009.
- [70] M. Vasudevan, Effect of A-TIG Welding Process on the Weld Attributes of Type 304LN and 316LN Stainless Steels, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 1325–1336, 2017.
- [71] P. K. Giridharan, N. Murugan, Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 478–489, 2009.
- [72] S. W. Shyu, H. Y. Huang, K. H. Tseng, C. P. Chou, Study of the performance of stainless steel A-TIG welds, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17, 193–201, 2008.
- [73] S. Lu, H. Fujii, K. Nogi, Weld shape variation and electrode oxidation behavior under Ar-(Ar-CO₂) double shielded GTA welding, *Journal of Materials Science and Technology*, 26,

170–176, 2010.

[74] H. Y. Huang, Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments, *Materials and Design*, 30, 2404–2409, 2009.

[75] K. H. Tseng, C. P. Chou, The study of nitrogen in argon gas on the angular distortion of austenitic stainless steel weldments, *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 139–144, 2003.

[76] G. Lothongkum, E. Viyanit, P. Bhandhubanyong, Study on the effects of pulsed TIG welding parameters on delta-ferrite content, shape factor and bead quality in orbital welding of AISI 316L stainless steel plate, *Journal of Materials Processing Technology*, 110, 233–238, 2001.

[77] S. Tathgir, A. Bhattacharya, T. K. Bera, Influence of current and shielding gas in TiO₂ flux activated TIG welding on different graded steels, *Materials and Manufacturing Processes*, 30, 1115–1123, 2015.

[78] B. J. Qi, M. X. Yang, B. Q. Cong, F. J. Liu, The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66, 1545–1553, 2013.

[79] K. H. Tseng, C. P. Chou, Effect of pulsed gas tungsten arc welding on angular distortion in austenitic stainless steel weldments, *Science and Technology of Welding and Joining*, 6, 149–153, 2001.

[80] E. Taban, E. Kaluc, T. S. Aykan, Effect of the purging gas on properties of 304H GTA welds, *Welding Journal*, 93, 2014.

[81] E. M. Westin, M. M. Johansson, R. F. A. Pettersson, Effect of nitrogen-containing shielding and backing gas on the pitting corrosion resistance of welded lean duplex stainless steel LDX 2101® (EN 1.4162, UNS S32101), *Welding in the World*, 57, 467–476, 2013.

[82] P. Panmongkol, I. Phung-on, Effect of backing gas mixtures on corrosion properties of stainless steel grade 304 weld metal by autogenous GTAW, *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 1559–1570, 2021.

[83] M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender, *Thermal Plasmas - Fundamentals and Applications - Volume I*, Springer Science+Business Media, New York, 1994.

[84] D. Kojundžić, N. Krnić, I. Samardžić, P. Konjatić, Influence of Purging Gas on 316L Stainless Steel Fusion Zone in Autogenous Stationary TIG Welding, *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, 29, 1–10, 2022.

[85] S. Mishra, T. J. Lienert, M. Q. Johnson, T. DebRoy, An experimental and theoretical study of gas tungsten arc welding of stainless steel plates with different sulfur concentrations, *Acta Materialia*, 56, 2133–2146, 2008.

PRILOZI

Arduino mikrokontroler C++ kod

```
// instaliraj Timer biblioteku i kreiraj millisDelay instancu
#include <millisDelay.h>
millisDelay relayDelay;

// instaliraj biblioteku za LCS displej i kreiraj LiquidCrystal instancu
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal my_LCD(12,11,5,4,3,2);

// inicijaliziranje varijabli koje će se koristiti u programu
const int ledPin = 7;           // izlaz za LED signalno svjetlo
const int ldrPin = A1;          // analogni pin za LDR senzor
const int relayPin = 6;         // izlaz za relej

const int button1Pin = 9;       // tipka za upravljanje
const int button2Pin = 8;       // tipka za upravljanje
const int overButton = 10;      // tipka za upravljanje

int threshold = 850;            // granična vrijednost svjetlosnog intenziteta - KALIBRIRATI
int passFlag = 0;               // varijabla za upravljanje programskog toka

long unsigned button1Counter = 0; // brojač za podešavanje vremena
long unsigned button1State = 0;   // stanje tipke (0 ili 1)
long unsigned lastbutton1State = 0; // stanje tipke (0 ili 1)
long unsigned button2Counter = 0; // brojač za podešavanje vremena
long unsigned button2State = 0;   // stanje tipke (0 ili 1)
long unsigned lastbutton2State = 0; // stanje tipke (0 ili 1)
long unsigned counter = 0;         // brojač
int overButtonState = 0;           // tipka za upravljanje
int overFlag = 0;                  // varijabla za upravljanje programskog toka

// SETUP funkcija
void setup() {

  Serial.begin(9600);              // prijenos podataka na PC

  my_LCD.begin(16,2);              // podešavanje LCD objekta
  my_LCD.setCursor(0,0);           // podešavanje LCD objekta

  pinMode(ledPin, OUTPUT);         // odabir moda za pin (input ili output)
  pinMode(relayPin, OUTPUT);       // odabir moda za pin (input ili output)
  pinMode(ldrPin, INPUT);          // odabir moda za pin (input ili output)

  digitalWrite(relayPin, LOW);     // inicijalno stanje pina

  pinMode(button1Pin, INPUT_PULLUP); // odabir moda za pin (input ili output)
```

```
pinMode(button2Pin, INPUT_PULLUP);           // odabir moda za pin (input ili output)
pinMode(overButton, INPUT_PULLUP);           // odabir moda za pin (input ili output)
}
```

```
// glavna petlja u programu
```

```
void loop() {
```

```
    // brojanje pritisaka tipke za upravljanje
```

```
    button1State = digitalRead(button1Pin);
```

```
    // usporedba s prijašnjim stanjem tipke za upravljanje
```

```
    if (button1State != lastbutton1State) {
```

```
        // u slučaju promjene stanja dodaj 1 varijabli brojača
```

```
        if (button1State == LOW) {
```

```
            button1Counter++;
```

```
            // Serial.print("number of button1 pushes: "); // kod za debugging
```

```
            // Serial.println(button1Counter); // kod za debugging
```

```
        }
```

```
    delay(50); // kratka stanka [ms]
```

```
    // spremi trenutno stanje za sljedeću iteraciju kroz petlju
```

```
    lastbutton1State = button1State;
```

```
    // ispis na LCD zaslon
```

```
    my_LCD.setCursor(0,0);
```

```
    my_LCD.print("Timer [sec]:");
```

```
    my_LCD.print(button1Counter);
```

```
    my_LCD.setCursor(0,1);
```

```
    my_LCD.print(" [1/10 sec]:");
```

```
    my_LCD.print(button2Counter);
```

```
}
```

```
    // brojanje pritisaka tipke za upravljanje
```

```
    button2State = digitalRead(button2Pin);
```

```
    // usporedba s prijašnjim stanjem tipke za upravljanje
```

```
    if (button2State != lastbutton2State) {
```

```
        // u slučaju promjene stanja dodaj 1 varijabli brojača
```

```
        if (button2State == LOW) {
```

```
            button2Counter++;
```

```
            // Serial.print("number of button2 pushes: "); // kod za debugging
```

```
            // Serial.println(button2Counter); // kod za debugging
```

```
        }
```

```
    delay(50); // kratka stanka [ms]
```

```
    // spremi trenutno stanje za sljedeću iteraciju kroz petlju
```

```
    lastbutton2State = button2State;
```

```
// ispis na LCD zaslon
my_LCD.setCursor(0,0);
my_LCD.print("Timer [sec]:");
my_LCD.print(button1Counter);
my_LCD.setCursor(0,1);
my_LCD.print(" [1/10 sec]:");
my_LCD.print(button2Counter);
}

// PROVJERA PODEŠENOSTI VREMENA ODBROJAVANJA
overButtonState = digitalRead(overButton);
// Serial.println(overButtonState); // kod za debugging

if (overButtonState == 0) {
// ako je podešeno vrijeme odbrojavanja kontrolnu varijablu postaviti na vrijednost 1
overFlag = 1;
}

// DIO KODA NAKON ŠTO JE PODEŠENO VRIJEME ODBROJAVANJA
if (overFlag == 1) {
int ldrStatus = analogRead(ldrPin); // provjera signala s LDR senzora

    if (ldrStatus >= threshold) { // provjera intenziteta svjetlosti

        digitalWrite(ledPin, LOW); // LED lampica ugašena, električni luk nije detektiran

        // Serial.print("Arc not detected: "); // kod za debugging
        // Serial.println(ldrStatus); // kod za debugging

        // ispis "Arc not detected" na LCD zaslon
        my_LCD.setCursor(0,0);
        my_LCD.print("Arc not detected");
        my_LCD.setCursor(0,1);
        my_LCD.print(" ");
    }

    else { // električni luk detektiran

        digitalWrite(ledPin, HIGH); // paljenje LED lampice

        // Serial.print("Electric arc detected: "); // kod za debugging
        // Serial.println(ldrStatus); // kod za debugging

        // ispis odbrojavanja na LCD zaslonu
        my_LCD.setCursor(0,0);
        my_LCD.print("Arc timer [ms]: ");

        // započni odbrojavanje:
        if (passFlag == 0) {
```

```
long unsigned counter = (button1Counter*1000)+(button2Counter*100);
relayDelay.start(counter); // odgoda signala prema releju koji gasi električni luk
passFlag++;                // sprječava ponovni ulazak u petlju za odbrojanje
}

//Serial.println(relayDelay.remaining()); // kod za debugging

// prikaz vremena odbrojanja na LCD zaslonu
my_LCD.setCursor(0,1);
my_LCD.print(relayDelay.remaining());
my_LCD.print("          ");

// provjeri vrijeme odbrojanja, ako je prošlo aktiviraj relej
if (relayDelay.justFinished()) {
    digitalWrite(relayPin, HIGH);
}
}
}
```

ŽIVOTOPIS

Domagoj Kojundžić rođen je 31.05.1987. g. u Splitu. Nakon osnovne škole u Kaštelima upisuje opću gimnaziju u Trogiru koju završava 2006. g. s odličnim uspjehom. Iste godine započinje studij na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB) u Splitu. Završni rad na preddiplomskom studiju strojarstva pod naslovom *'Robotizirano MIG zavarivanje aluminija'* izradio je pod mentorstvom prof. dr. sc. Nikše Krnića 2009. g. Obrazovanje nastavlja na FESB-u kroz diplomski studij kojeg završava 2011. godine s vrlo dobrim uspjehom. Diplomski rad naslova *'Primjena elemenata pasivne i niskoenergetske gradnje sa aspekta smanjenja potrošnje energije i emisija CO₂'* izradio je pod mentorstvom prof. dr. sc. Sandra Nižetića. Tokom studiranja primao je stipendiju Grada Kaštela.

Nakon završetka studija zapošljava se u tvrtki koja se bavi tehničkim ispitivanjem strojarskih instalacija. Polaže stručni ispit za obavljanje provjere ispravnosti i funkcionalnosti sustava zaštite od požara, stručni ispit stručnjaka zaštite na radu te stručni ispit za obavljanje poslova prostornog uređenja i graditeljstva. Na FESB-u se zapošljava 2017. g. kao asistent na Zavodu za proizvodno strojarstvo gdje održava laboratorijske vježbe iz nekoliko kolegija i pohađa poslijediplomski studij strojarstva. Iskazao je izrazito zanimanje za tehnologiju zavarivanja tako da su istraživanja koja je proveo u sklopu doktorske disertacije ali i većina laboratorijske nastave koju održava usmjerena prema ovom području.

BIOGRAPHY

Domagoj Kojundžić was born on 31st May 1987 in Split. After finishing primary school in Kaštela he attended general-education secondary school in Trogir where he graduated in 2006 with honors. He then began his studies at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture (FESB) in Split. His undergraduate thesis was entitled *'Robotic Aluminium MIG Welding'* and prepared under the mentorship of prof. Sc.D. Nikša Krnić in 2009. He continued his graduate studies at FESB and completed them in 2011 with very good grades. His graduate thesis entitled *'Applying Passive and Low Energy Construction Elements to reduce Energy Consumption and CO₂ emissions'* was prepared under the mentorship of prof. Sc. D. Sandro Nižetić. He was receiving a scholarship from the City of Kaštela during the study.

After graduating he was employed in a company that provides testing and attestation of mechanical installations. He successfully passed the professional certification for examining the functionality of stable fire protection systems, the professional certification for occupational health and safety experts and the professional certification for performing spatial development and construction work. He began to work at FESB in 2017 as an assistant at Department of Mechanical Engineering Technology where he lectures few laboratory classes and attends postgraduate study program. Due to his affinity to welding technology, his research as well as his laboratory classes are focused on this field.