

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Antonio Radić**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Antonio Radić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na korisnim savjetima i pruženoj podršci tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem se i dr. sc. Matiji Bušiću koji me je vodio kroz diplomski rad i svojim znanjem i iskustvom uvelike doprinio kvaliteti ovog rada. Također se zahvaljujem asistentu Marinu Kurteli, dipl. ing., i laborantu Tomislavu Kezeleu na bezuvjetnoj pomoći i svim odgovorenim pitanjima vezanih uz eksperimentalni dio mog rada te djelatnicima Laboratorija za zavarene konstrukcije i Laboratorija za zaštitu materijala što su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem Mihovilu Ratajecu, mag. ing. mech. iz tvrtke NICRO d.o.o. na ustupljenim uzorcima i dodatnom materijalu za zavarivanje.

Na kraju bih se najviše zahvalio svojim roditeljima što su mi omogućili studiranje te djevojci Tei i prijateljima što su me podržavali na svakom koraku studiranja.

Antonio Radić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ANTONIO RADIĆ** Mat. br.: 0035195352

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena zaštitne plinske mješavine argon - helij pri TIG zavarivanju legure nikla Hastelloy C-22**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of argon-helium shielding gas mixture for TIG welding of Hastelloy C-22 nickel alloy**

### Opis zadatka:

Proučiti vrste legura nikla, njihova svojstva, otpornost na koroziju i područja primjene. Analizirati zavarivanje legura nikla, način pripreme spoja i odabir dodatnog materijala za TIG postupak. Opisati parametre pri TIG zavarivanju te posebno proučiti utjecaj zaštitnog plina ili plinske mješavine na geometriju spoja i produktivnost zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je odrediti parametre potrebne za TIG zavarivanje sučeljenog spoja legure nikla Hastelloy C-22. Parametre je potrebno odrediti mjerenjem penetracije na probnim uzorcima. Napisati specifikaciju postupka zavarivanja. Zavarivanje izvršiti sa zaštitnom plinskom mješavinom argon - helij. Odrediti kemijski sastav u zavarenom spoju i geometriju samog spoja. Analizirati mikrostrukturu i odrediti korozijsku postojanost zavarenog spoja. Donijeti zaključke o odabranoj tehnologiji zavarivanja i usporediti s konvencionalnim pristupom kada se koristi čisti argon.

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

Zadatak zadan:  
02. svibnja 2019.

Rok predaje rada:  
04. srpnja 2019.

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

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS KRATICA .....	IX
POPIS OZNAKA .....	X
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY .....	XII
1. UVOD.....	1
2. KLASIFIKACIJA LEGURA NIKLA I NJIHOVA PRIMJENA.....	2
2.1. Tehnički čisti nikal i njegova primjena .....	4
2.2. Legure nikla s bakrom i njihova primjena .....	5
2.3. Legure nikla s kromom i njihova primjena .....	7
2.4. Legure nikla s molibdenom i njihova primjena .....	9
2.4.1. Legura Hastelloy C-22 i njezina primjena .....	11
3. KEMIJSKA POSTOJANOST LEGURA NIKLA .....	14
3.1. Opća korozija legura nikla .....	14
3.2. Galvanska korozija legura nikla.....	15
3.3. Korozija u procijepu legura nikla.....	16
3.4. Rupičasta korozija nikla i legura nikla.....	17
3.5. Interkristalna korozija legura nikla .....	17
3.6. Erozijska korozija legura nikla.....	18
3.7. Napetosna korozija legura nikla.....	19
3.8. Korozija legura nikla pri povišenim temperaturama.....	19
3.8.1. Nitriranje .....	20
3.8.2. Karburiranje .....	20
3.8.3. Sulfidizacija.....	21
4. ZAVARLJIVOST LEGURA NIKLA .....	23
4.1. Kristalizacijske ili solidifikacijske pukotine legura nikla .....	23
4.2. Likvacijske pukotine u zoni utjecaja topline legura nikla.....	29
4.2.1. Sprječavanje nastanka kristalizacijskih i likvacijskih pukotina .....	33
4.3. Pukotine zbog smanjenja žilavosti .....	38
4.4. Pogreška nastajanja poroznosti pri zavarivanju legura nikla .....	39
4.5. Pogreška nastajanja čvrstih uključka pri zavarivanju legura nikla.....	42
5. POSTUPCI ZAVARIVANJA LEGURA NIKLA .....	44

5.1. Zavarivanje TIG postupkom .....	44
5.3.1. Oprema za TIG zavarivanje .....	45
5.3.2. Izvori struje za TIG zavarivanje.....	47
5.3.3. Impulsno TIG zavarivanje istosmjernom strujom.....	48
5.3.4. Oblici izmjenične struje kod TIG zavarivanja .....	50
5.3.4. Zaštitni plinovi kod TIG zavarivanja .....	52
6. ELEKTROKEMIJSKA KOROZIJSKA ISPITIVANJA.....	58
6.1. Elektrokemijska korozivna ispitivanja istosmjernom strujom .....	58
6.2. Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga, $E_{ok}$ .....	59
6.3. Određivanje polarizacijskog otpora, $R_p$ .....	60
6.4. Određivanje brzine korozije .....	61
6.5. Ciklička polarizacija.....	61
7. EKSPERIMENTALNI DIO .....	63
7.1. Ispitivanje utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu zavara.....	63
7.1.1. Izvor struje za zavarivanje Fronius MagicWave 2200 Job G/F .....	64
7.1.2. Osnovni materijal .....	66
7.1.3. Oprema za mehaniziranje postupka zavarivanja.....	66
7.1.4. Netaljiva volframova elektroda.....	67
7.1.5. Proces navarivanja.....	68
7.2. Rezultati ispitivanja utjecaja zaštitnog plina na napon zavarivanja .....	72
7.3. Rezultati ispitivanja utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu navara.....	74
7.4. Zavarivanje super legure Hastelloy C-22.....	79
7.4.1. Specifikacija postupka zavarivanja .....	85
7.4.2. Ispitivanje makroizbruska .....	86
7.5. Elektrokemijska ispitivanja istosmjernom strujom i određivanje kemijskog sastava...	87
7.5.1. Određivanje korozivnog potencijala, $E_{kor}$ .....	88
7.5.2. Određivanje polarizacijskog otpora $R_p$ .....	89
7.5.3. Određivanje brzine korozije .....	90
7.5.4. Ispitivanje sklonosti prema rupičastoj koroziji .....	91
7.5.5. Određivanje kemijskog sastava.....	92
8. ZAKLJUČAK.....	93
LITERATURA.....	96
PRILOZI.....	98

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz klasifikacije nikla i legura na bazi nikla [2].....	2
Slika 2. Prikaz galvanske korozije legure Hastelloy C-22 [19] .....	16
Slika 3. Prikaz korozije u procjepu legure Hastelloy C-4 [19] .....	16
Slika 4. Prikaz legura C-4, C-22, C-276 i 625 nakon ispitivanja [20] .....	17
Slika 5. Prikaz interkristalne korozije legure Incoloy 800 [19] .....	18
Slika 6. Prikaz erozijske korozije legure Hastelloy C-276 [19].....	18
Slika 7. Prikaz napetosne korozije tehnički čistog nikla [19] .....	19
Slika 8. Prikaz nitriranja legure Inconel 738 [19] .....	20
Slika 9. Prikaz karburiranja legure ASTM H P40 [19] .....	21
Slika 10. Prikaz sulfidizacije legure Rene 77 [19] .....	22
Slika 11. Prikaz mehanizma nastanka kristalizacijskih pukotina [22] .....	24
Slika 12. Prikaz kristalizacijske pukotine legure nikla [2].....	24
Slika 13. Prikaz kristalizacijskih pukotina legura nikla: a) legura 625 b) legura 230 [2].....	25
Slika 14. Prikaz rezultata Varestraint testa [2] .....	27
Slika 15. Prikaz rezultata Varestraint testa za legure C-276, C-22 i C-4 [2] .....	27
Slika 16. Prikaz segregacije i pripadajuće likvacijske pukotine legure 617 [2].....	31
Slika 17. Prikaz penetracijskog mehanizma nastanka likvacijskih pukotina u ZUT-u [21] ....	31
Slika 18. Prikaz likvacija legure nikla koja sadrži NbC karbide i Lave-sove faze [2].....	32
Slika 19. Prikaz utjecaja unosa topline (struje) u ovisnosti o duljini pukotine [2] .....	34
Slika 20. Shematski prikaz utjecaja geometrije zavara na sklonost prema nastanku kristalizacijskih pukotina [2] .....	35
Slika 21. Prikaz utjecaja veličine zrna i nečistoća na osjetljivost prema pukotinama [21].....	36
Slika 22. Utjecaj temperaturnog gradijenta na lokalno taljenje duž granice zrna u ZUT-u [21] .....	37
Slika 23. Prikaz žilavosti kao funkcija temperature [2] .....	38
Slika 24. Prikaz pukotine zbog smanjenja žilavosti [2] .....	39
Slika 25. Prikaz rastvorivosti vodika u različitim metalima [22].....	40
Slika 26. Prikaz primjera poroznosti u zavarenom spoju [25] .....	41
Slika 27. Prikaz uključaka troske u metalu zavara [25] .....	42
Slika 28. Pojednostavljeni shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [27].....	44

Slika 29. Prikaz opreme za TIG zavarivanje s vodenim hlađenjem pištolja za zavarivanje [28]	45
Slika 30. Prikaz pištolja za ručno TIG zavarivanje [27]	46
Slika 31. Prikaz presjeka vodom hlađenog pištolja za TIG zavarivanje [26]	47
Slika 32. Prikaz raspodjele topline između volframove i elektrode i radnog komada ovisno o vrsti struje i polaritetu zavarivanja [28]	48
Slika 33. Prikaz dinamičke karakteristike impulsnog TIG zavarivanja DC strujom [26]	49
Slika 34. Prikaz karakterističnog izgleda zavara nastalim impulsnim TIG postupkom [27]	50
Slika 35. Prikaz sinusnog oblika izmjenične struje [31]	50
Slika 36. Prikaz pravokutnog oblika dinamičke karakteristike [26]	51
Slika 37. Prikaz različitih udjela pozitivne i negativne poluperiode kod pravokutnog oblika AC struje [27]	52
Slika 38. Prikaz toplinske provodnosti različitih vrsta plinova ovisno o temperaturi [33]	53
Slika 39. Prikaz ovisnosti napona i duljine električnog luka o struji zavarivanja [33]	54
Slika 40. Prikaz elektrokemijske ćelije [17]	59
Slika 41. Prikaz krivulje u E-t dijagramu [17]	59
Slika 42. Prikaz određivanja polarizacijskog otpora [17]	60
Slika 43. Prikaz principa Tafelove ekstrapolacije [17]	61
Slika 44. Prikaz radnog mjesta za navarivanje, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb	63
Slika 45. Prikaz uređaja za zavarivanje Fronius MagicWave 2200 Job G/F, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb	64
Slika 46. Prikaz identifikacijske pločice uređaja Fronius MagicWave 2200 Job G/F, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb	65
Slika 47. Prikaz naprave za automatiziranje procesa zavarivanja „BUGO Systems“, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb	67
Slika 48. Prikaz utjecaja jakosti struje zavarivanja na izgled vrha volframove elektrode [27]	68
Slika 49. Prikaz pripreme radnog mjesta za navarivanje, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb	69
Slika 50. Prikaz postupka mjerenja temperature ispitne ploče pomoću uređaja Fluke 568, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb	70
Slika 51. Prikaz uređaja za mjerenje temperature, Fluke 568, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb	70
Slika 52. Grafički prikaz rezultata ispitivanja utjecaja vrste zaštitnog plina na napon	72
Slika 53. Prikaz svih šest prolaza izvedenih navarivanjem, Laboratorij za zavarivanje, FSB	73



Slika 54. Prikaz uređaja za elektrokemijsko nagrizanje „DELAVNIŠKI USMERNIK UZR“, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB, Zagreb.....	74
Slika 55. Prikaz postupka određivanja veličine piksela u programu iSee.....	75
Slika 56. Prikaz mjerenja širine navara pomoću programa iSee.....	75
Slika 57. Prikaz mjerenja dubine navara pomoću programa iSee.....	76
Slika 58. Prikaz rezultata ispitivanja utjecaja zaštitnog plina na širinu navara.....	77
Slika 59. Prikaz rezultata ispitivanja utjecaja zaštitnog plina na penetraciju.....	78
Slika 60. Prikaz pripreme spoja prije zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb .	79
Slika 61. Prikaz korijenskog prolaza s prednje strane zavara nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb .....	80
Slika 62. Prikaz korijenskog prolaza s prednje strane zavara nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	80
Slika 63. Prikaz prvog prolaza popune nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	81
Slika 64. Prikaz prvog prolaza popune nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	81
Slika 65. Prikaz drugog prolaza popune nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	81
Slika 66. Prikaz drugog prolaza popune nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	82
Slika 67. Prikaz trećeg prolaza popune nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	82
Slika 68. Prikaz trećeg prolaza popune nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	82
Slika 69. . Prikaz korijenskog prolaza sa stražnje strane zavara nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	83
Slika 70. Prikaz korijenskog prolaza sa stražnje strane zavara nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	83
Slika 71. Prikaz pogreške nedovoljnog provara korijenskog prolaza, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	83
Slika 72. Prikaz pogreške poroznosti korijenskog prolaza, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	84
Slika 73. Prikaz korijenskog dijela zavarenog spoja nakon brušenja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	84

---

Slika 74. Prikaz popravka korijenskog prolaza nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb.....	84
Slika 75. Prikaz popravka korijenskog prolaza nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb .....	84
Slika 76. Prikaz makroizbruska zavarenog spoja super legure Hastelloy C-22, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb .....	86
Slika 77. Prikaz opreme za elektrokemijsko DC ispitivanje, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB, Zagreb.....	87
Slika 78. Prikaz ispitnog uzorka za elektrokemijska ispitivanja, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB, Zagreb.....	87
Slika 79. Prikaz kretanja korozijskog potencijala u vremenu za područje metala zavara i područje osnovnog materijala .....	88
Slika 80. Prikaz preklopa dijagrama linearne polarizacije za područje zavara i osnovnog materijala .....	89
Slika 81. Prikaz preklopa dijagrama Tafelove polarizacije za područje metala zavara i osnovnog materijala .....	90
Slika 82. Prikaz preklopa krivulje cikličke polarizacije područja metala zavara i osnovnog materijala .....	91
Slika 83. Prikaz uređaja XRF – Olympus [38].....	92

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz podjele nikla i legura nikla prema normi PD CEN ISO/TR 15608:2017 [4].	3
Tablica 2. Prikaz podjele nikla i legura nikla prema normi ASME Pressure Vessel Section IX [5] .....	3
Tablica 3. Prikaz podjele nikla i legura nikla [6] .....	4
Tablica 4. Prikaz mehaničkih svojstva čistog nikla LC-Ni99 [8] .....	5
Tablica 5. Prikaz kemijskog sastava tehnički čistog nikla LC-Ni99 [8] .....	5
Tablica 6. Prikaz kemijskog sastava različitih vrsta monel legura [11] .....	6
Tablica 7. Prikaz kemijskih svojstva različitih vrsta monel legura [11] .....	6
Tablica 8. Prikaz kemijskog sastava različitih vrsta Inconel legura [12] .....	8
Tablica 9. Prikaz mehaničkih svojstva različitih vrsta Inconel legura [12] .....	8
Tablica 10. Prikaz kemijskog sastava različitih grupa Hastelloy legura [12] .....	9
Tablica 11. Prikaz mehaničkih svojstva različitih grupa Hastelloy legura [12] .....	10
Tablica 12. Prikaz kemijskog sastava legure Hastelloy C-22 [14] .....	11
Tablica 13. Prikaz mehaničkih svojstva legure Hastelloy C-22 [14] .....	12
Tablica 14. Elektrokemijski niz s vrijednostima ravnotežnih potencijala važnijih konstrukcijskih materijala u morskoj vodi prema standardnoj vodikovoj elektrodi [16] .....	15
Tablica 15. Prikaz relevantnih parametara skrućivanja za sklonost nastanka kristalizacijskih pukotina [2] .....	26
Tablica 16. Prikaz rezultata Vareststraint testa [2] .....	27
Tablica 17. Prikaz klasifikacije sklonosti niklovi legura prema nastanku kristalizacijskih pukotina [2] .....	28
Tablica 18. Prikaz eutektičkih faza [24] .....	29
Tablica 19. Prikaz prikladnosti argona i helija kao zaštitnog plina pri TIG zavarivanju različitih vrsta materijala [32] .....	55
Tablica 20. Prikaz karakteristika argona i helija kao zaštitnih plinova pri TIG zavarivanju [32] .....	56
Tablica 21. Prikaz tehničkih karakteristika uređaja za zavarivanje MagicWave 2200 Job G/F [37] .....	65
Tablica 22. Prikaz kemijskog sastava ispitne ploče od legure Hastelloy C-22 prema atestu osnovnog materijala .....	66

---

Tablica 23. Prikaz mehaničkih svojstva ispitne ploče od legure Hastelloy C-22 pri sobnoj temperaturi prema atestu osnovnog materijala.....	66
Tablica 24. Prikaz rezultata ispitivanja utjecaja vrste zaštitnog plina na napon zavarivanja...	72
Tablica 25. Prikaz rezultata ispitivanja utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu navara	76
Tablica 26. Prikaz parametara zavarivanja .....	80
Tablica 27. Prikaz geometrije zavarenog spoja super legure Hastelloy C-22.....	86
Tablica 28. Prikaz rezultata ispitivanja korozijskog potencijala.....	88
Tablica 29. Prikaz vrijednosti polarizacijskog otpora za područje metala zavara i za područje osnovnog materijala .....	90
Tablica 30. Prikaz vrijednosti brzine korozije i korozijske struje dobivenih Tafelovom ekstrapolacijom .....	91
Tablica 31. Prikaz kemijskog sastava metala zavara i osnovnog materijala legure Hastelloy C-22 .....	92

---

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>Značenje</b>
AC	izmjenična struja (engl. <i>alternating current</i> )
DC	istosmjerna struja (engl. <i>direct current</i> )
DRZ	djelomično rastaljena zona
EPP	elektrolučno zavarivanje pod praškom
FCC	plošno centrirana kubična rešetka
MAG	elektrolučno zavarivanje taljenjem u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (engl. <i>metal active gas</i> )
MIG	elektrolučno zavarivanje taljenjem u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (engl. <i>metal inert gas</i> )
REL	ručno elektrolučno zavarivanje
TIG	elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (engl. <i>tungsten inert gas</i> )
ZKE	zasićena kalomelova elektroda
ZUT	zona utjecaja topline

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$E$	MPa	modul elastičnosti
$E_{kor}$	V	korozijski potencijal
$E_{ok}$	V	potencijal otvorenog kruga
$E_{pit}$	V	potencijal rupičaste korozije
$E_{zpit}$	V	zaštitni potencijal
$I_z$	A	jakost struje zavarivanja
$j_{kor}$	A/cm <sup>2</sup>	gustoća korozijske struje
$k$	-	koeficijent iskoristivosti topline električnog luka
$Q_z$	kJ/cm	unos topline prilikom zavarivanja
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća
$R_p$	Ω	polarizacijski otpor
$R_{p0.2}$	MPa	granica razvlačenja
$T_s$	°C	temperatura solidusa
$U_z$	V	napon zavarivanja
$v_{kor}$	mm/god	brzina korozije
$v_z$	mm/min	brzina zavarivanja

## **SAŽETAK**

U ovom radu određeni su parametri TIG zavarivanja sučeljenog spoja legure nikla Hastelloy C-22 sa zaštitnom plinskom mješavinom argon – helij. U teorijskom dijelu obrađene su podjele legura nikla, njihova svojstva, otpornost na koroziju i područje primjene. Nadalje, opisani su parametri pri TIG zavarivanju i obrađen je utjecaj zaštitnog plina na geometriju zavarenog spoja i produktivnost zavarivanja.

Ekperimentalni dio rada sastoji se od tri dijela. U prvom dijelu provedeno je mjerenje penetracije na probnim uzorcima od legure nikla Hastelloy C-22 korištenjem dvije vrste zaštitnih plinova, čistog argona i mješavine argon-helij. U drugom dijelu provedeno je TIG zavarivanje sučeljenog spoja legure Hastelloy C-22. U trećem dijelu rada provedeno je elektrokemijsko ispitivanje istosmjernom strujom osnovnog materijala i metala zavara s ciljem određivanja korozijske postojanosti zavarenog spoja.

Ključne riječi: Hastelloy C-22, TIG zavarivanje, argon-helij

## **SUMMARY**

In this paper, the parameters for butt welding of the nickel alloy Hastelloy C-22 with TIG process with application of argon - helium shielding gas mixture are specified. In the theoretical part, nickel alloys, their properties, corrosion resistance and application area have been analyzed. Furthermore, the parameters for TIG welding are described and the effect of the shielding gas on the geometry of the welded joint and welding productivity is discussed.

The experimental part of the paper consists of three parts. In the first part, the penetration test was performed on the Hastelloy C-22 nickel alloy samples using two types of shielding gases, pure argon and argon-helium mixture. In the second part, TIG welding of nickel alloy Hastelloy C-22 was carried out. In the third part, an electrochemical testing was carried out with the DC current on the parent material and the weld metal in order to determine the corrosion resistance of the Hastelloy C-22 welded joint.

Key words: Hastelloy C-22, TIG welding, argon-helium



## 1. UVOD

Nikal je tehnički zanimljiv materijal zbog svojih fizikalnih, mehaničkih i tehnoloških svojstava, otpornosti na koroziju i utjecaja na svojstva drugih metala. Oko 50 % svjetske proizvodnje nikla koristi se za metaluršku proizvodnju čelika i to najviše za proizvodnju nehrđajućih čelika, mali dio (oko 4-6%) za legure bakra, a samo oko 25% prerađuje se u metalurške proizvode od nikla i legura na bazi nikla. Ostatak se koristi za izradu baterija i postupak galvanskog niklanja, tj. elektrolitskog prevlačenja metalnih površina niklom.

Nikal posjeduje važno svojstvo, a to je da se dobro legira s bakrom, željezom, kromom, kobaltom i molibdenom. Tipičan je metal za legirajuće namjene, a postoji oko 2000 tehničkih legura koje sadrže od 0,5 do 99,8 % nikla. Najvažnije legure nikla su s bakrom (zaštićeni trgovački naziv „Monel“), kromom (zaštićeni trgovački naziv „Inconel“) te s molibdenom (zaštićeni trgovački naziv „Hastelloy“).

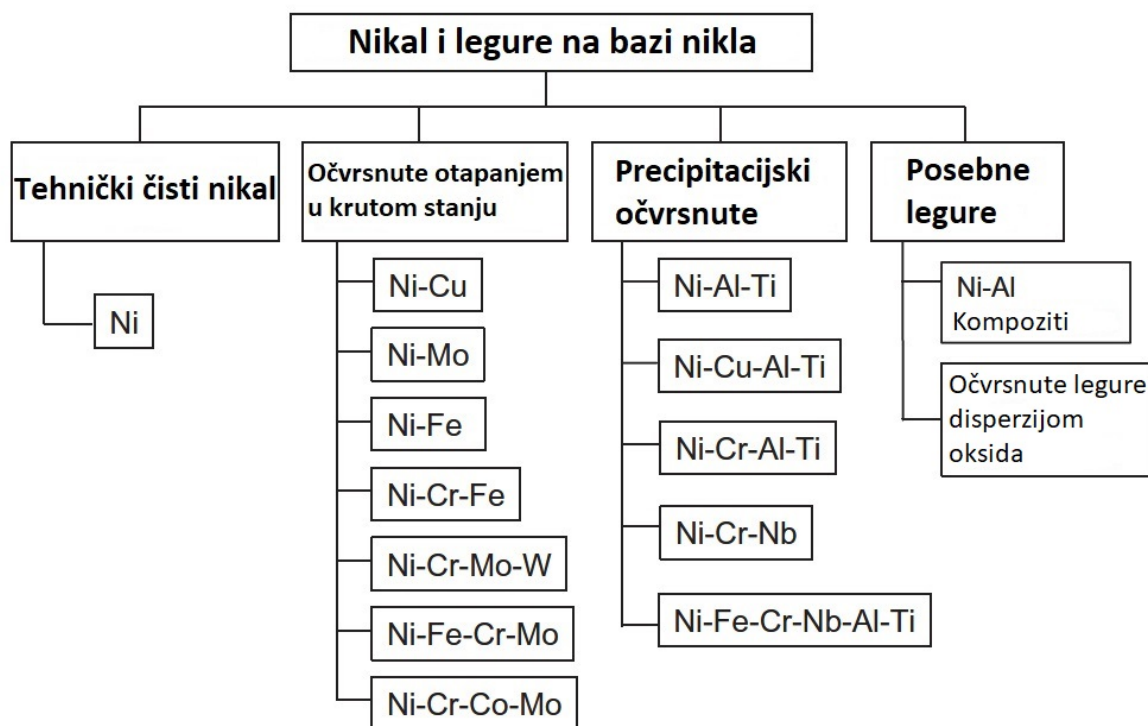
Hastelloy C-22, također poznat kao legura C-22, svestrana je austenitna legura na bazi nikla s dodatkom kroma, molibdena i volframa koja se primjenjuje prvenstveno radi svoje izuzetne otpornosti na koroziju. Zavarljivost legura nikla je u pravilu dobra te se može zavarivati sa svim konvencionalnim postupcima zavarivanja. Specifičnost zavarljivosti legura nikla je sklonost toplim pukotina, najčešće u području metala zavara pri povišenom unosu topline. Iz tog razloga potrebno je kontrolirati unos topline, a to se može postići TIG zavarivanjem uz primjenu plinske mješavine Argon/Helij [1, 2].

U teorijskom dijelu radu obrađene su najvažnije legure nikla, njihova svojstva, otpornost na koroziju te njihovo područje primjene. Također, u nastavku rada će se objasniti i analizirati zavarljivost legura nikla, parametri zavarivanja TIG postupkom te utjecaj zaštitnog plina na geometriju zavarenog spoja.

Cilj eksperimentalnog dijela ovog rada jest odrediti optimalne parametre potrebne za izradu tehnologije TIG zavarivanja legure C-22 uz primjenu mješavine Ar/He i ispitati korozijsku postojanost zavarenog spoja.

## 2. KLASIFIKACIJA LEGURA NIKLA I NJIHOVA PRIMJENA

Materijali na bazi nikla su legure čija je osnova nikal, uključujući i tehnički čisti nikal. Legurama nikla smatraju se legure koje sadrže više od 50% nikla. Ne postoji sistematičan klasifikacijski sustav za legure nikla, kao što je to slučaj kod legura željeza i aluminija. Zbog toga je većina legura na bazi nikla poznata prema zaštićenim trgovačkim nazivima ili broju legure koju je izvorno odredio proizvođač. Na primjer, „INCONEL 600“ koji je zaštićeni trgovački naziv proizvođača „Special Metals“ i „HASTELLOY C-22“ koji je zaštićeni trgovački naziv proizvođača „Haynes International“ se također nazivaju legura 600 i legura C-22 [2]. Legure nikla općenito se klasificiraju prema kemijskom sastavu, kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Prikaz klasifikacije nikla i legura na bazi nikla [2]

Legure nikla iz skupine očvrnutih otapanjem u krutom stanju postižu mehanička svojstva (čvrstoću) legiranjem elementima koji se otapaju u krutom stanju tvoreći s niklom supstitucijske kristale mješance. Dok precipitacijski očvrsnute legure nikla postižu mehanička svojstva (čvrstoću) naknadnom toplinskom obradom, dozrijevanjem (starenjem) [3].

Standardizirana podjela prema europskoj normi PD CEN ISO/TR 15608:2017 razvrstava vrste nikla i legura nikla u osam grupa također prema kemijskom sastavu, kao što je prikazano u tablici 1.

**Tablica 1. Prikaz podjele nikla i legura nikla prema normi PD CEN ISO/TR 15608:2017 [4]**

Grupa	Vrsta nikla i legura nikla
41	Čisti nikal
42	Nikal - bakar (Ni-Cu) legure, Ni $\geq$ 45%, Cu $\geq$ 10%
43	Nikal - krom (Ni-Cr-Fe-Mo) legure, Ni $\geq$ 40%
44	Nikal - molibden (Ni-Mo) legure, Ni $\geq$ 45%, Mo $\leq$ 32%
45	Nikal - željezo - krom legure (Ni-Fe-Cr), Ni $\geq$ 30%
46	Nikal - krom - kobalt legure (Ni-Cr-Co), Ni $\geq$ 45%, Co $\geq$ 10%
47	Nikal - željezo - krom - bakar legure (Ni-Fe-Cr-Cu), Ni $\geq$ 45%,
48	Nikal - željezo - kobalt legure (Ni-Fe-Co-Cr-Mo-Cu), 25% $\leq$ Ni $\leq$ 45% i Fe $\geq$ 20%

Na sličan način su i prema američkoj normi „ASME Pressure Vessel Section IX“ legure nikla svrstane u grupe za zavarivanje. Svakoj skupini dodijeljen je P-broj, odnosno alfanumerička oznaka. Niklu i legurama nikla su dodijeljene oznake od P-broj 41 do P-broj 47. Ta podjela je prikazana u tablici 2.

**Tablica 2. Prikaz podjele nikla i legura nikla prema normi ASME Pressure Vessel Section IX [5]**

P-Broj	Osnovni metal - (primjer)
41	Visok sadržaj nikla
42	Nikal, bakar - (Monel)
43	Nikal, krom, željezo - (Inconel)
44	Nikal, molibden - (Hastelloy B2, C22, C276, X)
45	Nikal, krom, željezo - (Inconel)
46	Nikal, krom
47	Nikal, krom, volfram

Prema literaturnom izvoru [6], nikal i niklove legure mogu se podijeliti u tri različite grupe, a to su:

1. Grupa G (korozijski postojane legure nikla)
2. Grupa I (legure nikla za rad pri povišenim temperaturama)
3. Grupa J (Ni, Ni-Cu i Ni-Mo legure).

U tablici 3. prikazana je navedena podjela legura nikla, tipične legure za svaku grupu te grupa prema europskoj normi PD CEN ISO/TR 15608:2017.

Tablica 3. Prikaz podjele nikla i legura nikla [6]

Grupa	Podgrupa	Legura	Grupa prema ISO/TR 15608:2017
G (korozijski postojeane legure nikla)	G-0	625	43
	G-1	C	43
	G-2	C-276	43
	G-3	C-22	43
	G-4	C-2000	43
	G-5	28	45
	G-6	G-30	42
	G-7	690	46
I (legure nikla za rad pri povišenim temperaturama)	I-0	800	48
	I-1	600	47
	I-2	45TM	46
	I-3	333	43
	I-4	617	46
	I-5	X	43
J (Ni, Ni-Cu i Ni-Mo legure)	J-0	200	41
	J-1	400	42
	J-2	Ni-Cu	42
	J-3	B	44

Kao što je već spomenuto u uvodnom dijelu, tri najvažnije skupine legure nikla su s legure s bakrom („Monel“), kromom („Inconel“) te s molibdenom „Hastelloy“, te će one zajedno s čistim niklom biti u nastavku obrađene.

## 2.1. Tehnički čisti nikel i njegova primjena

Nikal je bijelo-srebrni, sjajan, tvrd, plastičan, žilav i teško taljiv metal. Ima dobra mehanička svojstva, lako se obrađuje, oblikuje te je korozijski poprilično otporan. Korozijski je postojan sve do temperature 1000 °C premda se njegova mehanička svojstva naglo pogoršavaju iznad 800 °C. Iako se zbog ekonomskih razloga rijetko koristi kao konstrukcijski materijal, njegova primjena vrlo je bitna u procesnoj industriji, laboratorijskoj tehnici, za izradu opreme za kemijsku i prehrambenu industriju, za izradu novca, u brodogradnji itd. Vrlo često se koristi u prehrambenoj industriji zbog toga što korozijski produkti nikla ne izazivaju trovanje i ne utječu na okus prehrambenih proizvoda [7].

Standardni metalurški proizvodi tehničkog čistog nikla čistoće su od 99,0 do 99,8 %. Za zavarene konstrukcije i konstrukcije izložene eksploataciji na visokim temperaturama

specificirane su izvedbe čistog nikla s niskim sadržajem ugljika (oznaka LC). Kod ovih legura sadržaj ugljika ograničen je na maksimalno 0,02%. Ako bi sadržaj ugljika bio viši od toga, prilikom zagrijavanja iz krutog stanja došlo bi do izdvajanja ugljika u obliku grafita na granicama zrna što bi smanjilo žilavost. Primjer takvog tehnički čistog nikla je LC- Ni 99, a u tablici 4. prikazana su njegova mehanička svojstva, a u tablici 5. njegov kemijski sastav.

**Tablica 4. Prikaz mehaničkih svojstva čistog nikla LC-Ni99 [8]**

Oznaka	Min. granica razvlačenja $R_{p0.2}$ , MPa	Min. vlačna čvrstoća $R_m$ , MPa	Minimalna Istezljivost, %	Modul elastičnosti, MPa	Gustoća, $kg/m^3$
LC-Ni99	80	340	40	210000	8900

**Tablica 5. Prikaz kemijskog sastava tehnički čistog nikla LC-Ni99 [8]**

Oznaka materijala	Maksimalni udio kemijskog elementa, %								
	C	Si	Mn	S	Ni	Ti	Cu	Fe	Mg
LC-Ni99	$\leq 0,02$	$\leq 0,25$	$\leq 0,35$	$\leq 0,005$	$\geq 99,0$	$\leq 0,1$	$\leq 0,25$	$\leq 0,4$	$\leq 0,15$

Čisti nikel ima plošno centriranu kubičnu rešetku (FCC) i ona se ne mijenja toplinskom obradom, odnosno FCC kristalna struktura nikla ostaje nepromijenjena sve dok ne dosegne temperaturu tališta. S obzirom na to ponašanje je potpuno slično austenitnim nehrđajućim čelicima. Nikal pokazuje feromagnetična svojstva, koja su ovisno o čistoći izražena od sobne temperature pa sve do 340 - 360°C. Iznad te temperature gube se feromagnetična svojstva [1]. Tehnički čisti nikel primjenjuje se najviše u elektronici, kemijskoj industriji i prehrambenoj industriji. Budući da tehnički čisti nikel dobro provodi električnu energiju koristi se za izradu žica u elektronici te za dijelove sustava punijih baterija (NiMH baterije). Čisti nikel također je dobar vodič topline i otporan je na koroziju te se stoga primjenjuje za izradu izmjenjivača topline gdje je potrebna otpornost na koroziju [9, 10].

## 2.2. Legure nikla s bakrom i njihova primjena

Legure nikla s bakrom često se nazivaju „MONEL“ prema proizvođaču. Monel legure sadrže nikel te bakar, uz dodatke željeza i nekih drugih elemenata u malim količinama. Bakar i nikel se u periodnom sustavu elemenata nalaze jedan pored drugog, s atomskim brojevima 28 i 29, te su potpuno međusobno topivi u tekućem i čvrstom stanju. Legure nikla i bakra kristaliziraju

u širokom rasponu koncentracija tvoreći FCC rešetku. Legiranjem s bakrom povećava se otpornost na različite agresivne medije poput otopina koje sadrže sumpor. Iz tog razloga imaju visoku otpornost na koroziju, posebno na djelovanje slane vode i određenih kiselina [10].

Moneli mogu postati osjetljivi na rupičastu koroziju (engl. „pitting“) u mirujućoj morskoj vodi. Mirujućim medijima puno su opasniji od medija koji struje. Zbog toga se preporučuje da se legure Monela primjenjuju za izradu konstrukcija gdje postoji strujanje medija jer uz strujanje se bolje održava pasivnost [11].

Postoji više vrsta Monel legura, a najpoznatije su: Monel 400, Monel 401, Monel R-405, Monel 450, Monel K-500, Monel 404, i tako dalje. Njihov kemijski sastav prikazan je u tablici 6., a njihova mehanička svojstva u tablici 7.

**Tablica 6. Prikaz kemijskog sastava različitih vrsta monel legura [11]**

Udio kemijskog elementa, %						
Trgovačka oznaka	C	Ni	Al	Cu	Fe	Ostali elementi
Monel 400	0,12	65	-	32	1,5	Mn 1,0
Monel 401	0,10	43	-	53	0,75	Si 0,25, Mn 2,25
Monel K - 500	0,13	64	2,8	30	1,0	Mn 0,8
Monel R - 405	0,15	66	-	31	1,2	Mn 1,0, S 0,04

**Tablica 7. Prikaz kemijskih svojstva različitih vrsta monel legura [11]**

Naziv legure	Monel 400	Monel 401	Monel K-500	Monel R-405
Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	8,8	8,89	8,44	8,8
Vlačna čvrstoća, MPa	550	441	1100	550
Granica razvlačenja R <sub>p0.2</sub> , MPa	240	134	790	240
Istezljivost pri puknuću, %	48	51	25	40
Curieva temperatura, °C	35	-196	-65	35
Specifični toplinski kapacitet, J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0,427	-	0,419	0,427
Toplinska provodljivost, W/mK	21,8	19,2	17,5	21,8

Iz tablice 7. uočava se da legura Monel K-500 ima najvišu vrijednost vlačne čvrstoće u odnosu na ostale legure. Ona je toplinski očvrstiva legura za razliku od ostalih legura iz tablice 7. koje čvrstoću postižu legiranjem elementima u krutom stanju. Također se može njenom naknadnom toplinskom obradom postići visoka čvrstoća i tvrdoća. Ima izvrsnu otpornost na koroziju i odlična mehanička svojstva u širokom temperaturnom rasponu. Odlikuje se povišenom čvrstoćom i tvrdoćom do 650 °C te zadržava visoku čvrstoću, žilavost i istezljivost sve do temperature od -250 °C. Legura Monel K-500 ima široku primjenu. Primjenjuje se kod izrade vojnih brodova budući da nije magnetska te ne aktivira podvodne mine. Zbog odličnih antikorozivnih svojstva primjenjuje se kod off-shore platformi, opreme za traženje i istraživanje naftnih polja, dijelova crpki, za izradu kirurških noževa i slično [10].

Često korištena legura Monel 400 također ima široku primjenu, posebno u kemijskoj industriji i za dijelove koji su izloženi djelovanju korozivnih medija, a ponajviše morske vode. Monel 400 ima odlična mehanička svojstva, visoku čvrstoću i dobru žilavost. Porastom temperature čvrstoća i tvrdoća rastu s malim smanjenjem žilavosti i otpornosti na udarce [10].

Moneli se još mogu primijeniti u zrakoplovstvu zbog zadržavanja svojih mehaničkih svojstva pri povišenim temperaturama. Zbog svoje izvrsne otpornosti na koroziju često se primjenjuju kao materijali za cijevi, za ventile crpki, spremnike goriva i vode, propelere te u kemijskoj industriji [10].

### **2.3. Legure nikla s kromom i njihova primjena**

Legure nikla s kromom često se nazivaju „INCONEL“ prema proizvođaču. Spadaju u grupu korozijski postojanih i vatrootpornih legura nikla. Najčešće sadrže 70% nikla, 20% kroma, a ostatak je željezo. Krom je glavni legirni element u mnogim korozijski postojanim legurama na bazi nikla te u legurama namijenjenim za rad pri povišenim temperaturama. Krom povećava otpornost na oksidaciju koja je dominantan način korozije nikla pri povišenim temperaturama. Dakle, njihova važna značajka je vatrootpornost, odnosno postojanost pri visokim temperaturama od 350°C pa čak do 900 °C. Bitna karakteristika im je povišena čvrstoća i postojanost čvrstoće na visokim temperaturama. Kvalitetno održavaju pasivnost, otporni su i na kisele i na lužnate medije. Područje primjene im je za dijelove plinskih turbina, za mlazne motore, odnosno za agresivne sredine i visoke temperature [12].

Najčešće korištene legure iz ove skupine su: Inconel 600, Inconel 601, Inconel 625, Inconel 718 te Inconel X-750. Njihov kemijski sastav prikazan je u tablici 8., a mehanička svojstva u tablici 9.

**Tablica 8. Prikaz kemijskog sastava različitih vrsta Inconel legura [12]**

Udio kemijskog elementa, %							
Trgovačka oznaka	Ni	Cr	Fe	Al	Ti	Mo	Cb +Ta
Inconel 600	76	15,5	8.0	-	-	-	-
Inconel 601	60,5	23.0	14,1	1,15	-	-	-
Inconel 625	61	21,5	2,5	0,2	0,2	9,0	3,65
Inconel 718	52,5	19.0	18,5	0,5	0,9	3,0	5,1
Inconel X-750	73	15,5	7,0	0,7	2,5	-	0,95

**Tablica 9. Prikaz mehaničkih svojstva različitih vrsta Inconel legura [12]**

Naziv legure	Alloy 600	Alloy 601	Alloy 625	Alloy 718	Alloy X-750
Način postizanja čvrstoće	Hladno očvrstive			Toplo očvrstive	
Gustoća, kg/m <sup>3</sup>	8414	8054	8442	8193	8248
Vlačna čvrstoća, Mpa	700 - 1000	737	820 - 1100	1400 - 1550	1200 - 1300
Granica razvlačenja Rp <sub>0.2</sub> , Mpa	550 - 800	337	400 - 750	1200 - 1400	850 - 1000
Istezljivost pri puknuću, %	10-30	45	30 - 60	8 - 10	21 - 26
Curieva temperatura, °C	-124	-195	-195	-195	-142
Modul elastičnosti, Mpa	213 737	206 153	205 463	205 463	213 737

Kao što je vidljivo iz tablice 9., legure iz ove skupine postižu visoke vrijednosti čvrstoće i žilavosti. Legure Inconel 600, 601 i 625 nisu toplinski obradive te one svoju čvrstoću postižu hladnim oblikovanjem. S druge strane, legure 718 i X – 750 postižu čvrstoću naknadnom toplinskom obradom.

Iz ove skupine legura, zanimljiva je legura Inconel 625 koja se zbog poprilično visoke cijene, gdje je to moguće, nanosi u obliku prevlake na osnovni materijal od ugljičnog čelika. S obzirom na to da je postupak prevlačenja relativno jeftin i jednostavan postupak on se često upotrebljava za poboljšanje korozivnih svojstava različitih dijelova opreme u naftno-petrokemijskoj i procesnoj industriji [12].



Inconeli se primjenjuju za izradu proizvoda i konstrukcija koji zahtijevaju visoku otpornost na toplinu. Tipične primjene su u industrijskim pećima, električnim grijačima za kuhanje, otpornicima i kućanskim uređajima za grijanje. Legure nikla s kromom i kobaltom, zajedno s malim količinama titana i aluminijske koriste se za izradu turbinskih lopaticama za mlazne motore aviona Concorde. Inconeli su idealni materijal za ekstremne uvjete u kojima se zahtjeva korozijska postojanost i čvrstoća pri visokim temperaturama [9].

#### 2.4. Legure nikla s molibdenom i njihova primjena

Legure nikla s molibdenom izvorno su razvijene kao korozijski otporni materijali. To su legure koje postižu mehanička svojstva (čvrstoću) legiranjem elementima koji se otapaju u krutom stanju tvoreći s niklom supstitucijske kristale mješance. Kod ovih legura moguće je povećati čvrstoću i toplinskom obradom. Međutim otpornost na koroziju i vatrootpornost kod ovih legura je najizraženija u žarenom stanju pri očvršnuću kristalima mješancima i zbog toga se općenito primjenjuju u tom stanju [12]. Najpoznatija legura iz skupine legura nikla s molibdenom je „Hastelloy“, koja je dobila naziv prema svojem proizvođaču. Te legure imaju umjerenu vrijednost čvrstoće koju zadržavaju pri povišenim temperaturama i stoga se koriste za rad pri povišenim temperaturama. Kemijski sastav najpoznatijih grupa Hastelloy legura prikazan je u tablici 10., a mehanička svojstva ovih legura prikazana su u tablici 11.

**Tablica 10. Prikaz kemijskog sastava različitih grupa Hastelloy legura [12]**

Udio kemijskog elementa, %							
Grupa legura	Ni	Co	Mo	Cr	Fe	C	Ostali
Hastelloy B	61	Max. 2,5	28	Max 1,0	5	Max 0,05	-
Hastelloy C	54,00	Max. 2,5	16	15,5	5,5	Max 0,08	4,0 W
Hastelloy N	69,5	-	16,5	7	Max. 5	0,06	Max. 0,8 Mn
Hastelloy X	47	1,5	9	22	18,5	0,10	0,6 W

Tablica 11. Prikaz mehaničkih svojstva različitih grupa Hastelloy legura [12]

Skupina legura	Hastelloy B	Hastelloy C	Hastelloy N	Hastelloy X
Gustoća, kg/m <sup>3</sup>	9245	8940	8774	8220
Vlačna čvrstoća, MPa	1130	1000	792	834
Granica razvlačenja R <sub>p0,2</sub> , MPa	951	565	317	400
Istezljivost pri puknuću, %	22	44	51	28
Temperatura tališta, °C	1320 - 1350	1265 - 1343	1301 - 1434	1260 - 1390
Modul elastičnosti, MPa	212 358	205 463	218 563	196 500

Skupina legura Hastelloy B ima visoku otpornost na koroziju u kiselim medijima. Također ima dobra mehanička svojstva pri povišenim temperaturama. U oksidirajućim atmosferama može se primjenjivati do 760 °C, a u reducirajućim atmosferama na znatno višim temperaturama. Skupina legura Hastelloy C ima također odlična korozijska svojstva, postojani su prema djelovanju mineralnih kiselina (HCl i H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) kao i prema oksidativnim supstancijama, npr. ferikloridu i kloru u prisustvu vode. Postojani su u oksidirajućim i reducirajućim atmosferama sve do 1100 °C. Skupina legura Hastelloy N razvijena je s ciljem otpornosti na otopljene soli fluorida. Posjeduje dobru otpornost na oksidirajuće atmosfere do 1000 °C. Skupina legura Hastelloy X ima odličnu čvrstoću i otpornost na oksidirajuće atmosfere sve do 1200 °C, također ima dobru otpornost na napetosnu koroziju [12].

Legure nikla s molibdenom primjenjuje se tamo gdje je potrebna ekstremna otpornost na koroziju, kao na primjer u postrojenjima za odsumporavanje dimnih plinova u elektranama.

Hastelloy legure su izuzetno otporne na djelovanje sumporne, klorovodične i drugih kiselina pa se primjenjuju u kemijskoj procesnoj tehnici koja koristi navedene kiseline [7].

#### 2.4.1. Legura Hastelloy C-22 i njezina primjena

Legura Hastelloy C-22, ili legura C-22 spada u skupinu legura Hastelloy C. To je gnječena legura nikla, kroma i molibdena koja je očvrstljiva kristalima mješancima. Otapanjem kroma i molibdena u kristalnoj rešetci nikla nastaju točkaste prepreke atoma legiranih elemenata što posljedično dovodi do otežavanja gibanja dislokacija, odnosno povećanju čvrstoće. Legure očvrstljive kristalima mješancima mogu dodatno povećati čvrstoću samo deformiranjem u hladnom stanju. Na primjer, gašenjem niklovih legura koje su očvrstljive kristalima mješancima s visokih temperatura neće povećati tvrdoću niti čvrstoću tih legura. Toplinska obrada niklovih legura koje su očvrstljive kristalima mješancima se provodi iz dva razloga. Prvi razlog je da bi se postigla mikrostruktura koja će rezultirati u optimalnim svojstvima u pogledu mehaničkih svojstva i otpornosti na koroziju. Drugi razlog provođenja toplinske obrade je smanjenje zaostalih napreznja uzrokovanim postupcima izrade i zavarivanja. Shodno tome, provode se dvije vrste toplinskih obrada ovisno o temperaturi provedbe. To su žarenje za redukciju zaostalih napreznja koje se provodi pri nižim temperaturama i rastvorno žarenje koje se provodi pri visokim temperaturama. Žarenje za redukciju zaostalih napreznja provodi se kako bi se smanjila unutarnja zaostala napreznja u materijalu čime se povećava otpornost na napetosnu koroziju i nema za cilj povećati veličinu zrna. Rastvorno žarenje provodi se na većim temperaturama (1100 °C) od žarenja za redukciju zaostalih napreznja i ima za cilj povećati veličinu zrna što će poboljšati mehanička svojstva pri povišenim temperaturama. Prekomjerni rast zrna nije poželjan jer drastično mijenja svojstva metala. Kada se veličina zrna poveća, jedini način da se zrno usitni je hladnom deformacijom materijala i naknadnim rekristalizacijskim žarenjem što je dosta nepraktično za provedbu na gotovoj konstrukciji. Zbog tih se razloga legura C-22 često isporučuje u žarenom stanju [13].

U tablici 12. prikazan je kemijski sastav legure Hastelloy C-22, a u tablici 13. prikazana su mehanička svojstva različitih vrsta proizvoda od legure Hastelloy C-22 nakon žarenja.

**Tablica 12. Prikaz kemijskog sastava legure Hastelloy C-22 [14]**

Udio kemijskog elementa, %												
	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Mo	W	Co	V	P	S
<b>Min.</b>	Ostatak	20,0	2,0	-	-	-	12,5	2,5	-	-	-	-
<b>Max.</b>	Ostatak	22,5	6,0	0,01	0,5	0,08	14,5	3,5	2,5	0,35	0,025	0,015

Tablica 13. Prikaz mehaničkih svojstva legure Hastelloy C-22 [14]

Temperatura, °C	Granica razvlačenja $R_{p0.2}$ , MPa	Vlačna čvrstoća, MPa	Istezljivost, %
<b>Limovi debljine 0,71 do 3,2 mm</b>			
20	407	800	57
93	372	758	58
204	303	703	57
316	290	676	62
427	283	655	67
538	276	627	61
649	248	586	65
760	241	524	63
<b>Ploče debljine 6,4 do 19 mm</b>			
20	372	786	62
93	338	738	65
204	283	676	66
316	248	655	68
427	241	634	68
538	234	607	67
649	221	572	69
760	214	524	68
<b>Šipke promjera 13 do 50 mm</b>			
20	359	765	70
93	310	724	73
204	262	662	74
316	234	634	79
427	214	614	79
538	200	579	80
649	193	552	80
760	200	496	77

Legura C-22 potpuno je austenitna, nikal-krom-molibden-volfram legura s poboljšanom otpornošću na koroziju u odnosu na ostale nikal-krom-molibden legure. Visok sadržaj kroma osigurava dobru otpornost na oksidirajuće atmosfere, dok sadržaj molibden i volframa daje dobru otpornost na reducirajuće atmosfere. Ova legura ima izuzetno visoku otpornost na rupičastu koroziju, koroziju u procjepu, opću koroziju i napetosnu koroziju. Otporna je na stvaranje precipitata na granicama zrna u području zone utjecaja topline što ju čini pogodnu za upotrebu u zavarenom stanju (engl. as-welded condition), odnosno nije potrebna naknadna toplinska obrada. Dokazano je da posjeduje izvrsnu zavarljivost i visoku otpornost na koroziju kao dodatni materijal za zavarivanje. Legura C-22 može se lagano hladno oblikovati zbog svoje duktilnosti i zbog toga je to preferirani način oblikovanja ovih legura. Potrebno je više energije za oblikovanje u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike jer je legura C-22 kruća [15, 16].

Legura Hastelloy C-22 primjenjuje se u jakim korozivnim sredinama kao što su kemijska industriji, postrojenja za odsumporavanje dimnih plinova, postrojenjima za spaljivanje otpada. Primjenjuje se u postrojenjima u kojima se radi s agresivnim korozivnim medijima kao što su oksidirajuće kiseline, metanske kiseline, morska voda te fluoridi. Farmaceutске industrije primjenjuju leguru Hastelloy C-22 za izradu opreme i cijevi kako bi se izbjegla korozija. Također, primjenjuje se u proizvodnji celofana, fosforne kiseline, pesticida, u preradi nuklearnih otpada, u izmjenjivačima topline te u sustavima pročišćavanja otpadnih voda [15].

### 3. KEMIJSKA POSTOJANOST LEGURA NIKLA

Korozija (lat. *corrodere*, *nagrizati*) može se definirati kao nepoželjno trošenje konstrukcijskih metala kemijskim djelovanjem okoline, a prema mehanizmu procesa odnosno mediju dijeli se na kemijsku i elektrokemijsku koroziju. Kemijska korozija odvija se u neelektrolitima, tj. medijima koji ne provode električnu struju, pri čemu nastaju spojevi metala s nemetalnim elementima, najčešće oksidi i sulfidi. Najvažniji mediji koje ne provode električnu struju koji u praksi uzrokuju kemijsku koroziju su vrući plinovi (npr. dimni plinovi) i organske tekućine (npr. goriva, maziva). U praksi je češći slučaj elektrokemijske korozije koja nastaje na metalima u električki vodljivim sredinama (elektrolitima) kao što su voda, vlažno tlo, vlažna atmosfera, vodene otopine kiselina, lužina, soli i drugih tvari. Elektrokemijska korozija metala je redoks proces u sustavu metal/elektrolit u kojem dolazi do oksidacije (ionizacije, otpuštanja elektrona) metala u slobodni metalni ion te redukcije (depolarizacije, primanje elektrona) nekog oksidansa, tzv. depolarizatora. Uobičajena je podjela korozijskih pojava prema geometriji korozijskog razaranja na osam pojavnih oblika korozije, a to su [17]:

1. Opća korozija
2. Galvanska korozija
3. Korozija u procijepu
4. Rupičasta korozija
5. Interkristalna korozija
6. Selektivna korozija
7. Erozijska korozija
8. Napetosna korozija.

Nikal i legure nikla posjeduju visoku postojanost u različitim medijima i atmosferama, međutim postoje neki slučajevi kada određena legura nikla nije dobro odabrana za eksploataciju u određenim uvjetima i tada dolazi do korozije nad legurama nikla ali puno manje u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike.

#### 3.1. Opća korozija legura nikla

Opća korozija najčešći je i najrašireniji, ali najmanje opasan oblik korozije jer zahvaća približno jednako čitavu površinu materijala izloženu nekoj agresivnoj sredini. Taj oblik korozije je tehnički najmanje opasan jer se može lako pratiti i predvidjeti kada treba određeni dio

konstrukcije popraviti ili zamijeniti s novim. Materijal je upotrebljiv ako je brzina opće korozije manja od 0,1 mm/god [17].

Nikal i legure nikla stvaraju pasivni površinski sloj oksida kada se materijal izloži zraku. Taj pasivni sloj značajno sprječava daljnji napredak korozije u različitim okolišnim uvjetima i stoga ima dobru otpornost prema općoj koroziji [18].

### 3.2. Galvanska korozija legura nikla

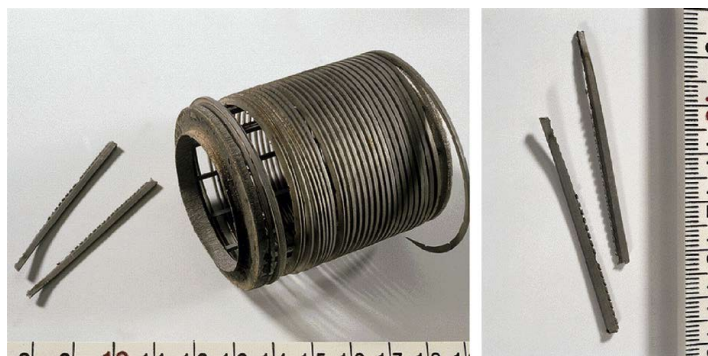
Galvanska korozija nastaje pri spajanju dvaju ili više materijala različitog potencijala u elektrolitu, pri čemu dolazi do korozije onog metala koji ima niži električni potencijal [17].

U tablici 14. prikazan je elektrokemijski niz s vrijednostima ravnotežnih potencijala važnijih konstrukcijskih materijala u morskoj vodi prema standardnoj vodikovoj elektrodi.

**Tablica 14. Elektrokemijski niz s vrijednostima ravnotežnih potencijala važnijih konstrukcijskih materijala u morskoj vodi prema standardnoj vodikovoj elektrodi [16]**

Materijal	Korозиjski potencijal $E^0$ / V
magnezij	-1,45 do -1,36
magnezijeve legure	~ -1,35
cink	-0,83 do -0,76
aluminij s 99% Al	-0,66 do -0,53
duraluminij	~ -0,55
kadmij	-0,53 do -0,51
uglični čelik	-0,48 do -0,21
sivi lijev	-0,42 do -0,18
SnPb - legura sa 60 % Sn	~ -0,30
olovo	-0,31 do -0,26
kositar	-0,25 do -0,21
austenitni Cr-Ni čelik u aktivnom stanju	~ -0,10
nikl	~ 0,02
mjed sa 60% Cu	0,05 do 0,27
bakar	0,10 do 0,28
CuNi - legura sa 70 % Cu	0,08 do 0,32
krom	~ 0,23
bronca s 88 % Cu, 10 % Sn i 2 % Zn	0,13 do 0,36
srebro	~ 0,30
monel	0,14 do 0,48
titan	~ 0,37
austenitni Cr-Ni čelik u pasivnom stanju	~ 0,60
grafit	~ 0,70
zlato	~ 0,70
platina	~ 0,80

Iz tablice 14. može se uočiti da je nikal relativno plemenit metal u usporedbi s većinom drugih metala i iz tog razloga poprilično je otporan na galvansku koroziju. Međutim, ako je spojen s plemenitijim metalom u prisustvu elektrolita može doći do pojave galvanske korozije legure nikla kao što je slučaj korozijskog oštećenja cjedila posude za skladištenje kemikalija, prikazan na slici 2.



**Slika 2. Prikaz galvanske korozije legure Hastelloy C-22 [19]**

Cjedilo je bilo izrađeno od dva materijala. Oba kraja cjedila su izrađena od legure Hastelloy C-276, dok su žice cjedila izrađene od legure Hastelloy C-22. Oba materijala imaju dobru korozijsku otpornost u sumpornoj kiselinu, međutim njihovim kontaktom u elektrolitu došlo je do galvanske korozije legure Hastelloy C-22. [19].

### 3.3. Korozija u procijepu legura nikla

Korozija u procijepu naziv je za korozijsku pojavu u uskim površinskim pukotinama ili u procijepima konstrukcijske izvedbe materijala istih korozijskih potencijala. U procijepima dolazi do nakupljanja vode i nečistoće, povećava se kiselost otopine, smanjuje se pH-vrijednost te povećava koncentracija agresivnih čimbenika. Sve navedeno dovodi do formiranja korozijskog članka u kojem se metalna površina ponaša kao anoda i otapa se [17].

Najčešći slučaj korozije u procijepu je kod navoja vijaka i matica, takav slučaj korozije u procijepu legure nikla Hastelloy C-4 prikazan je na slici 3.



**Slika 3. Prikaz korozije u procijepu legure Hastelloy C-4 [19]**

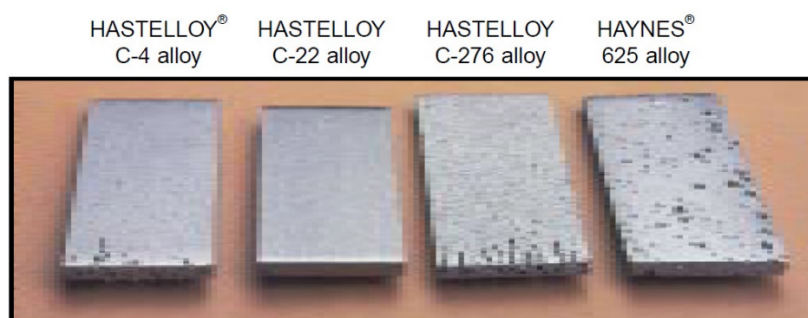


Vijčani spoj izrađen od legure Hastelloy C-4 bio je izložen agresivnom korozivnom mediju, kiselinama i došlo je do korozije u procjepu. Legure nikla s molibdenom su donekle podložne koroziji u procjepu. Preporučuje se korištenje legure Hastelloy C-22 koja ima poboljšanu otpornost prema ovom obliku korozije. [19].

### 3.4. Rupičasta korozija nikla i legura nikla

Rupičasta korozija nastaje ponajprije u vodenim otopinama s kloridnim ionima koji dovode do razaranja pasivnog filma. Kada nastane oštećenje u obliku rupice, unutar oštećenja dolazi do sve većeg nakupljanja metalnih kationa i klorida, a sve manjeg udjela otopljenog kisika. Tako nastali kloridni medij vrlo je agresivan, sprječava ponovnu uspostavu pasivnog filma i potiče daljnju propagaciju rupice [17].

Proizvođač Haynes International napravio je testiranje otpornosti prema rupičastoj koroziji ispitujući uzorke legura Hastelloy C-22, Hastelloy C-4, Hastelloy C-276 i legure 625 u otopini koja sadrži 11.5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1.2% HCl, 1% FeCl<sub>3</sub> i 1% CuCl<sub>2</sub> [19]. Uzorci nakon ispitivanja su prikazani na slici 4.



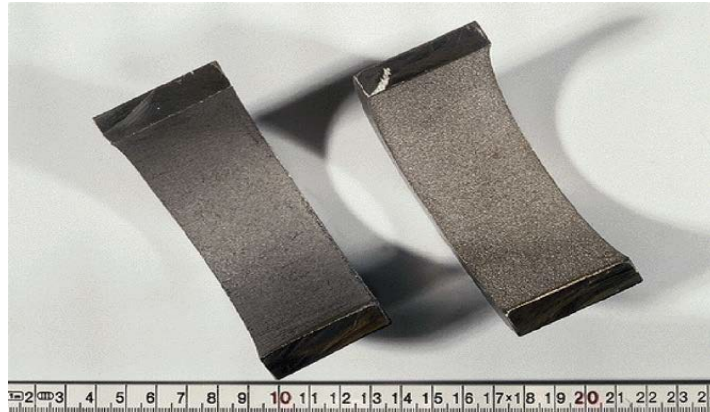
Slika 4. Prikaz legura C-4, C-22, C-276 i 625 nakon ispitivanja [20]

Iz slike 4. uočava se da se nisu pojavili korozijski produkti na leguri C-22, a na svim ostalim jesu. Dakle, legura Hastelloy C-22 ima poboljšanu otpornost prema rupičastu koroziju u odnosu na ostale legure iz skupine legura nikla s molibdenom kao što su Hastelloy C-4, Hastelloy C-276 i legura 625 [20].

### 3.5. Interkristalna korozija legura nikla

Interkristalna korozija je opasan oblik korozije jer napreduje nevidljivo duž granica zrna čime se izaziva razaranje metalne veze između kristalita u mikrostrukturi metala i konačno raspad čitavog dijela. Može ostati dugo neprimijećena, a naglo smanjuje čvrstoći i žilavost metala [17].

Legura Hastelloy C-22 iz skupine nikal-krom-molibden legura ima zadovoljavajuću otpornost na interkristalnu koroziju iako pojedine legure nikla posebno iz skupine nikal-krom-željezo s lošom toplinskom obradom kao na primjer legura Incoloy 800, mogu biti podložne pojavi ove vrste korozije [20]. Takav slučaj prikazan je na slici 5.



Slika 5. Prikaz interkristalne korozije legure Incoloy 800 [19]

### 3.6. Erozijska korozija legura nikla

Erozijska korozija je istodobno djelovanje kemijskog (korozije) i fizikalnog (erozije) oštećivanja materijala. Erozijom se skidaju zaštitni slojevi s površine materijala u obliku otopljenih iona i onemogućuje se njihovo zaštitno djelovanje. Pri tome dolazi do izlaganja površine materijala korozivnom djelovanju medija. Nikal i legure nikla stvaraju pasivni sloj koji dobro prijanja na površinu i stoga su otporniji na ovaj oblik korozije od primjerice ugljičnih čelika [16]. Na slici 6. prikazan je slučaj erozijske korozije cijevi od legure Hastelloy C-276 izložene klorovodičnoj kiselini. Legura Hastelloy C-276 je općenito dobro otporna na klorovodične kiseline sve do 50 °C. Međutim do korozije je došlo zbog velikih brzina udara erozijskih čestica koje su oslabile pasivni sloj i u klorovodičnom mediju pri povišenim temperaturama nastupila je korozija [19].



Slika 6. Prikaz erozijske korozije legure Hastelloy C-276 [19]

### 3.7. Napetosna korozija legura nikla

Napetosna korozija je oblik korozije koji nastaje zbog istodobnog djelovanja agresivnog okruženja i vlačnih naprezanja na materijal konstrukcije. Da bi došlo do napetosne korozije moraju istodobno biti ispunjena sljedeća tri uvjeta [17]:

1. Materijal sklon napetosnoj koroziji
2. Agresivni medij posebno uz povišene temperature
3. Naprezanje.

Na slici 7. prikazan je slučaj napetosne korozije diska izrađenog od tehnički čistog nikla.



Slika 7. Prikaz napetosne korozije tehnički čistog nikla [19]

Do korozije je došlo zbog toga što su bila zadovoljena navedena tri uvjeta za nastanak napetosne korozije. Disk je bio izrađen od čistog nikla koji nije dovoljno otporan na ovaj oblik korozije. Također, disk je bio oblikovan hladnim valjanjem koje je uzrokovalo zaostanim naprezanjima u materijalu. To je dovelo do napetosne korozije u prisustvu agresivnog medija (sumporna i dušična kiselina) pri povišenim temperaturama eksploatacije od 144 °C. Iz tog razloga se preporučuje da se za takve uvjete eksploatacije koriste legure koje pokazuju veću otpornost prema ovom obliku korozije kao npr. legura Hastelloy C-22 [19].

### 3.8. Korozija legura nikla pri povišenim temperaturama

Pojam korozija nikla i legura nikla pri povišenim temperaturama odnosi se na reakciju nikla s plinovima pri povišenim temperaturama bez prisustva vode. U praksi, korozija pri povišenim temperaturama se odvija pri ekstremno visokim temperaturama (iznad 200 °C). Korozija pri povišenim temperaturama odvija se u vrućim plinovima kao što su zrak, sumporni dioksid, vodikov sulfid, vodik, i suha para [19].

U nastavku će biti opisani najčešći oblici korozije pri povišenim temperaturama.

### 3.8.1. Nitiranje

Nitiranje ili obogaćivanje površinskih slojeva dušikom se koristi kao površinska toplinska obrada konstrukcijskih čelika. To je poželjan proces koji kada se provodi u kontroliranim uvjetima nad konstrukcijskim čelicima doprinosi povećanju otpornosti na trošenje. Međutim, ako se proces ne kontrolira pri povišenim temperaturama može doći do nedovoljne difuzije dušika. Nastat će krhak sloj nitrida koji smanjuje otpornost na koroziju i žilavost metala. Tada se govori o nepoželjnom nitiranju, odnosno o koroziji pri povišenim temperaturama [19]. Na slici 8. prikazan je slučaj nepoželjnog nitiranja statorske lopatice plinske turbine izrađene od legure Inconel 738 LC.



Slika 8. Prikaz nitiranja legure Inconel 738 [19]

Do nitiranja je došlo zbog izlaganja ispušnim plinovima pri temperaturama iznad 900 °C stupnjeva za koje navedeni materijal nije postojan [19].

### 3.8.2. Karburiranje

Problemi karburiranja ili obogaćivanja površinskih slojeva ugljikom, uglavnom proizlaze iz difuzije ugljika u materijal i eventualnog nastajanja karbida u materijalu u ugljičnim atmosferama koji prouzrokuje krhkost i degradaciju ostalih mehaničkih svojstva. Ova vrsta korozije pri povišenim temperaturama (između 430 i 900 °C) rezultira gubitkom metala koje se manifestira rupičastom ili općom korozijom. Budući da nikal onemogućava difuziju ugljika, legure s visokim udjelom nikla su općenito otpornije na karburiranje. Krom, aluminij i silicij su često poželjni legirni elementi koji isto sprječavaju karburiranje stvaranjem i održavanjem kompaktnih i stabilnih oksidnih filmova koji se ponašaju kao barijera i pomažu sprječavanju

difuzije ugljika u metal. Legure s relativno visokim udjelom aluminija pružaju odličan otpor difuziji ugljika, a to su INCONEL 617 (sadrži 1,2% Al), legura 602 CA (sadrži 2,2% Al) i superlegura Haynes 214 (sadrži 4.5% Al). Na slici 9. prikazan je slučaj karburiranja niklove legure ASTM H P40 [19].



**Slika 9. Prikaz karburiranja legure ASTM H P40 [19]**

Do karburiranja je došlo zbog izlaganja legure visokim temperaturama (iznad 950 °C) pri kojima dolazi do difuzije ugljika u atmosferi bogatoj ugljikovodicima i nastali su karbidi [19].

### **3.8.3. Sulfidizacija**

Sulfidizacija je korozivni mehanizam pri visokim temperaturama koji rezultira stvaranjem sulfidnog sloja. Nastali sulfidni sloj ima slabija svojstva kočenja daljnje korozije u odnosu na sloj oksida. Sumpor se može pronaći u mnogim vrstama goriva kao što su ugljen, benzin i nafta. Problem nastaje prilikom izgaranja tih goriva jer nastaju korozivni plinovi tipa  $H_2S$ ,  $SO_2$  i  $SO_3$ . Kod tehnički čistih legura nikla ovi plinovi mogu uzrokovati koroziju pri reducirajućim atmosferama budući da se sumpor spaja s niklom pri niskim temperaturama (650 °C), i pritom nastaje eutektik  $Ni_3S_2$  koji rezultira ubrzanom korozijom. Otpornost legura nikla prema ovom obliku korozije ovisi o tome da li je atmosfera reducirajuća ili oksidirajuća. Legure na bazi nikla s dodatkom kroma i visokog udjela željeza kao što je Incoloy 800 pokazuju dobru otpornost u reducirajućim atmosferama. U oksidirajućim atmosferama, brzina korozije sulfidizacije je nešto niža nego u reducirajućim atmosferama, a legure s visokim udjelom željeza te s udjelom kroma preko 20 % imaju veću korozivnu otpornost na ovaj oblik korozije od ostalih legura nikla [19]. Na slici 10. prikazan je slučaj sulfidizacije legure na bazi nikla Rene 77.



**Slika 10. Prikaz sulfidizacije legure Rene 77 [19]**

Na slici 10. je prikazana lopatica plinske turbine izrađena od niklove legure Rene 77 i došlo je do sulfidizacije zbog izlaganja ispušnim plinovima pri temperaturama iznad 900 °C. Općenito, dodavanje viših udjela željeza, aluminijsa ili silicija, te kroma iznad 15% će dati korozivnu otpornost pri određenim uvjetima na sulfidizaciju [19].

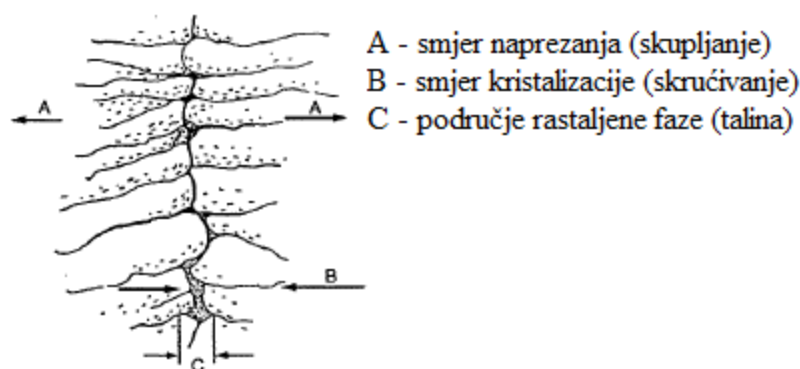
## 4. ZAVARLJIVOST LEGURA NIKLA

Zavarljivost je sposobnost materijala, da se pri određenim uvjetima zavarivanja ostvari kontinuirani zavareni spoj, koji će svojim svojstvima zadovoljiti predviđenim uvjetima i vijeku primjene. Zavarljivost nikla i legura nikla je u pravilu dobra. Na zavarljivost nikla i legura nikla utječu kemijski sastav, struktura i tehnološka disciplina. Glavni zahtjev prilikom zavarivanja ovih legura jest čistoća, a to znači da područje pripreme spoja mora biti bez prisustva masti, ulja, prašine. U protivnom će nastati tople pukotine, poroznost, uključci, naljepljivanje, pukotine zbog pada žilavosti ili korozijska oštećenja. Tople pukotine kod zavarivanja niklovih legura nastaju na visokim temperaturama tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja. Prostiru se po granicama zrna materijala, najčešće po dužini u sredini zavara, ali moguća su i u zoni utjecaja topline. Kod zavarivanja niklovih legura specifične su dvije vrste toplih pukotina, a to su kristalizacijske ili solidifikacijske pukotine koje se javljaju pri posljednjoj fazi skrućivanja taline u zoni taljenja i likvacijske pukotine zone utjecaja topline koje se pojavljuju u djelomice rastaljenoj zoni ZUT-a. Poroznost legura nikla uzrokovana je prisustvom plinova kao što su vodik, kisik, dušik i ugljikov dioksid. Pukotine zbog pada žilavosti legura nikla posljedica su pada žilavosti većine austenitnih legura pri određenim temperaturnim rasponima [2].

### 4.1. Kristalizacijske ili solidifikacijske pukotine legura nikla

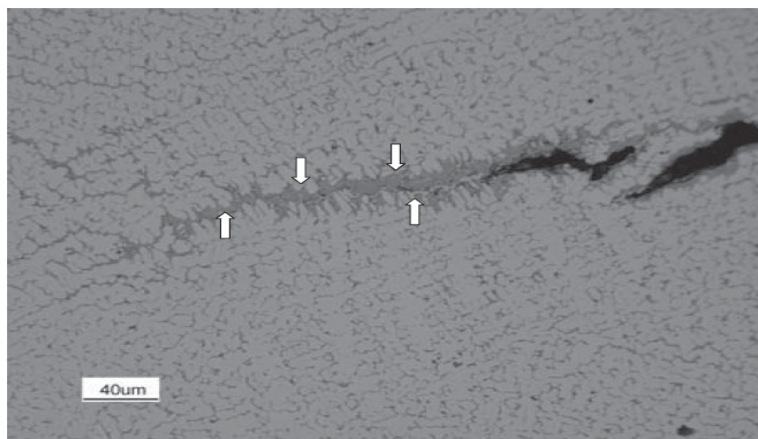
Kristalizacijske ili solidifikacijske pukotine obično nastaju, kao što je navedeno, u zoni taljenja (fuzije), pri završetku skrućivanja metala. Navedene pukotine su metalurški fenomen koji je prisutan pri zavarivanju širokog raspona metalnih legura te je u proteklih 40 godina predmet značajnih znanstvenih istraživanja. Kristalizacijske pukotine nastaju prilikom kristalizacije u zoni taljenja, kada je između kristala prisutna i rastaljena faza. Glavni uzrok pojave kristalizacijskih pukotina je prisutnost filma s nisko taljivim fazama na granicama kristala tijekom primarne kristalizacije. Prilikom skupljanja taline kod hlađenja zavara javljaju se mikro-pukotine na granici kristala koje se tijekom daljnjeg hlađenja šire u makro-pukotine. Naravno, širenje pukotine ovisi o naprezanju i svojstvima materijala na vrhu početne pukotine. Sama krutost zavarenog spoja uzrokuje vlačna reakcijska naprezanja koja pri stezanju premašuju vlačnu čvrstoću materijala pri visokim temperaturama zbog kojih metal zavara može izgubiti sposobnost da izdrži naprezanja nastala skupljanjem u posljednjoj fazi skrućivanja pri visokim temperaturama. Pojednostavljeni prikaz nastanka kristalizacijskih pukotina može se opisati na sljedeći način, (slika 11.) [21, 22]:

1. skrućivanje zavara počinje od hladnih stranica žlijeba prema sredini zavara, a rastaljena faza popunjava razdvojeni dio (B);
2. u završnoj fazi skrućivanja preostaje tanki film rastaljene faze između zrna skrućenog materijala (C);
3. područje skrućenog materijala skuplja se u smjeru suprotnom od pravca skrućivanja stvarajući velika naprezanja (A);
4. ako u procesu između skupljanja i skrućivanja, nadvlada skupljanje, ostat će zrna materijala razdvojena, u toplom stanju – kristalizacijska pukotina (E).



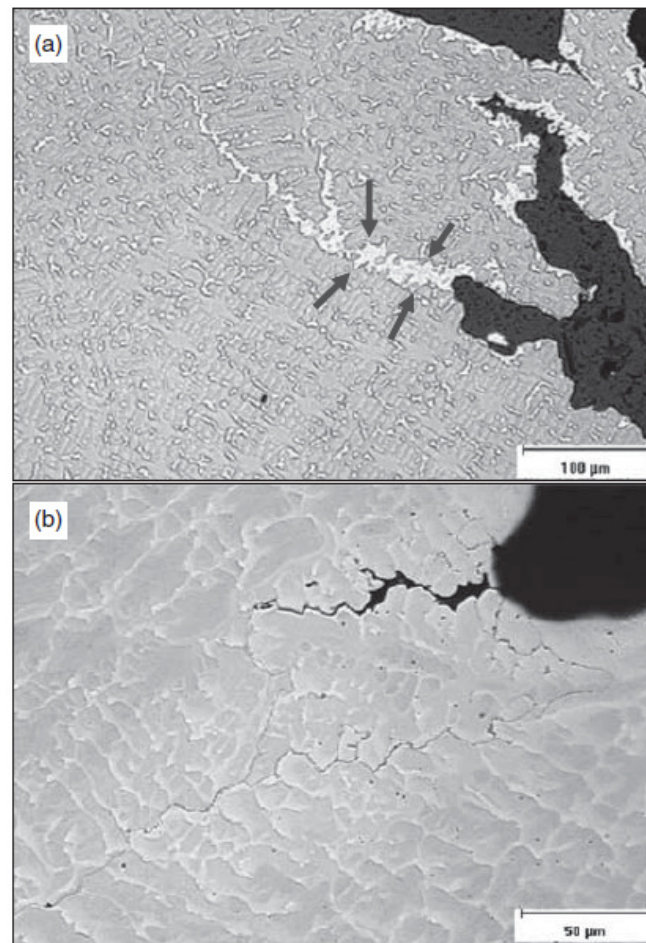
**Slika 11. Prikaz mehanizma nastanka kristalizacijskih pukotina [22]**

Kristalizacijske pukotine u zoni taljenja legura na bazi nikla predmet su mnogih istraživanja i njihov mehanizam nastanka je općenito dobro poznat. Kristalizacijske pukotine nastaju tijekom završne faze skrućivanja kada je prisutan tanki film rastaljene faze između zrna skrućenog materijala. U završnoj fazi sile skupljanja u području granice zrna postaju velike. Prisustvo rastaljene faze na granici zrna smanjuje čvrstoću i dolazi do odvajanja zrna, odnosno kristalizacijske pukotine [2]. Na slikama 12. i 13. prikazane su kristalizacijske pukotine legura nikla.



**Slika 12. Prikaz kristalizacijske pukotine legure nikla [2]**





**Slika 13. Prikaz kristalizacijskih pukotina legura nikla: a) legura 625 b) legura 230 [2]**

Iz slika 12. i 13. može se dobro uočiti kako kristalizacijske pukotine nastaju duž granica kristala i dendritnog područja, odnosno područja koja se posljednja skrućuju u materijalu. Tamni konstituent označen sa strelicama na slici 12. je eutektik, odnosno film rastaljene niskotaljive faze u posljednjoj fazi skrućivanja. Takav kontinuirani film rastaljene faze duž granica zrna tijekom skrućivanja može uzrokovati nastanak pukotine ometanjem stvaranja čvrstih granica između zrna. Slika 13. prikazuje kako udio tankog filma rastaljene faze može varirati ovisno o vrsti legure. U slučaju legure 625 postoji veliki udio tankog filma rastaljene faze duž granica zrna, što je naznačeno strelicama na slici 13. a). S druge strane, film rastaljene faze duž granica zrna nije vidljiv kod legure 230, slika 13. b). U stvarnosti je on prisutan, ali je toliko tanak da se jedva vidi pod SEM mikroskopom [2].

Za legure na bazi nikla koje skrućuju kao jednofazni austenit bez znatnih intermetalnih ili karbidnih spojeva na kraju skrućivanja, sklonost prema nastanku kristalizacijskih pukotina ovisi o udjelu nečistoća i pratećih kemijskih elemenata. Najvažniji kemijski elementi nečistoća u

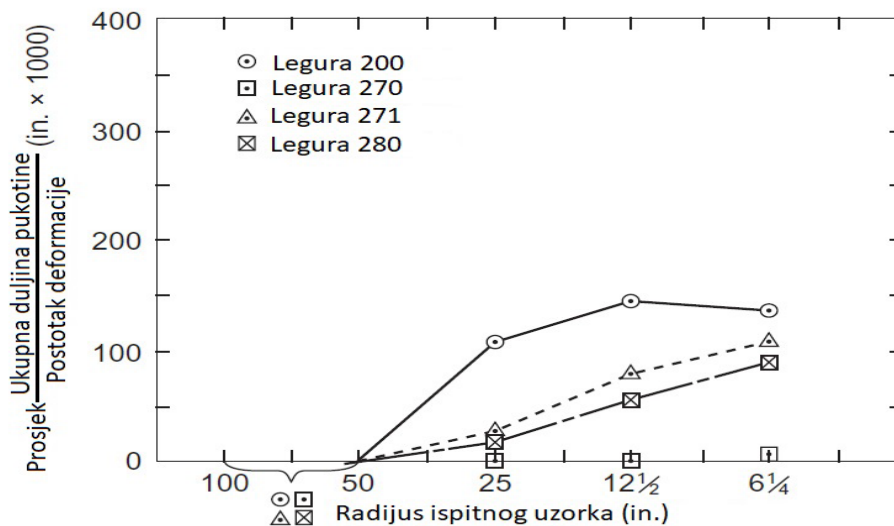
niklovim legurama su sumpor i fosfor, a ponekad srebro i olovo. Bor također može povećati sklonost nastanka kristalizacijskih pukotina, ali on nije prisutan u većini legura na bazi nikla koje su očvrstljive kristalima mješancima. Bor se često dodaje kao legirni element u superlegure kako bi povećao otpornost na puzanje. Za tehnički čisti nikal, kao i legure Ni - Cu, Ni - Cr i Ni - Fe - Cr, utjecaj elemenata kao što su sumpor, fosfor i bor na zavarljivost dobro je poznat [2]. Parametri skrućivanja koji su relevantni za sklonost prema nastanku kristalizacijskih pukotina prikazani su u tablici 15.

**Tablica 15. Prikaz relevantnih parametara skrućivanja za sklonost nastanka kristalizacijskih pukotina [2]**

Sustav	k	Maksimalna topivost (maseni udio, %)	Eutektička temperatura, ° C
Ni-P	0,02	0,32 P	870
Ni-S	~0	~ 0 S	637
Ni-B	0,04	0,7 B	1093
Ni-Si	0,70	8,2 Si	1143

Kemijski elementi fosfor, sumpor i bor imaju vrlo nisku topljivost u austenitu i zbog toga se odvajaju (niske vrijednosti koeficijenta k) od taline tijekom skrućivanja. Tako nastaju nisko taljive faze u području dendrida i granica zrna i značajno se povećava sklonost nastanku kristalizacijskih pukotina. Utjecaj navedenih nečistoća u složenijim legurama nikla se ne može precizno opisati jednostavnim parametrima prikazanim u tablici 15., međutim navedeni podaci prikazuju njihov opći utjecaj. Iako silicij može tvoriti niskotaljive Ni-Si spojeve (silikate) nije toliko opasan kao ostale nečistoće osim u slučaju kada je prisutan u relativno velikim količinama. Utjecaj sumpora i silicija na sklonost prema nastanku kristalizacijskim pukotinama prikazan je na slici 14. i tablici 16. koja prikazuje rezultate Varestraint testa nekoliko različitih tehnički čistih legura nikla. Iz slike 14. uočava se da se sklonost nastanka kristalizacijskih pukotina (izražena preko omjera duljine pukotine i postotka deformacije) povećava s porastom udjela silicija (Si) i sumpora (S). Maseni udjeli fosfora i sumpora su niski u legurama na bazi nikla gdje je bitna otpornost na kristalizacijske pukotine. Maseni udio sumpora je obično manji od 0,003 %, a fosfora manji od 0,01 %. Dodatak mangana je često poželjan jer mangan se spaja s tekućim sumporom i stvara manganov sulfid (MnS) koji ima temperaturu tališta sličnu čeliku. Struktura manganovog sulfida je sferna i formira se između zrna metala zavara koja se skrućuju bez nastanka rastaljenog tekućeg tankog filma po granicama zrna. Tako će se održati kohezija između zrna i spriječiti nastanak kristalizacijskih pukotina [2, 23].

Općenito, niklove legure imaju dobru zavarljivost ako se kontrolira sadržaj nečistoća [2].

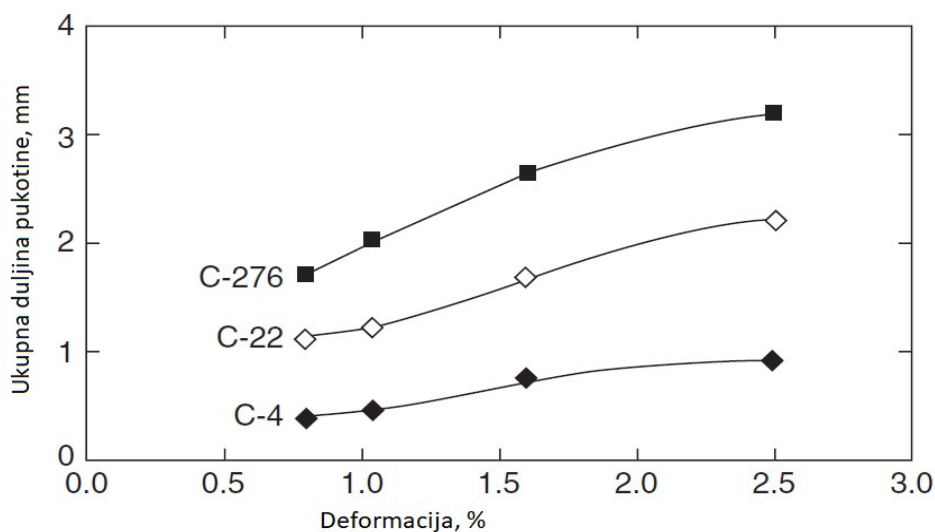


Slika 14. Prikaz rezultata Varesstraint testa [2]

Tablica 16. Prikaz rezultata Varesstraint testa [2]

Legura	Udio kemijskog elementa, %						
	C	Mn	Fe	S	Si	Cu	Ni
200	0,08	0,18	0,2	0,005	0,18	0,13	Ostatak
270	0,01	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	Ostatak
271	0,11	-	0,001	0,001	0,023	-	Ostatak
280	0,12	-	0,002	0,001	-	0,001	Ostatak

Cieslak je istraživao zavarljivost sljedećih legura nikla s kromom i molibdenom: C-4, C-22 i C-276. Rezultati Varesstraint testa tog ispitivanja prikazani su na slici 15.



Slika 15. Prikaz rezultata Varesstraint testa za legure C-276, C-22 i C-4 [2]

Prema tom ispitivanju najveću sklonost kristalizacijskim pukotinama ima legura C-276, a najmanju legura C-4. Legura C-4 ne stvara niti jednu fazu pri nižim temperaturama, samo stvara vrlo malu količinu titanovih karbida (TiC) pri kraju solidifikacije. Prema tome, legura C-4 ima odličnu zavarljivost, sličnu austenitnim nehrđajućim čelicima tipa SAE 304 (europske oznake 18Cr-8Ni). Veća sklonost nastanku kristalizacijskih pukotina legura C-22 i C-276 pripisana je stvaranju faza pri nižim temperaturama (1285 °C). Zbog stvaranja veće količine filma rastaljene faze po granicama zrna pri kraju solidifikacije, legura C-276 ima nešto veću sklonost prema nastanku kristalizacijskih pukotina u odnosu na leguru C-22. Međutim, te tri legure pokazuju dobro svojstvo zavarljivosti u praksi [2].

Skupljanjem podataka o zavarljivosti iz raznih studija može se razviti opća klasifikacijska shema sklonosti niklovi legura prema kristalizacijskim pukotinama, kao što je prikazano u tablici 17.

**Tablica 17. Prikaz klasifikacije sklonosti niklovi legura prema nastanku kristalizacijskih pukotina [2]**

Sklonost prema kristalizacijskim pukotinama			
Vrsta legure	Niska	Srednja	Visoka
Čisti nikal	200, 270, 271, 280		
Ni-Cu	400		
Ni-Mo	B2, B3		
Ni-Cr		600, 601, 230	
Ni-Cr-Mo	C-4, C-22, C-276, C-200, 59, 686	W, 242, X, 617	
Ni-Cr-Mo-Nb		625	
Ni-Co-Cr-Si			HR-160

Tehnički čisti nikal je otporan prema nastanku kristalizacijskih pukotina jer je njegov temperaturni raspon solidifikacije relativno uzak. To je potvrdio Lingenfelter u svojoj studiji provedenoj nad vrlo širokom rasponu niklovi legura. U toj studiji tehnički čisti nikal ispitan je s unosom topline većim za 30 % u odnosu na ostale legure i postigao je najmanje duljine pukotine unatoč tome što povećani unos topline povećava sklonost nastanka kristalizacijskih pukotina. Legura Monel 400 pokazala je nešto veću sklonost prema nastanku kristalizacijskih pukotina u odnosu na čisti nikal. Jednofazna solidifikacija nikla i legura Ni-Cu doprinosi maloj sklonosti prema nastanku kristalizacijskih pukotina. Iako se kod legura tipa B i C prilikom skrućivanja stvaraju faze, te faze imaju relativno visoku temperaturu tališta i ne mijenjaju značajno temperaturni interval solidifikacije i stoga imaju dobru otpornost na pukotine. Legure

koje su klasificirane u srednju sklonost prema nastanku kristalizacijskih pukotina stvaraju faze koje imaju nižu temperaturu tališta u odnosu na prethodne legure. Legura HR-160 ima visok sadržaj silicija koji stvara nisko taljive faze i stoga ima najveću sklonost prema nastanku pukotina. Treba naglasiti da je klasifikacija iz tablice 17. nastala prema rezultatima Varestraint testa. Varestraint test se koristi kao metoda ispitivanja sklonosti prema kristalizacijskim pukotinama od 1960-ih godina i široko je prihvaćena kao metoda određivanja zavarljivosti metala [2].

#### 4.2. Likvacijske pukotine u zoni utjecaja topline legura nikla

Općenito, likvacijske ili podsolidusne pukotine nastaju u temperaturnom intervalu između temperature solidusa legure i temperature tališta niskotaljivih faza, obično eutektika [24]. Najčešće likvacijske faze su sulfidi, oksisulfidi i karbosulfidi, kao što je prikazano u tablici 18.

Tablica 18. Prikaz eutektičkih faza [24]

Element	Topljivost		Faza koju tvori element	Temperatura, tališta, °C
	U austenitu pri temperaturi	U feritu pri temperaturi		
S	0,05 % pri 1365 °C	0,14% pri 1366°C	eutektik Fe-FeS	998
			eutektik Ni-NiS	630
P	0,2% pri 1250°C	1,6% pri 1250°C	eutektik Fe-Fe <sub>3</sub> P	1048
			eutektik Ni-Ni <sub>3</sub> P	875
B	0,005% pri 1381°C	0,5% pri 1381°C	eutektik Fe-Fe <sub>2</sub> B	1177
			eutektik Ni-Ni <sub>2</sub> B	1140
			eutektik (FeCr) <sub>2</sub> B	1140
Nb	1% pri 1300°C	4,1% pri 1300°C	eutektik Fe-Fe <sub>2</sub> Nb	370
			eutektik NbC-austenit	1315
Ti	0,36% pri 1300°C	8,1% pri 1300°C	eutektik Fe-Fe <sub>2</sub> Ti	1290
			eutektik TiC-austenit	1320
Si	10,5% pri 1300°C	10,5% pri 1300°C	eutektik Fe-Fe <sub>2</sub> Si	1212

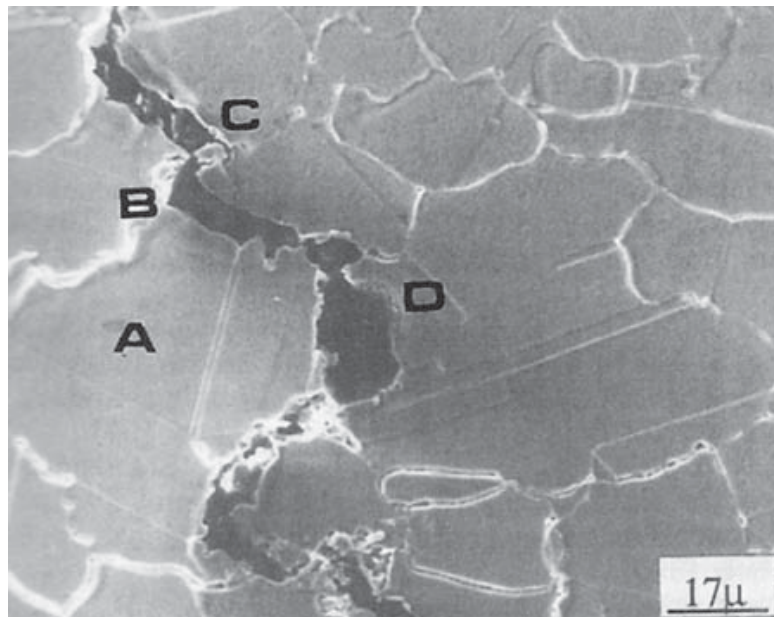
Tijekom zavarivanja osnovni materijal u ZUT-u nije rastaljen, a budući da nečistoće (eutektičke faze) imaju nisko talište zbog utjecaja topline one će se prve rastaliti u ZUT-u. Nastala talina penetrirat će oko granica zrna što će dovesti do pada čvrstoće po granici zrna i omogućit će nastajanje pukotina pri hlađenju uz naprezanja od stezanja taline [24].

Likvacijske pukotine u zoni utjecaja topline nastaju kao posljedica tri povezana uvjeta. Prvi uvjet je prisutnost filmova rastaljenih faza (nečistoća) u mikrostrukturi metala. Oni se formiraju iznad određene kritične temperature, koja ovisi o osnovnom metalu i njegovim toplinskim obradama (ako je metal prošao toplinsku obradu). Drugi uvjet je odvijanje toplinski uzrokovanog rasta zrna, kako bi se omogućila interakcija između rastaljenih filmova i granica zrna. U području zone utjecaja topline, koje se nalazi uz liniju staljivanja, gotovo uvijek dolazi do rasta zrna u određenoj mjeri. Treći uvjet je da rastaljeni film mora moći obuhvatiti granicu zrna, ili kroz nju prodrijeti, kako bi joj povećao podložnost prema nastanku pukotina [21].

Sve legure umjesto pri jednoj određenoj temperaturi, tale se i skrućuju u određenom temperaturnom intervalu. Općenito, što je veći udio legirnih elemenata, to je veći temperaturni interval skrućivanja/taljenja. Iz tog razloga legure na bazi nikla koje su očvrstljive kristalima mješancima zbog visokog udjela legirnih elemenata imaju veliki temperaturni interval skrućivanja/taljenja. Zbog unosa topline tijekom zavarivanja, područje neposredno uz zonu taljenja će biti izloženo temperaturama u rasponu od temperature solidusa i temperature likvidusa legure. To znači da će mikrostruktura tog područja biti djelomično rastaljena i stoga se ta zona nazivna djelomično rastaljena zona (DRZ) i nalazi se unutar zone utjecaja topline (ZUT-a). Likvacijske pukotine duž granica zrna mogu se pojaviti u djelomično rastaljenoj zoni legura nikla, kada nastala talina u toj zoni ne može podnijeti naprezanja uzrokovana skrućivanjem metala zavara. Sklonost prema nastanku ovakvih pukotina je veća kada se primjenjuju postupci zavarivanja koji rezultiraju visokim unosom topline, kao što je MAG zavarivanje štrcajućim lukom [2].

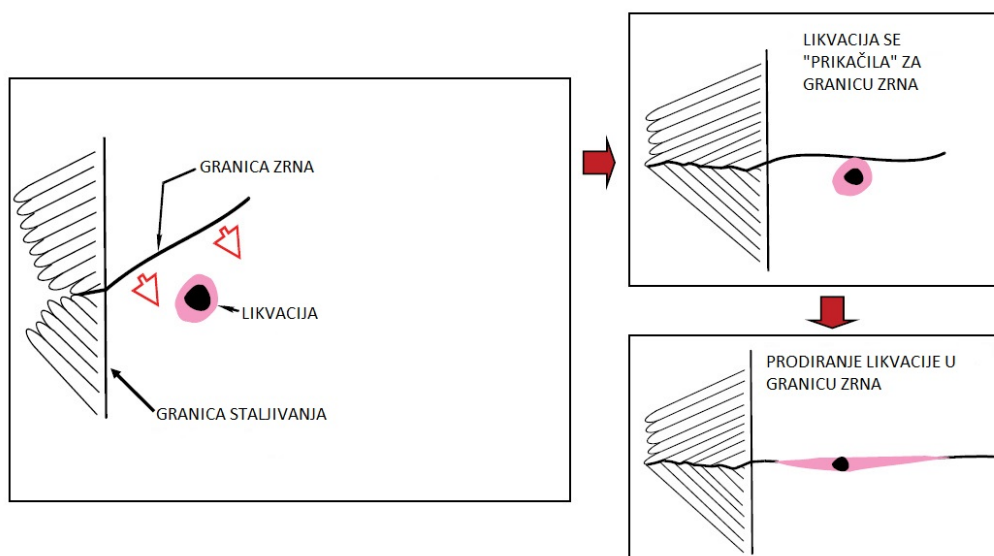
Postoje dva mehanizma nastanka likvacijskih pukotina u zoni utjecaja topline, a to su penetracijski mehanizam i segregacijski mehanizam. Kod segregacijskog mehanizma, nečistoće se difuzijom odvajaju od taline na granicama zrna jer nisu topive u njoj i time dolazi do lokalnog smanjivanja temperature tališta na području granica zrna. Prema segregacijskom mehanizmu nastanka pukotina granice zrna se obogaćuju s dovoljnim količinama nečistoća i time se značajno smanjuje temperatura taljenja granica u odnosu na okolna područja. Kada temperatura u zoni utjecaja topline bude veća od temperature tališta nastale likvacije, granice zrna će se rastaliti i uslijedit će pukotine [2, 21].

Jednofazne legure nikla sklone su segregacijskom mehanizmu gdje se prisutne nečistoće (sumpor, fosfor i bor) odvajaju na granicama zrna i lokalno smanjuju temperaturu tališta i stvaraju niskotaljivi film duž cijele granice zrna [2]. Primjer nastale segregacije i pripadajuće likvacijske pukotine prikazan je za leguru 617 na slici 16.



**Slika 16. Prikaz segregacije i pripadajuće likvacijske pukotine legure 617 [2]**

Za djelovanje penetracijskog mehanizma rastaljenog filma potrebno je najprije zadovoljiti prva dva navedena uvjeta [21]. Penetracijski mehanizam prikazan je na slici 17.

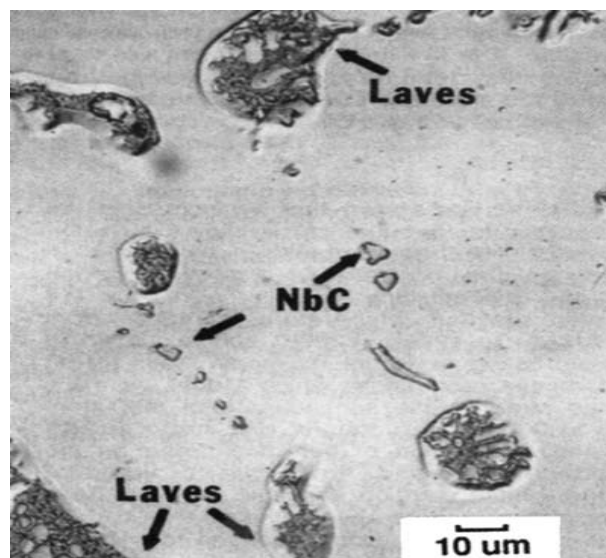


**Slika 17. Prikaz penetracijskog mehanizma nastanka likvacijskih pukotina u ZUT-u [21]**

Za penetraciju likvacije u granicu zrna potrebna je likvacija i pokretna granica zrna. Kada se granica zrna susretne sa likvacijom, bit će „prikvačena“ i daljnje gibanje bit će joj spriječeno. Ovisno o vrijednosti sile površinske napetosti između granice i taline, talina će prodrijeti uz granice zrna. Tako nastaje film taline između granica zrna. Stupanj penetracije ovisi o temperaturi, površinskoj napetosti i količini taline. Prije pojave pukotine stvara se tanki film nečistoća koji je nastao uz granice zrna pod djelovanjem topline iz električnog luka, da bi se

kasnije, kada talina počinje kristalizirati uslijed naprezanja, pojavile pukotine [21]. Kod penetracijskog mehanizma talina nastaje lokalno u mikrostrukтури pri povišenim temperaturama, dok se granice zrna pomiču zbog unosa topline, i dolazi do njihove interakcije kada se susretnu. Talina tada prodire unutar granica zrna i opet uzrokuje lokalno smanjivanje temperature tališta duž granica zrna [2].

Penetracijski mehanizam nastanka likvacijskih pukotina kod niklovi legura, čest je kod onih legura koje sadrže sekundarne faze kao što su intermetalni spojevi i karbidi. U tom slučaju, toplinski ciklus zavarivanja ne dopušta dovoljno vremena za potpuno otapanje sekundarne faze unutar matrice legure. Prilikom zagrijavanja iznad eutektičke temperature, sekundarna faza reagira s matricom legure i stvara likvaciju eutektičkog sastava [2]. Primjer likvacija legure nikla koja sadrži NbC karbide i Laves-ove faze prikazan je na slici 18.



**Slika 18. Prikaz likvacija legure nikla koja sadrži NbC karbide i Lave-ove faze [2]**

Dakle, postoje dva mehanizma nastanka likvacijskih pukotina, segregacijski mehanizam koji je češći kod legura nikla koje su očvrstljive kristalima mješancima i penetracijski mehanizam koji je češći kod precipitacijski očvrstljivih legura nikla. Budući da su legure nikla koje su očvrstive kristalima mješancima jednofazne sa svim legirnim elementima otopljenim u matrici imaju manju sklonost prema nastanku likvacijskih pukotina od precipitacijski očvrstljivih legura nikla. Penetracijski mehanizam moguć je i kod legura koje su očvrstljive kristalima mješancima, posebno kod onih s dodatkom Nb i Ti, kao na primjer legura 625. Poznato je da ti elementi tvore niskotaljive likvacije (karbide) NbC i TiC koju mogu uzrokovati pukotine [2]. Utjecaj sumpora, fosfora i bora na likvacijske pukotine sličan je utjecaju na kristalizacijske pukotine gdje je poznato da su ti elementi posebno opasni. Općenito, od tih elemenata, fosfor

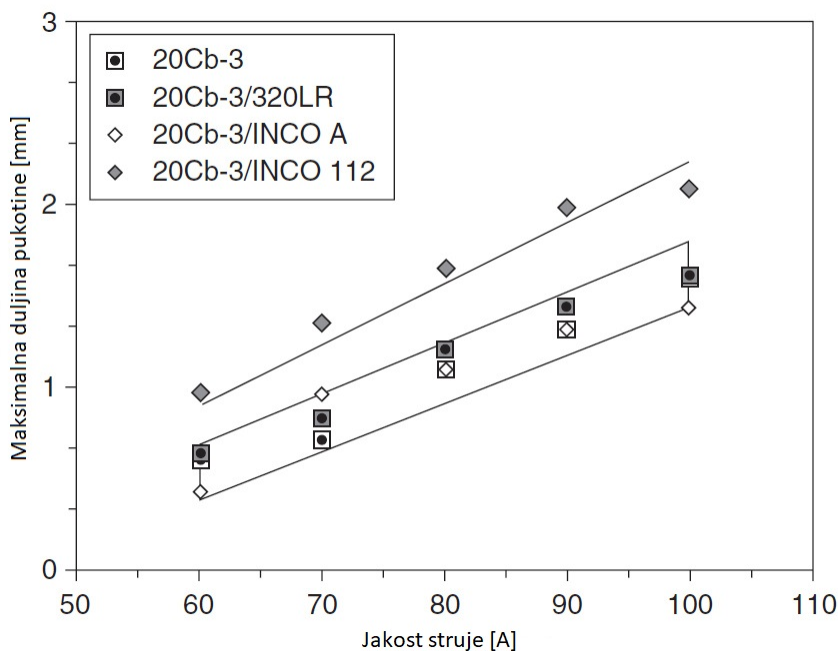


je najmanje opasan, a bor najviše opasan. Ti elementi povećavaju sklonost prema nastanku pukotina stvaranjem niskotaljivih spojeva na granicama zrna. Stoga uvijek treba smanjiti udio nečistoća na što je moguću manju mjeru [2].

#### ***4.2.1. Sprječavanje nastanka kristalizacijskih i likvacijskih pukotina***

U osnovi, postoje tri faktora koja utječu na sklonost prema nastanku kristalizacijskih i likvacijskih pukotina nikla i legura nikla, a to su: kemijski sastav legure, parametri zavarivanja i naprezanje. Pravilnim odabirom procesa i uvjeta zavarivanja možemo modificirati sastav i utjecati na nastala naprezanja u metalu zavara i tako smanjiti sklonost prema nastanku pukotina. U većini slučajeva, pravilnim izborom dodatnog materijala za zavarivanja može se izbjeći ovaj tip pukotina. Kao što je već ranije spomenuto, sklonost prema nastanku pukotina je mala ako metal zavara ne stvara niskotaljive eutektičke faze pri skrućivanju i ako je temperaturni interval skrućivanja uzak. Na osjetljivost prema nastanku likvacijskih pukotina utječu kemijski sastav i mikrostruktura legure pri čemu sitnozrnati materijali imaju veću otpornost prema nastanku pukotina u odnosu na grubozrnate. Preporučuje se kontrola razine nečistoća budući da je poznato da elementi nečistoća poput fosfora, sumpora, bora, olova i srebra povećavaju sklonost prema nastanku pukotina. Također je poželjno izbjegavati kemijske elemente koji tvore nisko taljive eutektične konstituente kao što su niobij, titan i silicij. Međutim, to u većini slučajeva nije moguće jer ti kemijski elementi se namjerno dodaju osnovnom metalu i dodatnom materijalu za zavarivanje. U tim slučajevima potrebno je pronaći kompromis između dobre zavarljivosti i dobrih mehaničkih svojstva [2].

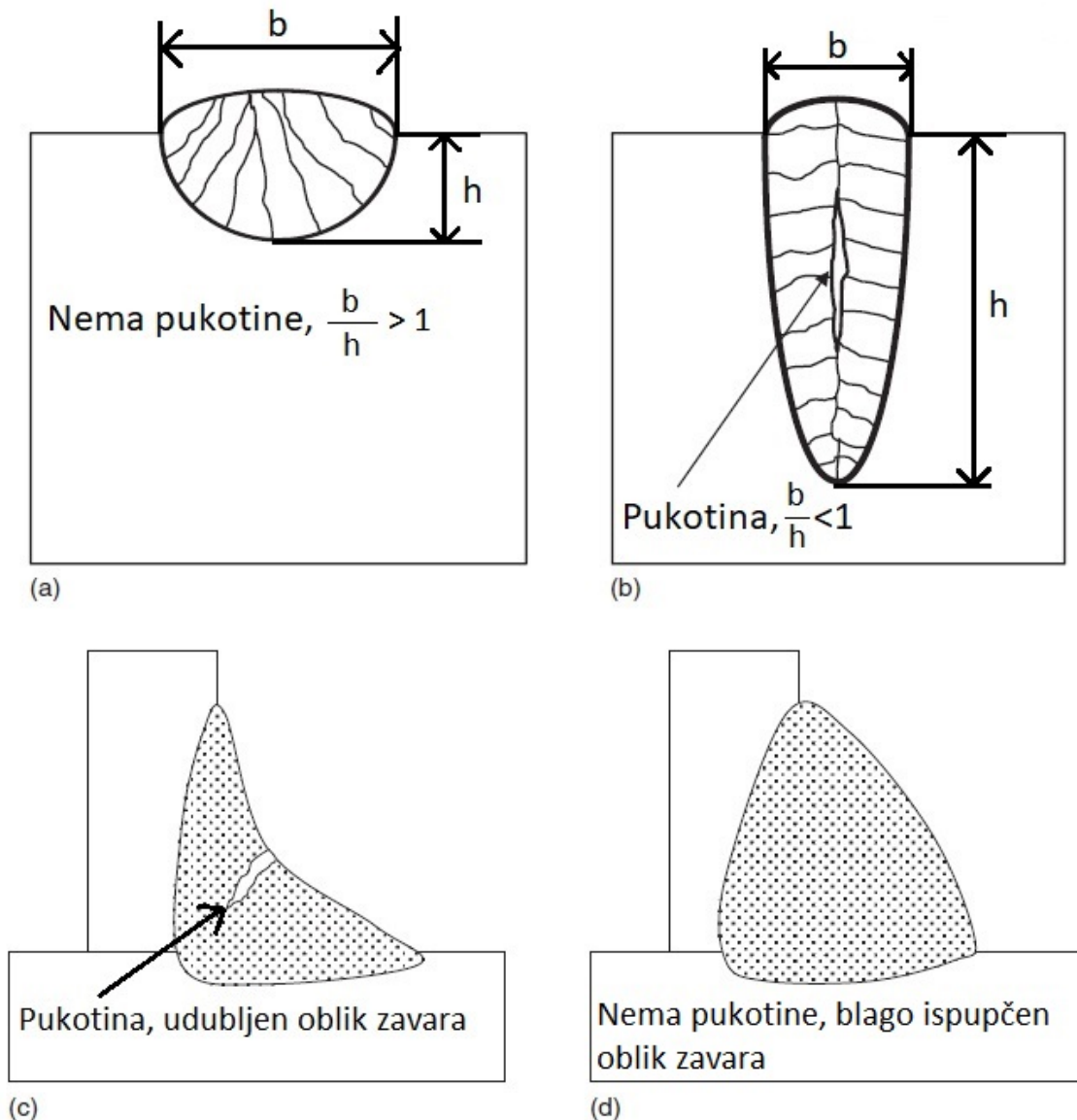
Općenito, za izbjegavanje kristalizacijskih i likvacijskih pukotina potrebno je koristiti procese zavarivanja s niskim unosom topline. Manji unosom topline tijekom zavarivanja smanjit će se veličina metala zavara, koja će rezultirati s manjim silama skupljanja taline tijekom skrućivanja i smanjit će sklonost prema nastanku kristalizacijskih pukotina [2]. Utjecaj unosa topline na osjetljivost prema toplim pukotinama niklove legure 20 Cb-3 prikazan je rezultatima Vareststraint testa na slici 19.



**Slika 19. Prikaz utjecaja unosa topline (struje) u ovisnosti o duljini pukotine [2]**

Slika 18. prikazuje ovisnost maksimalne duljine pukotine o unosu topline (struje) pri TIG zavarivanju punim dodatnim materijalom u zaštiti inertnog plina (oznaka procesa je 141 prema normi HRN EN ISO 4063) legure nikla 20Cb-3 s tri različita dodatna materijala. Uočava se da s porastom unosa topline (struje) proporcionalno raste maksimalna duljina pukotina. Iz čega se može zaključiti da s porastom unosa topline proporcionalno raste i sklonost prema nastanku toplih pukotina [2].

Geometrija taline tijekom zavarivanja također utječe na sklonost prema nastanku kristalizacijskih pukotina. Makroskopski oblik taline utječe na strukturu zrna metala zavara i na iznos naprezanja tijekom skrućivanja [2]. Utjecaj geometrije zavara na sklonost prema pukotinama prikazana je na slici 19. Promjenom odnosa dubina ( $h$ ) i širine ( $b$ ) zavara može se utjecati na strukturu zrna unutar područja metala zavara. Budući da zrna tijekom skrućivanja rastu okomito na granicu taljenja ili tzv. liniju staljivanja, zavari s većom širinom u odnosu na dubinu imat će eliptičan oblik i strukturu kao što je prikazano na slici 20. a). Tada su sile tijekom skupljanja taline manje i samim time sklonost prema nastanku pukotina je manja. Sa smanjenjem omjera ( $b$ )/( $h$ ), oblik metala zavara postaje sve izduženiji, rast zrna je sve više okomit prema središnjoj liniji zavara, kao što je prikazano na slici 20. b).

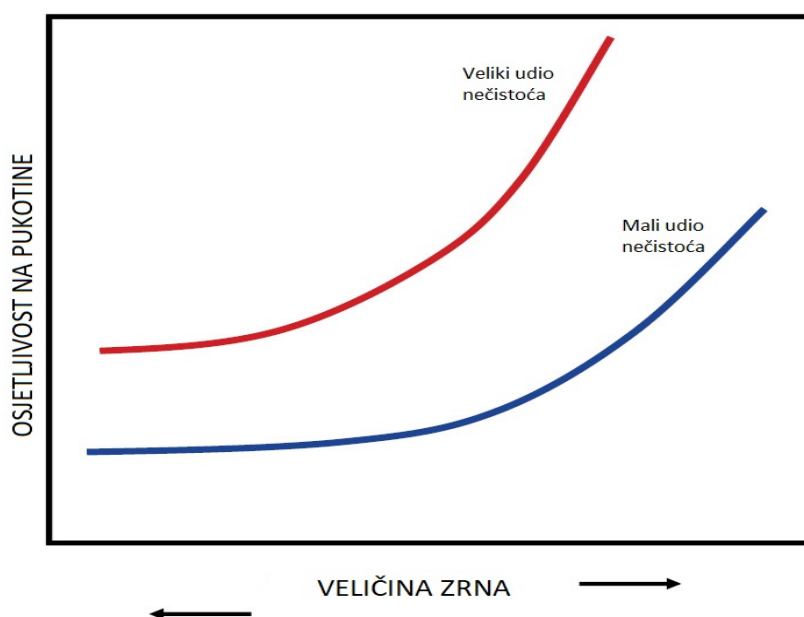


**Slika 20. Shematski prikaz utjecaja geometrije zavora na sklonost prema nastanku kristalizacijskih pukotina [2]**

U tom slučaju prisutna je maksimalna moguća sila skupljanja jer su silnice okomite na središnju liniju zavora duž koje mogu biti prisutni rastaljeni filmovi nečistoća. Takva geometrija zavora jako povećava sklonost prema nastanku pukotina. Kod zavarivanja kutnog spoja bitan je oblik nadvišenja površine lica zavora, kao što je prikazano na slikama 20. c) i d). Zbog boljeg prijelaza silnica naprezanja u opterećenju spoja, izbjegava se previše ispupčeni oblik zavora. Preporučuje se udubljeni kutni zavar s blagim prijelazima. Međutim iskustvo je pokazalo da jednoslojni kutni ili sučeljeni zavari udubljenog oblika imaju veću sklonost pojavi pukotina od blago ispupčenih oblika zavora. Zbog manjih površinskih napetosti koje nastaju tijekom hlađenja blago ispupčeni oblik zavora ima manju sklonost nastanka toplih pukotina od udubljenog oblika

zavara. Kada se udubljeni zavar hladi i skuplja, vanjska površina je jako vlačno napregnuta i može doći do pojave pukotine. Ispupčeni zavar dopušta skupljanje tijekom hlađenja bez previsokih naprezanja vanjske površine. Pri tome se ne misli na previše ispupčen oblik zavara jer on uzrokuje druge probleme [2, 22]. Do nepovoljnog omjera  $b/h < 1$  kao na slici 20. b) može doći zbog prevelike brzine zavarivanja, i stoga je potrebno smanjiti brzinu zavarivanja kako bi se postigao više povoljniji eliptičan oblik metala zavara kao na slici 20. a).

Poznato je da s porastom veličine zrna raste i sklonost prema likvacijskim pukotinama. Manja veličina zrna znači veća površina granica zrna (veća žilavost) i ona rezultira u žilavijoj mikrostrukturi koja može podnijeti naprezanja u zavaru tijekom skupljanja metala zavara kod skrućivanja. Čak i ako su filmovi taline prisutni, povećana granična površina će spriječiti potencijalne pukotine. S povećanjem veličine zrna smanjuje se površina granice zrna, pa tako i žilavost. Ako je prisutna talina uzduž granica zrna, grubozrnati materijal bit će podložniji pukotinama jer je ukupna suma površina između granica zrna koja preuzima opterećenja manja od površine sitnozrnate strukture. Na slici 21. prikazan je utjecaj nečistoća i veličine zrna na osjetljivost prema nastanku likvacijske pukotine [21].



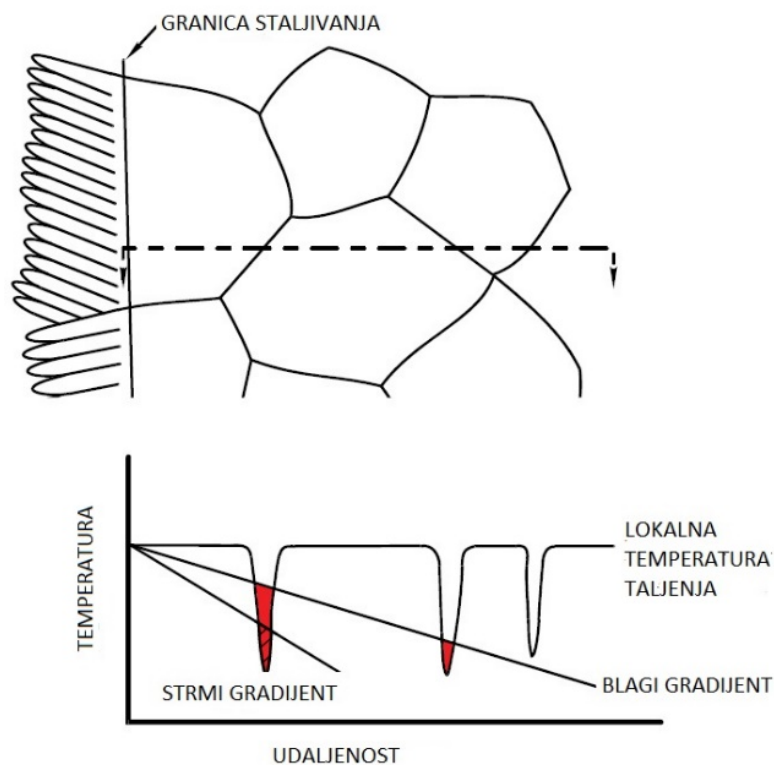
**Slika 21. Prikaz utjecaja veličine zrna i nečistoća na osjetljivost prema pukotinama [21]**

Na iznos sile skupljanja tijekom skrućivanja metala zavara možemo donekle utjecati pravilnim oblikovanjem zavarenog spoja i pravilnim odabirom parametara zavarivanja. Općenito, niži unos topline i manji zavari s ispupčenim licem zavara smanjit će sklonost prema nastanku kristalizacijskih pukotina. U većini slučajeva, pravilan odabirom osnovnog i dodatnog materijala

koji su po prirodi otporni na ovaj oblik pukotina je najbolje rješenje za izbjegavanje ovih pukotina [21].

Toplinska obrada metala može utjecati na sklonost prema likvacijskim pukotinama. Homogenizacijskim (difuzijskim) žarenjem uklanjaju se segregirane faze na granicama zrna koje bi mogle likvirati i smanjuju se zaostala naprezanja, pa tako se smanjuje mogućnost nastanka toplih pukotina. Ali s druge strane nastaje grubo zrno koje nije poželjno, pa je potrebno ostvariti kompromis. To je posebno bitno kod zavarivanja precipitacijski očvrnutih materijala poput niklovi superlegura [21].

Budući da likvacijske pukotine nastaju u određenom temperaturnom intervalu, preko unosa topline može se kontrolirati temperaturni gradijent u zoni utjecaja topline. Na slici 22. prikazan je utjecaj temperaturnog gradijenta na lokalno taljenje duž granice zrna u zoni utjecaja topline [21].



**Slika 22. Utjecaj temperaturnog gradijenta na lokalno taljenje duž granice zrna u ZUT-u [21]**

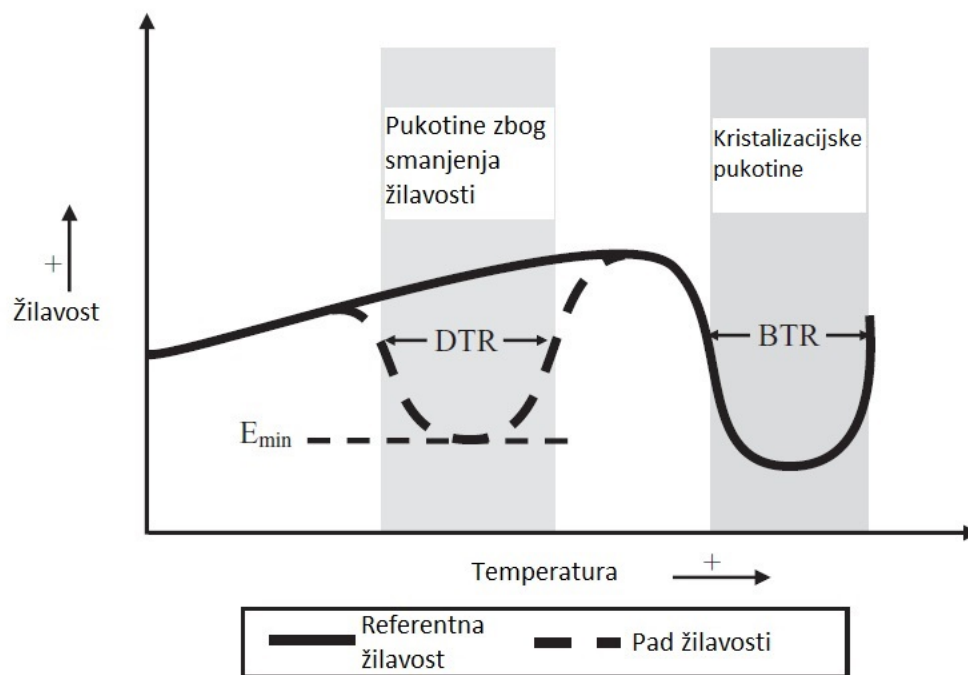
Strmi temperaturni gradijent u zoni utjecaja topline (niži unos topline u zavar) može značajno smanjiti količinu lokalnog taljenja duž granice zrna u ZUT-u. Preveliki unos topline doprinosi povećanju zrna, smanjenju žilavosti pa i sklonosti toplim pukotinama [21].

Još jedan utjecajni čimbenik koji ima ograničeni učinak na tople pukotine je čvrstoća dodatnih materijala za zavarivanje. Budući da je većina naprezanja u ZUT-u povezana sa skupljanjem

metala zavora kod skrućivanja, dodatni materijali niže čvrstoće doprinose manjem naprezanju uslijed skupljanja metala zavora. U većini situacija takav pristup se ne primjenjuje zato što brojni drugi faktori imaju prednost prilikom odabira dodatnog materijala [21].

### 4.3. Pukotine zbog smanjenja žilavosti

Pukotine zbog smanjenja žilavosti (engl. Ductility-dip cracking) postale su problem zavarljivosti kada su se počeli koristiti dodatni materijali za zavarivanje s visokim sadržajem kroma (25 - 30 %) zbog sprječavanja napetosne korozije u postrojenjima za proizvodnju električne energije. To je pojava koja se javlja kod raznih konstrukcijskih materijala kao što su austenitni nehrđajući čelici, legure bakra, titana i nikla. U materijalima koji su skloni ovoj pojavi nastanka pukotina dolazi do naglog pada žilavosti u temperaturnom intervalu između temperature solidusa ( $T_s$ ) i  $0,5T_s$  [2]. Taj temperaturni interval pada žilavosti je često mali, kao što je prikazano na slici 23.

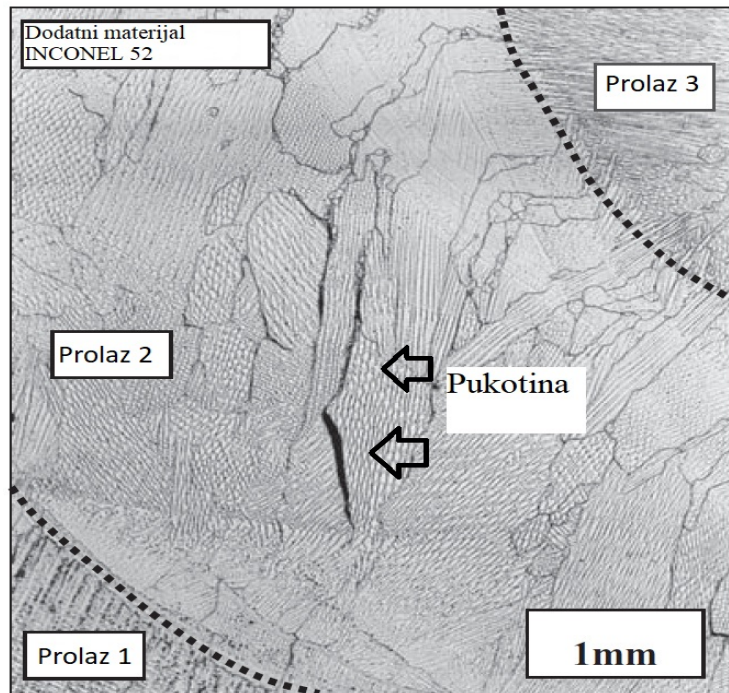


Slika 23. Prikaz žilavosti kao funkcija temperature [2]

Pukotine zbog smanjivanja žilavosti mogu se definirati kao gubitak žilavosti u temperaturnom intervalu ispod temperature solidusa koji je dovoljan za nastanak pukotina pod djelovanjem toplinskih napreznja uzrokovanih zavarivanjem. Još uvijek nije prihvaćen opći mehanizam nastanka ovih pukotina u legurama nikla i u ostalim metalima. Moguće je da se mehanizam nastanka ovog tipa pukotina razlikuje ovisno o vrsti materijala. Međutim, poznato je da sve

austenitne legure s FCC kristalnom rešetkom pokazuju sklonost prema pukotinama zbog smanjenja žilavosti [2].

Pukotine zbog smanjenja žilavosti mogu biti ozbiljan problem prilikom zavarivanja mnogih legura na bazi nikla, pogotovo ako se radi o višeprolaznom zavarivanju debljih komada gdje su prisutna veća toplinska naprezanja zbog zavarivanja [2]. Takav slučaj pukotine koja je nastala pri zavarivanju u tri prolaza legure nikla korištenjem dodatnog materijala INCONEL 52 (oznake NiCr30Fe9 prema ISO 18274) prikazan je na slici 24.



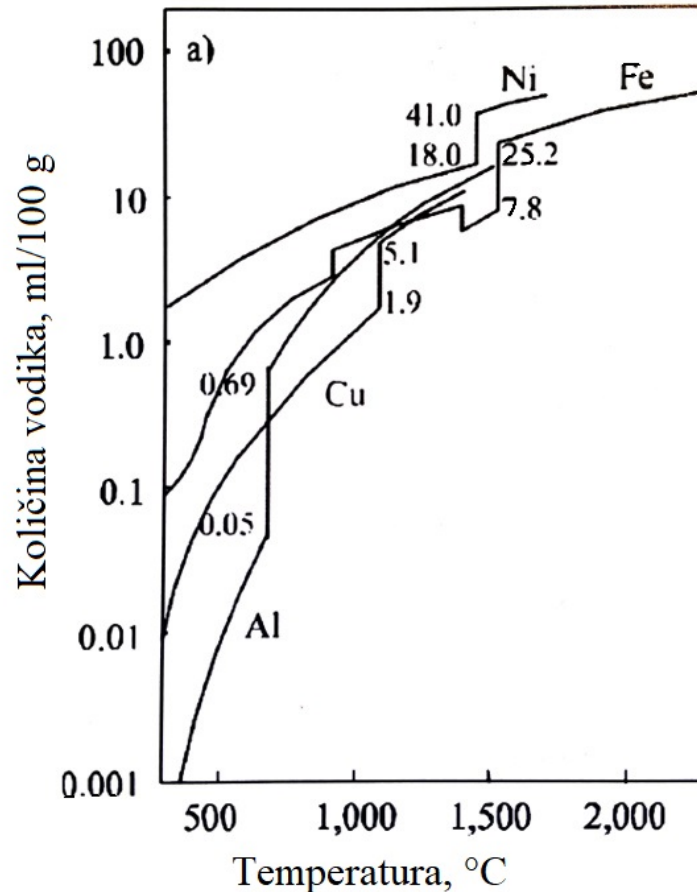
Slika 24. Prikaz pukotine zbog smanjenja žilavosti [2]

Korištenje plinske mješavine argon/vodik pri zavarivanju niklovih legura povećava se sklonost ovom obliku pukotina. Te mješavine se općenito primjenjuju jer olakšavaju zavarivanje niklovih legura i pomažu pri sprječavanju naljepljivanja. Korištenjem čistog argona ili helija kao zaštitnih plinova može pomoći pri smanjenju sklonosti prema ovom obliku pukotina. Također, potrebno je odabrati dodatni materijal koji je otporan na ovaj oblik pukotina [2].

#### 4.4. Pogreška nastajanja poroznosti pri zavarivanju legura nikla

Poroznost u metalu zavara su mjesta ispunjena stlačenim plinom koji ušao u talinu tijekom zavarivanja i nije stigao difundirati iz nje. Poroznosti mogu biti različitih veličina, od vrlo sitnih, okom nevidljivih, pa do veličina od nekoliko milimetara. Princip nastajanja pogreške poroznosti temelji se na činjenici da topivost plina u rastaljenom metalu zavara raste. Vodik i

dušik otapaju se direktno, za razliku od kisika koji se otapa indirektno, tj. u spoju s ugljikom (ugljični monoksid) [22]. Na slici 25. prikazana je topivost vodika u različitim metalima: aluminiju, bakru, željezu i niklu. Iz navedene slike uočava se da nikal u rastaljenom stanju otapa znatno više vodika u odnosu na ostale metale.

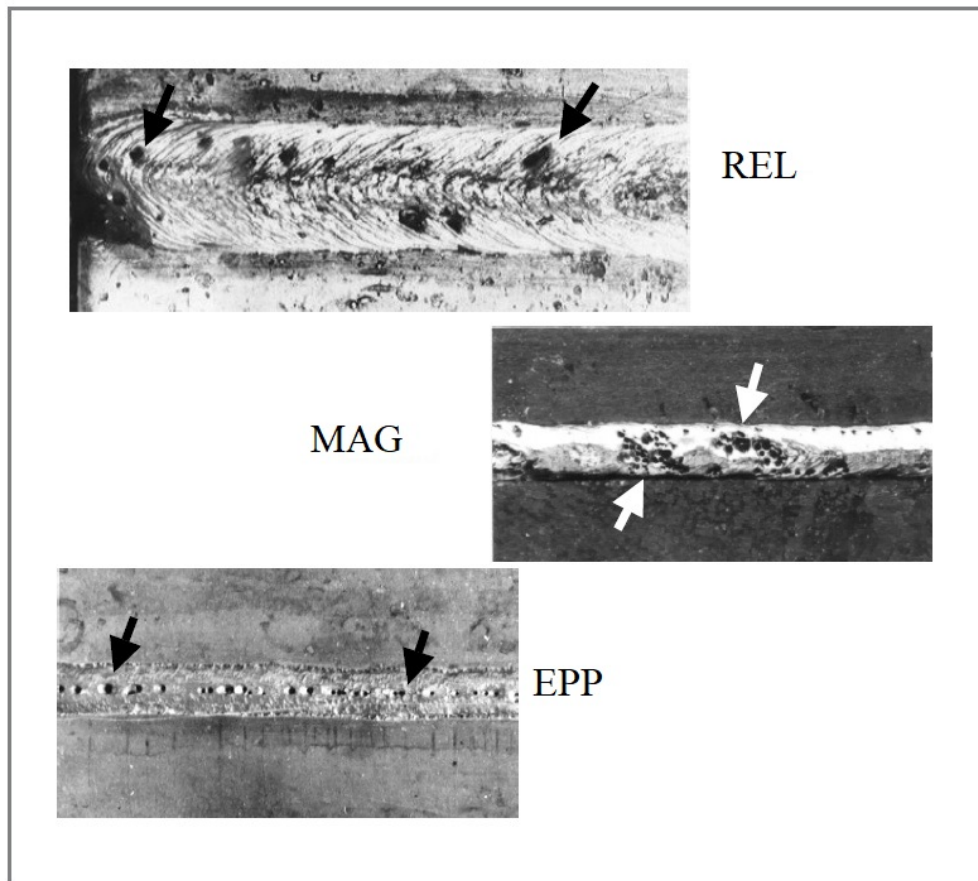


Slika 25. Prikaz rastvorivosti vodika u različitim metalima [22]

Tijekom skrućivanja metala zavora plinovi iz taline naglo izranjaju iz taline u obliku mjehurića. Ako je pritom brzina izranjanja plinova manja od brzine skrućivanja metala zavora, plinovi će ostati zarobljeni u zavoru. Izranjajući iz zavora, plinski mjehurići mogu ostaviti vidljive šupljine na površini zavora. Veličine i oblici šupljih mjesta (pora) ovise o količini upijenog, odnosno izlazećeg plina iz taline metala zavora i brzine skrućivanja [22]. Na slici 26. prikazani su primjeri poroznosti nastali u zavarenim spojevima za tri različita postupka zavarivanja: REL (oznaka 111 prema HRN EN ISO 4063), MAG (oznaka 135 prema HRN EN ISO 4063) i EPP (oznaka 121 prema HRN EN ISO 4063).

Poroznost legura nikla uzrokovana je zbog prisustva plinova kao što su vodik, kisik, dušik te ugljikov dioksid [3].





Slika 26. Prikaz primjera poroznosti u zavarenom spoju [25]

Navedeni štetni plinovi ulaze u talinu metala zavara preko električnog luka. U električni luk dolaze iz okolne atmosfere, vlage i nečistoća koje se nalaze na dodatnom materijalu i na površini osnovnog materijala na mjestu zavarivanja. razlaganjem spojeva pod utjecajem visokih temperatura [22]. Stoga, glavni uzročnici poroznosti u zavaru su [22, 25]:

- korozijski produkti, masnoća, ostaci zaštitne prevlake i vlaga na mjestima zavarivanja
- vlaga čiji izvor može biti obloga elektrode kod REL postupka, prašak kod EPP postupka, ili zaštitni plinovi kod MAG ili TIG postupka
- slaba zaštita procesa zavarivanja
- vjetar (kod REL i MAG procesa zavarivanja)
- neispravni parametri i tehnika zavarivanja (prevelika jakost struje, duljina luka ili napon).

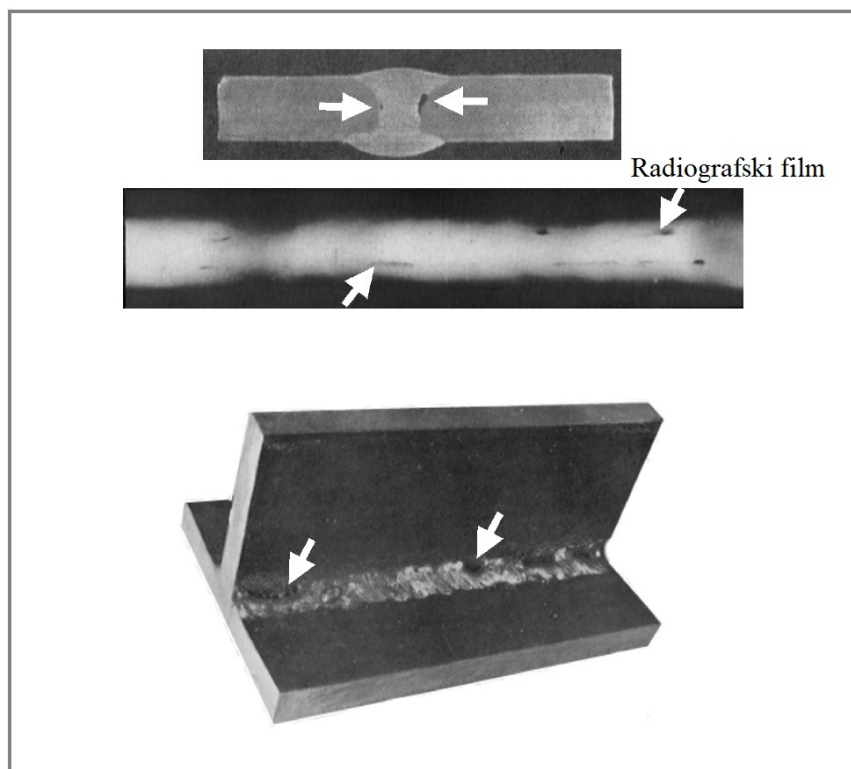
Za izbjegavanje nastanka poroznosti potrebno je [22, 25]:

- očistiti površine prije zavarivanja

- uklanjanje debelog sloja oksida prije zavarivanja nikla, aluminija i aluminijskih i niklovihi legura
- pravilo uspostavljanje i prekidanje električnog luka
- sušenje dodatnog materijala prije zavarivanja ako je potrebno
- osigurati odgovarajuću čistoću zaštitnog plina
- osigurati dovoljan protok zaštitnog plina tijekom zavarivanja
- koristiti zavarivački šator pri zavarivanju na otvorenim prostorima
- koristiti ispravan uređaj za zavarivanje
- predgrijavanje pri ekstremno niskim temperaturama samo kako bi se uklonila vlaga s površine
- koristiti ispravne parametre zavarivanja.

#### 4.5. Pogreška nastajanja čvrstih uključaka pri zavarivanju legura nikla

Čvrsti uključci su strana tijela koja su ostala zarobljena unutar metala zavara ili između metala zavara i osnovnog materijala. Oni mogu biti nemetalni kao troska i prašak ili metalni kao npr. uključak volframa ili bakra kod zavarivanja na bakrenoj podlozi [22]. Na slici 27. prikazani su uključci troske u zavarenom spoju.



Slika 27. Prikaz uključaka troske u metalu zavara [25]

Uzročnici nastanka uključaka u metalu zavara su [22, 25]:

- nedovoljno čišćenje među slojevima zavara
- loša priprema spoja
- nepravilna tehnika zavarivanja
- loše čišćenje oksida s površine pri zavarivanju aluminijske ili nikla
- preveliko toplinsko opterećenje volframove elektrode
- premala jakost struje
- prevelika duljina luka
- preširoko njihanje električnog luka.

Najčešći su uključci troske u metalu zavara zbog nedovoljnog čišćenja među slojevima zavara. Troska se ponekad teško čisti i u tim slučajevima nije dovoljno četkanje nego brušenje, kao što je to slučaj kod legura nikla. Prevelikim njihanjem električnog luka troska će otvrdnuti na rubovima žlijeba čime će njeno uklanjanje biti otežano. Uključci troske mogu nastati zbog loše pripreme spoja u nerazmaknutom korijenu preuskog žlijeba „podvlačenjem“ taline troske pod talinu metala. Kod EPP postupka zavarivanja mogući su uključci praška u metalu zavara koji se nisu rastalili i isplivali na površinu. Uključci oksida u metalu zavara su spojevi metala s kisikom. Nastaju pri zavarivanju ako prethodno nije dobro očišćena površina od oksida ili korozivskih produkata pa se unose u metal zavara. Prilikom TIG zavarivanja nikla ili aluminijske mogući su sitni uključci volframa u metalu zavara. Uključak volframa je nastao zbog primjene prevelike jakosti struje u odnosu na promjer volframove elektrode. Pregrijani vrh volframove elektrode u dodiru s talinom izazvat će odvajanje kapljice s vrha elektrode i kontaminaciju metala zavara [22, 25].

Pravila za izbjegavanje nastanka čvrstih uključaka su [22, 25]:

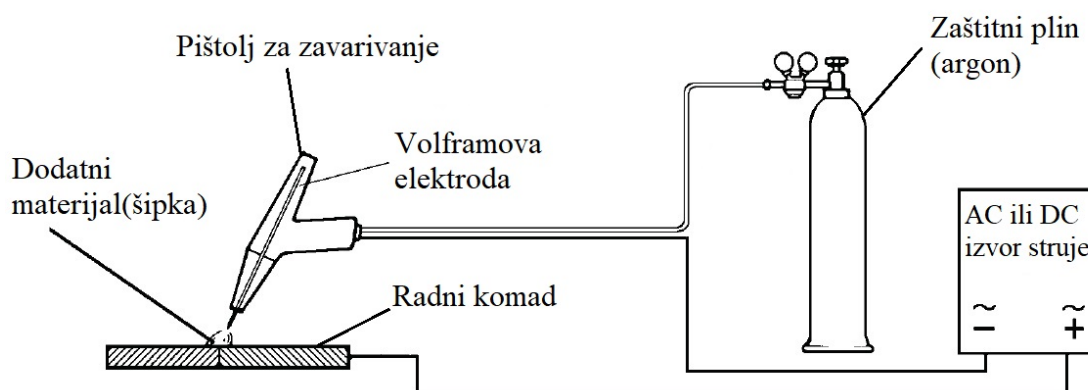
- koristiti ispravne parametre zavarivanja i pripremu spoja
- ukloniti trosku prije zavarivanja idućeg prolaza
- kod zavarivanja aluminijske, nikla, aluminijskih i niklovijskih legura treba ukloniti oksidnu kožicu četkanjem ili struganjem neposredno prije zavarivanja
- kod TIG zavarivanja aluminijske, nikla, aluminijskih i niklovijskih legura treba paziti da ne dođe do kontakta taline i vrha volframove elektrode.

## 5. POSTUPCI ZAVARIVANJA LEGURA NIKLA

Legure na bazi nikla mogu se zavarivati često korištenim konvencionalnim postupcima kao što su REL, MIG i TIG. REL ili ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom nikla obično se provodi s istosmjernom strujom, s elektrodom spojenom na pozitivni pol izvora. U oblozi elektrode sadržani su kemijski elementi koji omogućuju dobru zavarljivost. MIG postupkom (elektrolučno zavarivanje taljivom žičanom elektrodom u zaštiti inertnog plina) moguće je zavarivanje legura nikla korištenjem standardiziranih dodatnih materijala (žica) za legure nikla. Kao zaštitni plin najčešće se koristiti argon ili mješavina argon/helij. Zavarivanje legura nikla najčešće se provodi s TIG postupkom zavarivanja (elektrolučno zavarivanje punim dodatnim materijalom pod zaštitom inertnog plina netaljivom wolfram elektrodom) korištenjem wolframove elektrode s dodatkom torija priključene na negativni pol izvora istosmjerne struje. Kao zaštitni plin mogu se koristiti argon, mješavine argon/vodik i argon/helij [13].

### 5.1. Zavarivanje TIG postupkom

TIG zavarivanje ili elektrolučno zavarivanje pod zaštitom plina netaljivom wolframovom elektrodom (oznaka procesa 14 prema HRN EN ISO 4063) započinje uspostavom električnog luka između netaljive wolframove elektrode i radnog komada. Cijeli proces zavarivanja, uključujući talinu, električni luk i dodatni materijal, je pod zaštitom inertnog plina koji se dovodi kroz plinsku sapnicu na vrhu pištolja za zavarivanje u kojem se nalazi netaljiva wolframova elektroda [27]. Pojednostavljeni prikaz TIG procesa zavarivanja prikazan je na slici 28.



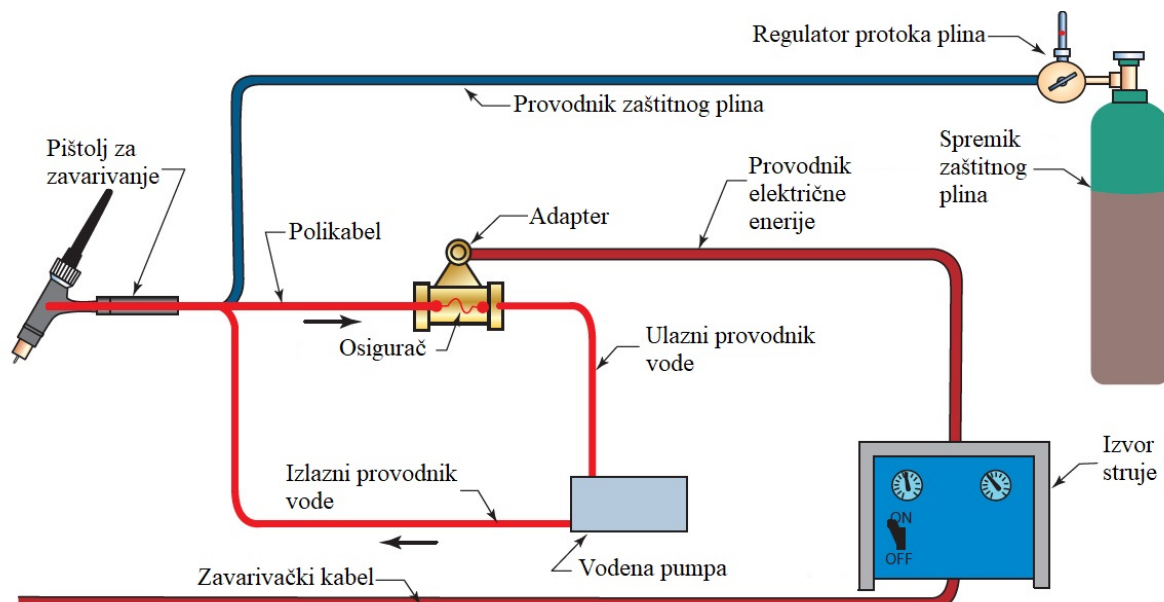
Slika 28. Pojednostavljeni shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [27]

TIG zavarivanje može biti s punim dodatnim materijalom, šipkom (oznaka procesa 141 prema HRN EN ISO 4063) ili autogeno, odnosno, bez dodatnog materijala (oznaka procesa 142 prema HRN EN ISO 4063). Zavarivanje se obično vrši ručno, no postoji mogućnost automatizacije postupka koja se često koristi kod zavarivanja cijevi [27].

Glavne prednosti TIG zavarivanja su stabilan električni luk i odlična kontrola procesa budući da je brzina dodavanja dodatnog materijala neovisna o energiji električnog luka čime se postiže visoka kvaliteta zavara bez rasprskavanja materijala, nastanka troske i dima. Zavarivanje ovim postupkom može se izvoditi u svim položajima i prikladno je za sve vrste materijala. Međutim, zbog male količine nataljenog materijala u vremenu, TIG postupak nije ekonomičan za zavarivanje debljih materijala. Zbog male produktivnosti u odnosu na ostale elektrolučne procese, uglavnom se primjenjuje za zavarivanje tanjih komada od 1 do 6 mm. Postupak nije prikladan za rad na otvorenom zbog zavarivanja u plinskoj zaštiti. Također, u odnosu na ostale elektrolučne procese zahtjeva kvalitetniju pripremu spoja i obuku zavarivača. Prilikom nepravilne tehnike rada može doći do volframovih uključaka u metalu zavara koji će dovesti do smanjenja čvrstoće i žilavosti zavara [27].

### 5.3.1. Oprema za TIG zavarivanje

Na slici 29. prikazana je oprema za TIG zavarivanje s vodenim hlađenjem pištolja za zavarivanje.



Slika 29. Prikaz opreme za TIG zavarivanje s vodenim hlađenjem pištolja za zavarivanje [28]

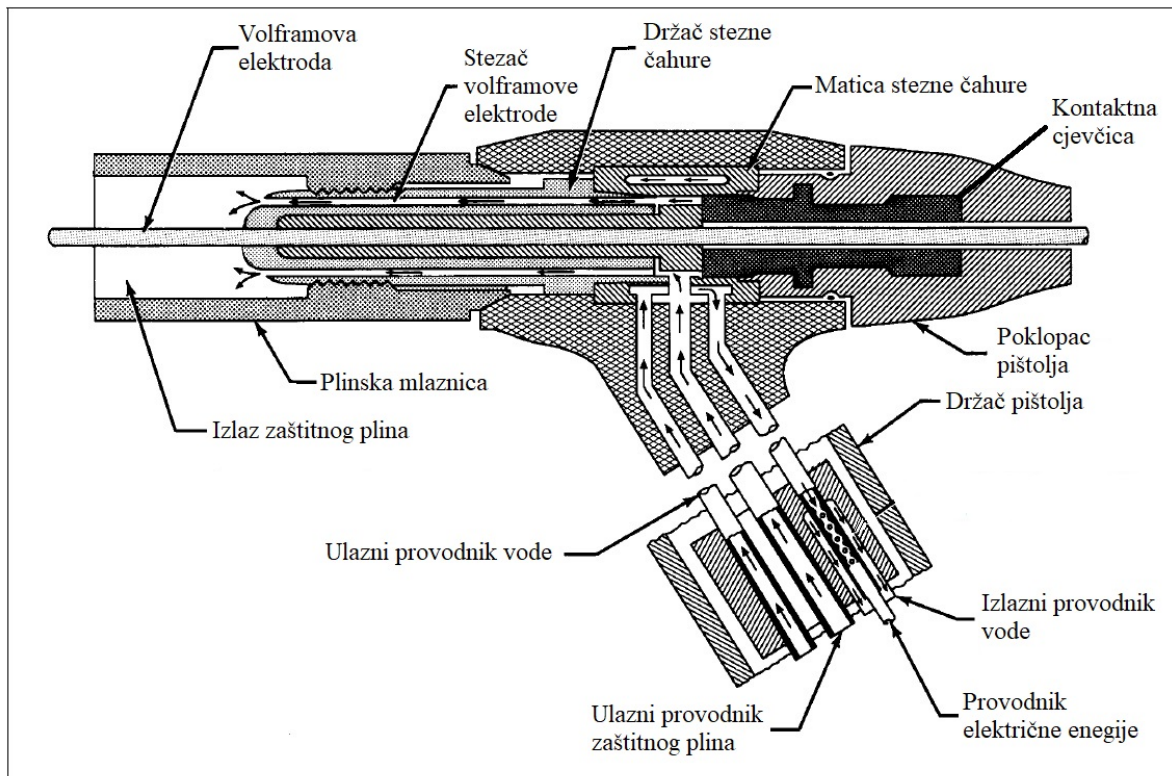
Oprema za ručno TIG zavarivanje s vodenim hlađenjem pištolja sastoji se od: izvora struje (DC ili AC) i provodnika električne energije, spremnika zaštitnog plina i provodnika plina, pištolja za zavarivanje i polikabela, vodene pumpe i provodnika vode [28].

Pištolj za ručno TIG zavarivanje, slika 30., mora biti lagan za rukovanje i potpuno toplinski izoliran. Postoje dvije vrste pištolja za TIG zavarivanje: vodom hlađeni i zrakom hlađeni pištolji za zavarivanje [27].



**Slika 30. Prikaz pištolja za ručno TIG zavarivanje [27]**

Pištolji koji su zrakom hlađeni koriste se za jakosti struja zavarivanja do 200 A, a vodom hlađeni do 400 A [27]. Na slici 31. prikazani su dijelovi vodom hlađenog pištolja za ručno TIG zavarivanje.



Slika 31. Prikaz presjeka vodom hlađenog pištolja za TIG zavarivanje [26]

Važno je da provodnici zaštitnog plina budu izrađeni od materijala koji je otporan na difuziju kako bi se spriječilo prodiranje vlage, dušika ili kisika iz atmosfere u zaštitni plin [27].

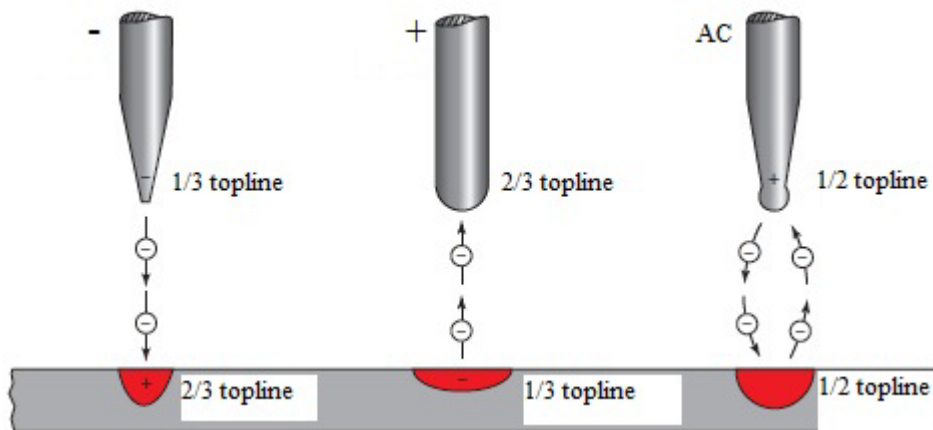
### 5.3.2. Izvori struje za TIG zavarivanje

Za TIG zavarivanje primjenjuju se istosmjerni, izmjenični i kombinirani izvori struje, to jest ispravljači, inverteri, generatori i transformatori. Izbor struje ovisi o vrsti materijala koja će se zavarivati. Budući da TIG spada u ručne postupke zavarivanja, statička karakteristika izvora struje je slična kao i kod REL postupka, odnosno mora biti strmopadajuća. Tako će se osigurati približno konstantna struja zavarivanja neovisno o promjenama duljine luka uslijed pomicanja ruke zavarivača [29].

Uspostavljanje električnog luka kratkim spojem kod TIG postupka se izbjegava zbog oštećenja vrha volframove elektrode i nastanka volframovih uključaka u metalu zavara. Stoga su suvremeni izvori struje dodatno opremljeni posebnim visokonaponskim visokofrekventnim generatorima koji omogućuju uspostavljanje električnog luka bez kontakta između vrha volframove elektrode i radnog komada. Za takvo uspostavljanje električnog luka mora postojati vrlo visoki napon koji će omogućiti početnu ionizaciju. Visoki napon je nepoželjan zbog

sigurnosti, međutim, taj visoki napon frekvencije od nekoliko MHz, zbog skin efekta manje je opasan za zavarivača, ali je ipak potreban oprez pri radu [29].

TIG zavarivanje nehrđajućih i nelegiranih čelika provodi se s istosmjernom strujom i volframovom elektrodom spojenom na negativan pol izvora pri čemu se oko 2/3 topline oslobađa na radnom komadu, kao što je prikazano na slici 32.



**Slika 32. Prikaz raspodjele topline između volframove i elektrode i radnog komada ovisno o vrsti struje i polaritetu zavarivanja [28]**

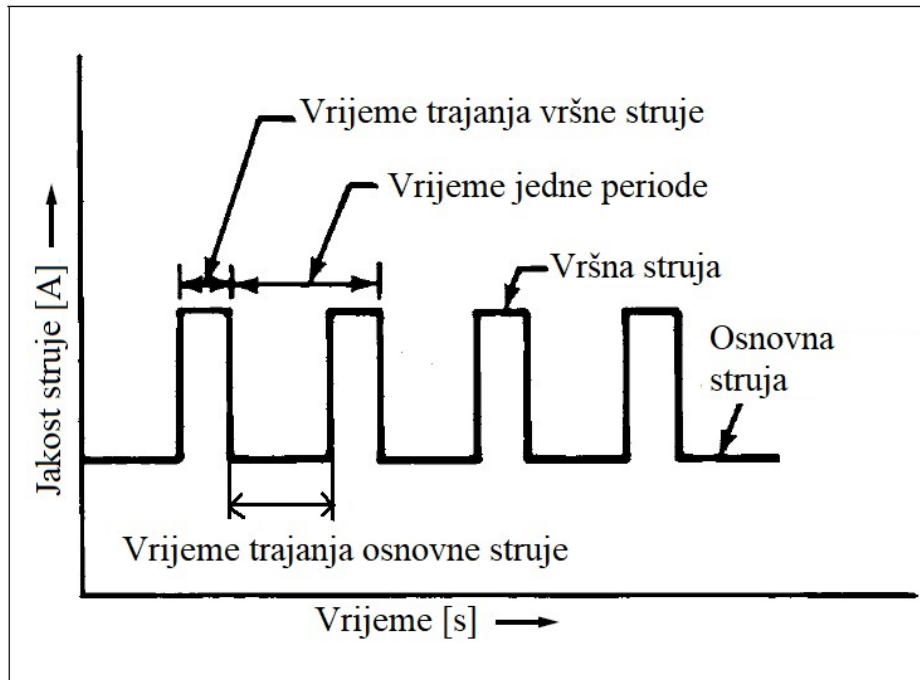
Prilikom TIG zavarivanja aluminija, do potrebnog efekta čišćenja oksida dolazi kada je volframova elektroda spojena na pozitivan pol istosmjerne struje. Međutim, u tom slučaju prema slici 32., 2/3 ukupne topline električnog luka oslobađa se na volframovoj elektrodi što uzrokuje njeno pregrijavanje. Stoga se za zavarivanje aluminija koristi izmjenična struja gdje se postiže kompromis između efekta čišćenja oksida i pregrijavanja elektrode pri podjednakoj raspodjeli topline električnog luka na volframovoj elektrodi i osnovnom materijalu [27].

### 5.3.3. Impulsno TIG zavarivanje istosmjernom strujom

S porastom i razvojem tehnologije, razvili su se uređaji za TIG zavarivanje kod kojih je moguće ostvariti impulse istosmjerne struje prema potrebi. Takvim načinom zavarivanja, istosmjerna struja zavarivanja varira (pulsira) između maksimalne vrijednosti (vršna struja) i minimalne vrijednosti (osnovna struja). Za vrijeme vršne struje osnovni materijal se tali, a za vrijeme osnovne struje održava se stabilan električni luk. Time se ostvaruju značajne prednosti pri zavarivanju osjetljivih materijala te pri zavarivanju u prisilnim položajima, jer se određenim trajanjem i iznosom amplitude impulsa struje osigurava taljenje materijala i dobiva manja količina rastaljenog metala koja se neće cijediti [29].



Impulsno TIG zavarivanje istosmjernim strujama najčešće se provodi s elektrodom spojenom na negativan pol izvora. Omogućuje se podešavanje jakosti vršne i osnovne struje te njihova vremena trajanja [26]. Na slici 33. prikazana je tipična dinamička karakteristika impulsnog TIG zavarivanja istosmjernom strujom.

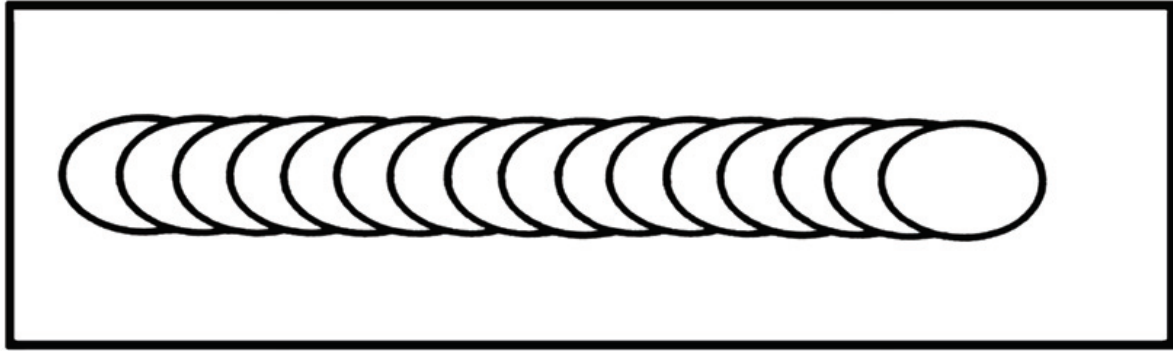


**Slika 33. Prikaz dinamičke karakteristike impulsnog TIG zavarivanja DC strujom [26]**

Općenito vremena trajanja vršne i osnovne struje su podešena tako da vrijednost struje pulsira u rasponu od jednog impulsa svake dvije sekunde, pa sve do 20 impulsa u sekundi. Vršna struja je obično 2 do 10 puta veća od osnovne. Takvim načinom kontrole procesa zavarivanja ostvarujemo manji unos topline pri istoj jakosti struje u odnosu na obično DC zavarivanje. Vršnom strujom postiže se dobro taljenje i penetracija, dok osnovna struja održava električni luk i omogućuje metalu zavara da se ohladi [26].

Postoji nekoliko prednosti impulsnog TIG zavarivanja u odnosu na TIG zavarivanje kontinuiranom istosmjernom strujom. Impulsnim TIG zavarivanjem postiže se veća penetracija pri zadanoj jakosti struje što je izuzetno korisno za zavarivanje metala osjetljivih na unos topline. Zbog manjeg unosa topline, manje su deformacije materijala kod impulsnog zavarivanja i moguće je zavarivanje metala znatno manjih debljina [26].

Pri svakom impulsu, odnosno svaki puta kada struja poprimi vršnu vrijednost, nastaje karakteristična zavarena točka, kao što je prikazano na slici 34.

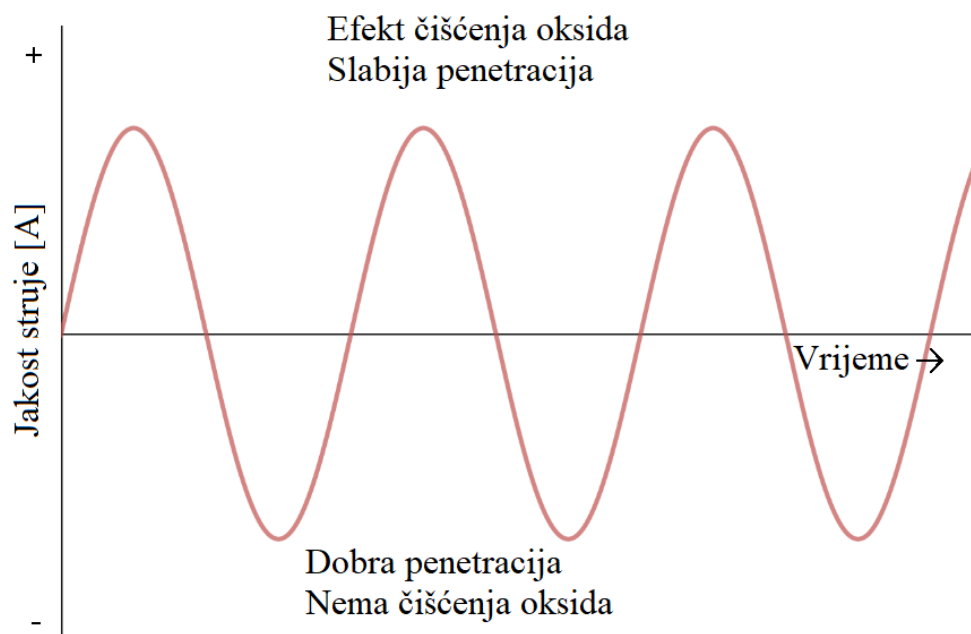


Slika 34. Prikaz karakterističnog izgleda zavora nastalih impulsnim TIG postupkom [27]

Frekvencija impulsa mora biti takva da omogućuje djelomično skrućivanje taline između svakog impulsa. Tako nastaje kontinuirani metal zavora koji se sastoji od odvojenih točaka koje djelomično prekrivaju jedna drugu, slika 34.

#### 5.3.4. Oblici izmjenične struje kod TIG zavarivanja

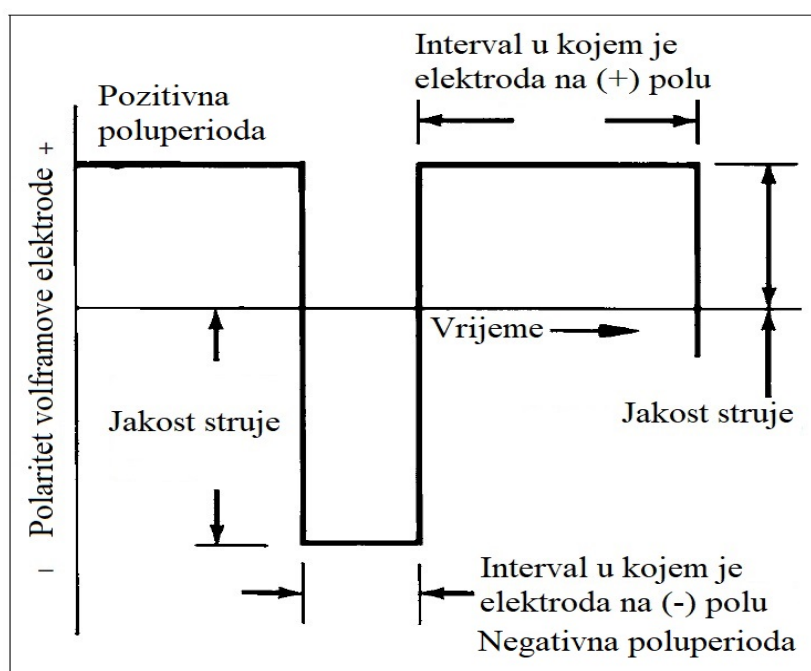
Dinamička karakteristika izvora struje opisuje promjenu jakosti struje u vremenu tijekom procesa zavarivanja. Ta karakteristika se može fino regulirati i dobiti i time omogućiti bolju kontrolu procesa. Potrebno je napomenuti da izmjenična struja nije impulsna jer ima sinusni oblik, slika 35., te se ne mogu definirati osnovna i vršna struja.



Slika 35. Prikaz sinusnog oblika izmjenične struje [31]

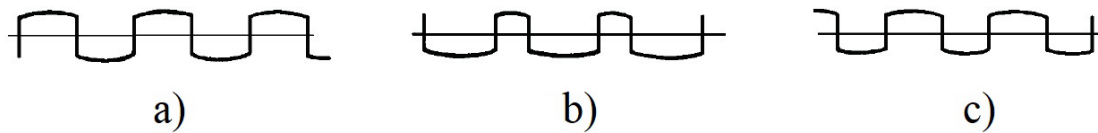
Izmjeničnom strujom izmjenjuju se periodi u kojem je volframova elektroda spojena na pozitivan i negativan pol. Za vrijeme perioda u kojem je volframova elektroda na pozitivnom polu, odvija se efekt čišćenja površinskih oksida uz slabiju penetraciju. U intervalima kada je volframova elektroda spojena na negativan pol nema čišćenja površinskih oksida, ali je penetracija bolja [26].

Kod modernih izvora struje moguće je dobiti pravokutni oblik dinamičke karakteristike izmjenične struje, kao što je prikazano na slici 36. U odnosu na sinusni oblik izmjenične struje, pravokutni omogućava bržu promjenu smjera struje koja uz prisustvo visokog napona, zajedno s visokom temperaturom taline tijekom zavarivanja omogućava neprestano uspostavljanje električnog luka pri prolasku struje kroz nulu bez korištenja visokofrekventnih generatora [26].



Slika 36. Prikaz pravokutnog oblika dinamičke karakteristike [26]

Pravokutnom dinamičkom karakteristikom moguća je potpuna kontrola procesa pri čemu se podešava vrijeme trajanja i jakost struje u pojedinoj pozitivnoj i negativnoj poluperiodi. Takvom promjenom udjela pozitivne i negativne poluperiode moguće je kontrolirati penetraciju i čišćenje oksida, što je posebice korisno kod zavarivanja aluminija [27]. Na slici 37. prikazani su različiti udjeli pozitivne i negativne poluperiode kod pravokutnog oblika dinamičke karakteristike.



**Slika 37. Prikaz različitih udjela pozitivne i negativne poluperiode kod pravokutnog oblika AC struje [27]**

Na slici 37. a) prikazan je ujednačen omjer pozitivne i negativne poluperiode. Na slici 37. b) prikazan je pravokutni oblik AC struje u kojem je udio negativne poluperiode 70 %, a pozitivne 30 % čime se povećava penetracija ili brzina zavarivanja. Na slici 37. c) udio pozitivne poluperiode je 55 %, a negativne 35 % čime se postiže bolji efekt čišćenja oksida [27].

#### **5.3.4. Zaštitni plinovi kod TIG zavarivanja**

Zaštitni plin mora osigurati prikladnu atmosferu koja se može što lakše ionizirati radi uspostave električnog luka. Mora zaštititi rastaljeni dodatni materijal i talinu od zraka te spriječiti oksidaciju vrha volframove elektrode. Zaštitni plin također utječe na količinu topline koju stvara električni luk i na izgled zavara. Kod TIG zavarivanja kao zaštitni plinovi primjenjuju se argon, helij, vodik i dušik ili mješavina dva ili više navedena plina [28].

##### **5.3.4.1. Argon**

Argon je inertni plin koji se ne spaja s drugim elementima i zbog toga se najviše koristi u zaštiti taline od aktivnih plinova iz okolne atmosfere kod TIG zavarivanja. Nije zapaljiv, eksplozivan niti otrovan. Budući da argon ima veću gustoću od zraka, on efektivno štiti talinu pri zavarivanju u dubokim žljebovima u horizontalnom položaju. Međutim, veća gustoća argona od zraka može biti problem pri zavarivanju u nadglavnom položaju gdje se koriste veći protoci zaštitnog plina. Argon se relativno lagano ionizira i stoga je prikladan za zavarivanje izmjeničnom strujom i za uspostavljanje električnog luka. Niska energija ionizacije omogućuje veću duljinu električnog luka pri nižim vrijednostima napona [28].

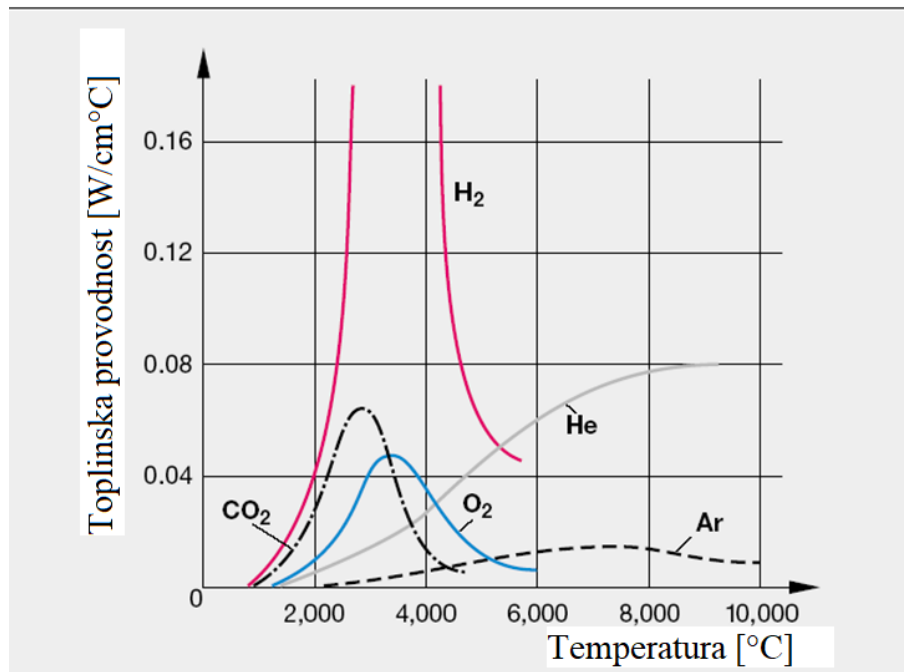
##### **5.2.4.2. Helij**

Glavna karakteristika helija kao zaštitnog plina je veća penetracija. Helij također ima neke nedostatke jer je lakši od zraka, čim se otežava dobra zaštita procesa pri zavarivanju. Protok helija mora biti približno duplo veći od argona za prihvatljivu krutost u struji plina. Teško ga je ionizirati, pa zahtijeva veće napone za održavanje električnog luka i sama uspostava luka je

teža nego kod argona. Električni luk pri zavarivanju s izmjeničnom strujom je vrlo nestabilan. Međutim, helij se ne primjenjuje s izmjeničnom strujom jer nema efekta čišćenja oksida [28].

#### 5.3.4.3. Mješavina argon/helij

Mješavina argon/helij primjenjuje se kod zavarivanja metala velike toplinske vodljivosti kao što su aluminij i njegove legure, te bakar i njegove legure [30]. Na slici 38. prikazana je ovisnost toplinske vodljivosti različitih plinova o temperaturi.

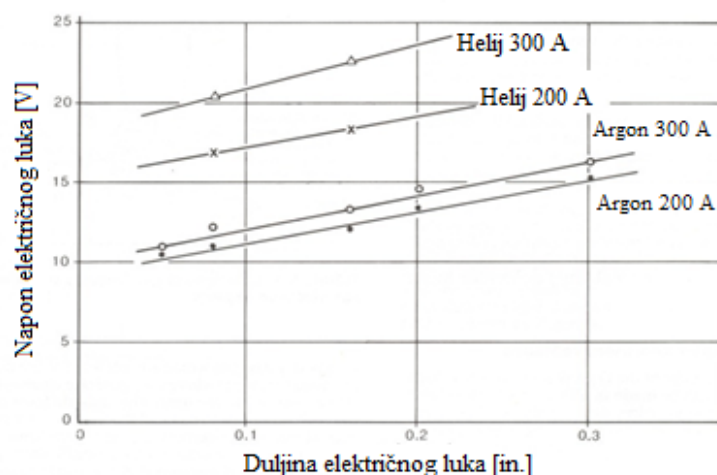


**Slika 38. Prikaz toplinske provodnosti različitih vrsta plinova ovisno o temperaturi [33]**

Iz slike 38. uočava se da helij ima veću toplinsku provodnost u odnosu na argon i time oslobađa veću količinu topline u električnom luku. Helij ima slabiju sposobnost ionizacije u odnosu na argon. To znači da je za istu duljinu luka potreban veći napon kod helija kao zaštitnog plina u odnosu na argon, kao što je prikazano na slici 39. Tako povećani napon dovodi do povećanog unosa topline, a time i veće penetracije kod istih ostalih parametara zavarivanja [30].

Prednosti zaštitnog plina helija u odnosu na argon su [30]:

- predgrijavanja nisu potrebna ili se provode pri nižim temperaturama
- veća brzina zavarivanja, odnosno manji broj prolaza
- bolji je viskozitet taline zavara
- bolja zaštita kod zavarivanja u nadglavnom položaju.



Slika 39. Prikaz ovisnosti napona i duljine električnog luka o struji zavarivanja[33]

Međutim, zbog slabijih električnih svojstva, električni luk u atmosferi helija je nestabilan i uspostavljanje električnog luka kod izmjenične struje je otežano. Zato se primjenjuju mješavine argon/helij, a ne čisti helij pri zavarivanju izmjeničnim strujama [30].

Helij se miješa s argonom kako bi se dobile prednosti oba plina tj. efekt čišćenja oksida i veća penetracija, što je posebno bitno za ručno zavarivanje. Mješavina argona s helijem daje dobar kompromis između penetracije i stabilnosti električnog luka. Npr. mješavinom 75 % helija i 25 % argona dobiva se veća penetracija u odnosu na onu dobivenu sa 100 % argonom kao zaštitnim plinom pri istoj stabilnosti električnog luka [28].

Argon i helij su kemijski inertni elementi. To znači da kemijski ne reagiraju s ostalim materijalima. Stoga nemaju utjecaj na volframovu elektrodu i radni komad. Iako su argon i helij oba inertni elementi, između njih postoje određene razlike koje su bitne za zavarivanje. Argon se više koristi za TIG zavarivanje u odnosu na helij. Pri zavarivanju u zaštitnoj atmosferi argona, električni luk je mirniji i tiši i ima sposobnost čišćenja oksida pri zavarivanju aluminija i magnezija izmjeničnom strujom. Helij je dosta skuplji od argona. Mala gustoća helija je također nedostatak, jer je lakši od zraka i otežana je zaštita pri zavarivanju u horizontalnom položaju. Za dobivanje iste zaštitne atmosfere koju stvara argon, potrebno je 2 do 3 puta više helija. To dovodi do većih troškova korištenja helija u odnosu na argon. [32]

U tablici 19. prikazan je utjecaj i prikladnost argona i helija kao zaštitnog plina pri zavarivanju različitih vrsta materijala.

**Tablica 19. Prikaz prikladnosti argona i helija kao zaštitnog plina pri TIG zavarivanju različitih vrsta materijala [32]**

<b>Aluminijske legure</b>	Najprikladniji je čisti argon za zavarivanje s AC strujom, postiže se dobra stabilnost električnog luka i efekt čišćenja oksida. Mješavina argon/helij (s AC strujom) daje manje stabilan luk nego čisti argon, no postiže se dobar efekt čišćenja oksida, ali veća penetracija i brzinu zavarivanja. Helij (pri zavarivanju DC strujom elektrodom na negativnom polu) daje stabilan električni luk i veliku brzinu zavarivanja ako su očišćeni oksidi s površine
<b>Legura Al-Cu</b>	Argon smanjuje penetraciju pri površinskoj obradi
<b>Mjed</b>	Argon povećava stabilnost električnog luka uz malo stvaranje dimova
<b>Legure na bazi kobalta</b>	Argon povećava stabilnost električnog luka
<b>Legure Cu-Ni</b>	Argon povećava stabilnost električnog luka
<b>Deoksidirani bakar</b>	Najprikladniji je helij jer daje visoki unos topline koji je potreban zbog velike toplinske vodljivosti bakra. Mješavina 75 % He i 25 % Ar osigurava stabilan električni luk, daje niži unos topline u odnosu na čisti helij i koristi se za tanje materijale.
<b>Inconel</b>	Argon pruža dobru stabilnost električnog luka. Helij se koristi za automatizirano zavarivanje pri velikim brzinama.
<b>Konstruktivski čelik</b>	Argon se koristi za ručno zavarivanje. Helij se koristi za automatizirano zavarivanje pri velikim brzinama zbog veće penetracije
<b>Legure magnezija</b>	Koristi se čisti argon (AC struja) zbog stabilnosti električnog luka i efekta čišćenja oksida
<b>Monel</b>	Argon povećava stabilnost električnog luka
<b>Legure na bazi nikla</b>	Argon pruža dobru stabilnost električnog luka. Helij se koristi za automatizirano zavarivanje pri velikim brzinama.
<b>Precipitacijski očvrstljivi nehrđajući čelici</b>	Prikladniji je helij jer osigurava ujednačeniju penetraciju korijena nego argon. Može se koristiti i argon te mješavina argon/helij
<b>Nehrđajući čelici</b>	Preporučuje se helij zbog veće penetracije od argona uz dovoljnu stabilnost električnog luka. Može se koristiti i argon

U tablici 20. prikazane su karakteristike argona i helija kao zaštitnih plinova pri TIG zavarivanju.

Tablica 20. Prikaz karakteristika argona i helija kao zaštitnih plinova pri TIG zavarivanju [32]

<b>ARGON</b>	
<b>Stabilnost električnog luka</b>	Veća stabilnost električnog luka u odnosu na helij
<b>Mogućnost automatiziranog zavarivanja</b>	Moguće greške poroznosti i zajedi pri brzinama zavarivanja većim od 70 cm/min ovisno o vrsti i debljini materijal. Navedene pogreške mogu se izbjeći korištenjem helija ili mješavine ar/he
<b>Lagano uspostavljanje električnog luka</b>	Posebno važno kod zavarivanja tanjih materijala
<b>Moguć efekt čišćenja oksida</b>	Bitno kod zavarivanja materijala s oksidnom kožicom poput aluminijskih legura ili željeznih legura koje sadrže visok postotak aluminijska
<b>Manji napon električnog luka</b>	Rezultat je niži unos topline. Iz tog razloga koristi se isključivo argon za zavarivanje materijala debljine ispod 1,5 mm
<b>Potreban je manji protok plina</b>	Argon je teži od zraka i zbog toga pruža dobru zaštitu pri manjem protoku u odnosu na helij
<b>Zavarivanje debljih materijala</b>	Za zavarivanje materijala iznad 5 mm, preporučuje se mješavina argon/helij
<b>Zavarivanje u nadglavnom položaju</b>	Mogućnost bolje kontrole taline u odnosu na helij, ali slabija plinska zaštita
<b>Zavarivanje razolikih metala</b>	Argon je obično bolji od helija
<b>HELIJ</b>	
<b>Mogućnost automatiziranog zavarivanja</b>	Pri brzinama zavarivanja iznad 70 cm/min manja vjerojatnost nastanka poroznosti i zajeda u odnosu na argon
<b>Visok napon električnog luka</b>	Rezultira većim unosom topline što je povoljnije za zavarivanje materijala iznad 5 mm i s velikom toplinskom provodljivošću u odnosu na argon
<b>Potreban je veći protok plina</b>	Helij je lakši od zraka, i stoga je protok plina obično 2 do 3 puta veći od argona. Budući da je lakši od zraka, helij je osjetljiviji na propuh, ali je prikladniji za zavarivanje u nadglavnom i vertikalnom položaju
<b>Manji ZUT</b>	S većim unosom topline pri većim brzinama zavarivanja nastali ZUT je uži u odnosu na argon. To rezultira manjim deformacijama i boljim mehaničkim svojstvima.



Korištenjem helija oslobađa se veća količina topline u električnom luku u odnosu na argon. Dobiva se veća penetracija koja omogućuje zavarivanje s većim brzinama. Preporučuje se korištenje helija kao zaštitnog plina za zavarivanje debljih materijala i materijala s visokom toplinskom vodljivošću poput aluminija i bakra. S druge strane, argon se koristi za zavarivanje tanjih materijala i za zavarivanje raznolikih metala. Niska toplinska provodnost argona rezultira sporijom brzinom zavarivanja i širim zavarom. Napon pri TIG zavarivanju s helijem kao zaštitnom plinom je veći za 40 % u odnosu na argon pri istoj duljini električnog luka. To dovodi do većeg oslobađanja topline, veće penetracije i mogućnosti veće brzina zavarivanja u odnosu na argon. Zbog tih razloga helij se koristi kao zaštitni plin pri visokoproduktivnom automatiziranom zavarivanju. Međutim, niži napon električnog luka pri zavarivanju u zaštitnoj atmosferi argona daje stabilniji električni luk. Mješavinom argon/helij dobivaju se prednosti oba plina, odlična stabilnost električnog luka u zaštiti argona i veći unos topline u zaštiti helija [32].

#### 5.3.4.4. Vodik

Vodik nije inertan plin i ne koristi se kao primarni zaštitni plin. Međutim, može se dodati argonu kada je potrebna veća penetracija i brzina zavarivanja. Argonu se dodaje 2 do 5 % vodika što ima za posljedicu reducirajući efekt i bolji izgled zavara bez površinske oksidacije. Također poboljšava čistoću površine metala zavara na nekim nehrđajućim čelicima koji su osjetljivi na kisik. Električni luk je uži i ima veću energiju te omogućava veće brzine zavarivanja. Tipična mješavina je u omjeru 95 % argon i 5 % vodika. Ta mješavina se često koristi kod zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika i legura na bazi nikla. Nije primjenjiva pri zavarivanju aluminija i njegovih legura jer je vodik glavni uzročnik poroznosti pri zavarivanju aluminija. Potrebno je napomenuti da je vodik lako zapaljiv i eksplozivan. [28].

#### 5.3.4.5. Dušik

Dušik nije inertan plin. Isto kao vodik, dušik se ne koristi kao primarni zaštitni plin, nego samo kao dodatak argonu. Međutim, ne može se primjenjivati s nekim materijalima poput feritnih čelika jer uzrokuje poroznost. U ostalim slučajevima, poput nehrđajućih čelika, dušik je koristan kao stabilizator austenita u leguri. Dušik se primjenjuje pri zavarivanju bakra za postizanje bolje penetracije, za zavarivanje duplex i austenitnih nehrđajućih čelika te legura na bazi nikla [28].

## 6. ELEKTROKEMIJSKA KOROZIJSKA ISPITIVANJA

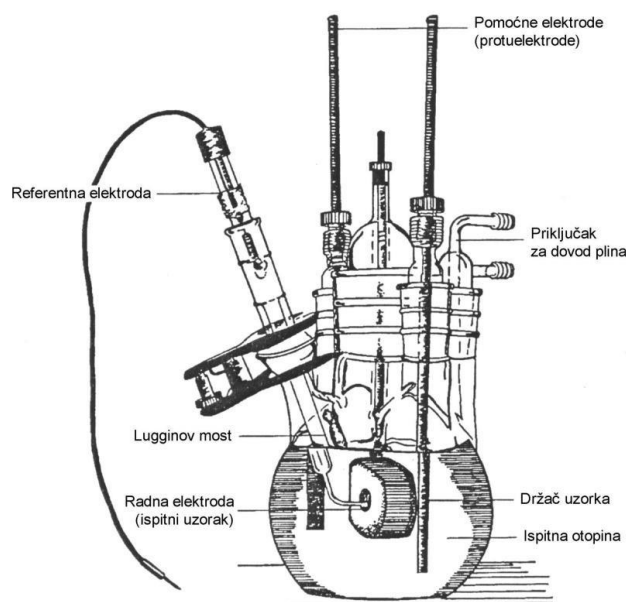
Elektrokemijska priroda procesa korozije omogućava primjenu raznih elektrokemijskih mjernih tehnika za određivanje intenziteta korozije. Tehnike elektrokemijskih korozijskih ispitivanja možemo podijeliti na ispitivanja s istosmjernom strujom i ispitivanja s izmjeničnom strujom [17].

### 6.1. Elektrokemijska korozijska ispitivanja istosmjernom strujom

Pri elektrokemijskim ispitivanjima procesa korozije tehnikama s istosmjernom strujom upotrebljavaju se polarizacijske metode mjerenja, potenciostatska i galvanostatska polarizacija. Potenciostatska polarizacija se provodi korištenjem posebnog uređaja, potenciostata. Pomoću potenciostata se na mjernoj elektrodi uspostavlja određeni potencijal, a mjeri se struja odziva sustava. Pri galvanostatskoj polarizaciji se na mjernoj elektrodi uspostavlja određena struja, a mjeri se napon odziva sustava. Za mjerenje se primjenjuje uređaj galvanostat. Narinuti potencijal, odnosno struju, moguće je kontinuirano polako mijenjati i pratiti odziv, pa se u tom slučaju radi o potenciodinamičkim i galvanodinamičkim mjerenjima [17].

Pri polarizacijskim tehnikama mjerenja, na sustav se djeluje signalom izvana te se prati odziv sustava. Nakon mjerenja snima se krivulja polarizacije struja-napon. Na temelju anodnih i katodnih krivulja dobiva se slika o korozijskom ponašanju određenog materijala u određenom mediju [17].

Elektrokemijska mjerenja provode se u elektrokemijskoj ćeliji, slika 40., koja se sastoji od tri elektrode: radne (ispitivani metal/uzorak), referentne ( $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ,  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  ili dr.) i pomoćne elektrode (grafit ili platina). Elektrode se spajaju na potenciostat ili galvanostat [17]. Radna elektroda je ispitni uzorak od kojeg je elektrolitu izložena površina od  $1 \text{ cm}^2$ . Referentna elektroda je elektroda poznatog potencijala koja ne sudjeluje u strujnom krugu već se pomoću nje samo mjeri potencijal radne elektrode. Uglavnom se primjenjuje zasićena kalomel elektroda, ZKE, standardnog elektrodnog potencijala  $+0,242 \text{ V}$  u odnosu na vodikovu elektrodu [17].

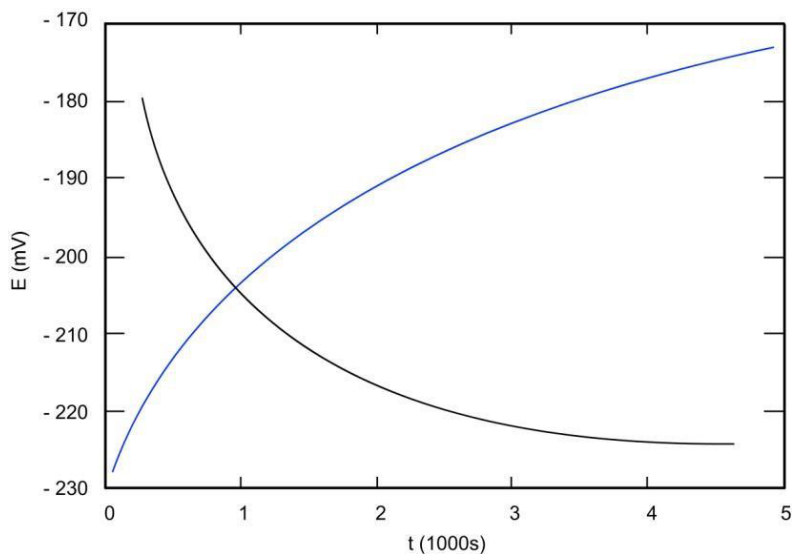


Slika 40. Prikaz elektrokemijske ćelije [17]

Protuelektroda je vodič koji zatvara strujni krug. Izrađuje se od korozijski postojanog materijala koji mora biti dobre vodljivosti. U strujnom krugu nalaze se dvije protuelektrode između kojih je simetrično postavljena radna elektroda [17].

## 6.2. Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga, $E_{ok}$

Da bi se započelo s polarizacijskim ispitivanjima, nužno je da sustav bude stabiliziran. To podrazumijeva da se nakon uranjanja u elektrolit, električni krug između radne i protuelektrode pusti otvorenim, a razlika potencijala između referentne i radne elektrode se prati kao funkcija vremena. Primjer krivulje u dijagramu E-t prikazan je na slici 41., a izgled samo krivulje ovisi o vrsti materijala koja se ispituje [17].



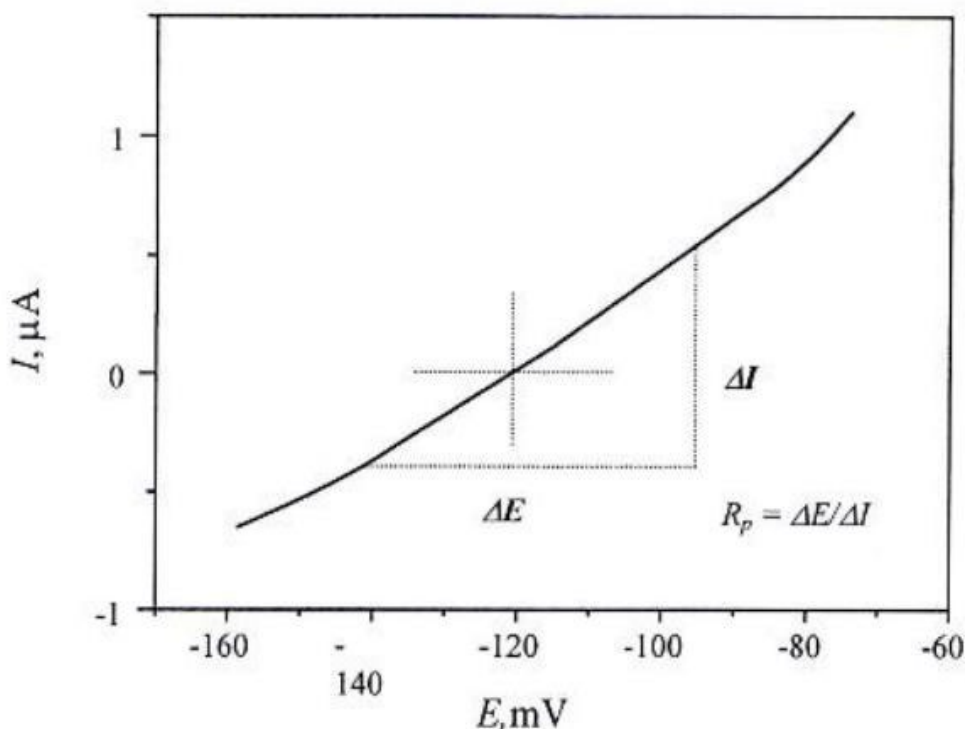
Slika 41. Prikaz krivulje u E-t dijagramu [17]

Nakon određenog vremena, uspostavlja se približno stacionarno stanje na nekoj vrijednosti potencijala, koji je jednak potencijalu otvorenog strujnog kruga  $E_{ok}$ , odnosno korozijskom potencijalu  $E_{kor}$ . Praćenjem varijacija korozijskog potencijala u vremenu, dobiva se podatak o korozijskom ponašanju ispitivanog uzorka u određenom mediju [17]:

- pozitivne vrijednosti  $E_{kor}$  upućuju na stabilnost radne elektrode, što znači imunitet uzorka u ispitnoj vodenoj otopini
- negativne vrijednosti  $E_{kor}$  ukazuju na nestabilnost, odnosno na otapanje (koroziju)
- ako se vrijednosti mijenjaju od negativnih prema pozitivnim dolazi do spontane pasivacije.

### 6.3. Određivanje polarizacijskog otpora, $R_p$

Polarizacijski otpor ili otpor Faradayevoj reakciji ( $R_p$ ) definira se kao otpor prolazu elektroaktivnih čestica iz jedne faze (metal ili legura) u drugu (elektrolit) i obrnuto. Na slici 42. prikazan je postupak određivanja polarizacijskog otpora [17].

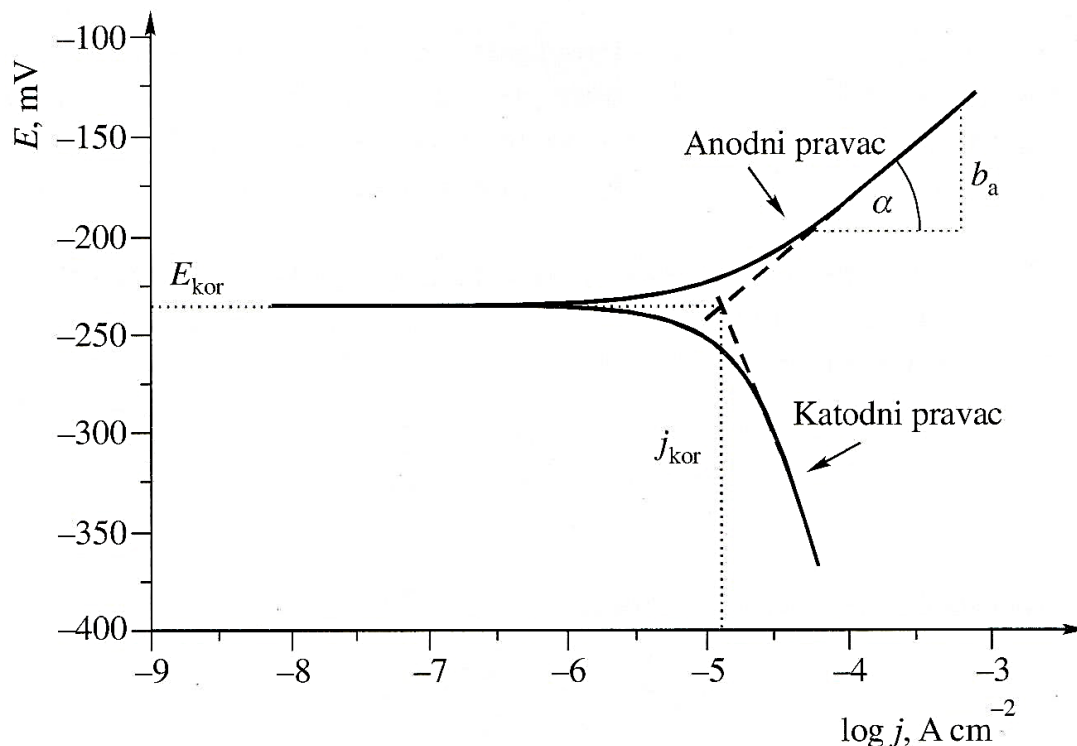


Slika 42. Prikaz određivanja polarizacijskog otpora [17]

Polarizacijski otpor određuje se prema potencijalu otvorenoga strujnoga kruga ( $E_{ok}$ ) u području polarizacije  $\pm 20$  mV. Veće vrijednosti polarizacijskog otpora upućuju na veću otpornost materijala u mediju u kojem se nalazi [17].

## 6.4. Određivanje brzine korozije

Određivanje brzine korozije, odnosno Tafelova ekstrapolacija, je grafička metoda određivanja korozijskih parametara [17]. Na slici 43. prikazan je princip Tafelove ekstrapolacije.



Slika 43. Prikaz principa Tafelove ekstrapolacije [17]

Rezultati dobiveni anodnom i katodnom polarizacijom u širokom području potencijala u odnosu na korozijski potencijal ( $E = E_{kor} \pm 250 \text{ mV}$ ) prikazuju se grafički u polulogaritamskom obliku ( $E - \log j$ ). Ekstrapolacijom anodnih i katodnih Tafelovih pravaca u njihovom sjecištu određuju se vrijednosti gustoće korozijske struje  $j_{kor}$  i korozijskog potencijala  $E_{kor}$ . Konačno, iz određene vrijednosti gustoće korozijske struje  $j_{kor}$  ( $\mu\text{Acm}^{-2}$ ) te poznate ekvivalentne mase materijala i gustoće materijala  $\rho$  ( $\text{gcm}^{-3}$ ) izračunava se brzina korozije  $v_{kor}$  [17].

## 6.5. Ciklička polarizacija

Ciklička polarizacija predstavlja dinamičku metodu elektrokemijskog ispitivanja korozije kojom se određuje tendencija prema nastanku pitinga u primijenjenoj korozivnoj sredini. Eksperimentalno, metoda se izvodi tako što se potencijal uzorka kontinuirano kreće u anodnom pravcu dok se ne postigne određena jačina struje između radne i pomoćne elektrode (obično,  $1 \text{ mA/cm}^2$ ), a zatim se prekidajući eksperiment, potencijal vraća u katodnom pravcu do kraja anodnog područja, što tada predstavlja područje kružnog kretanja potencijala. Izgled dijagrama

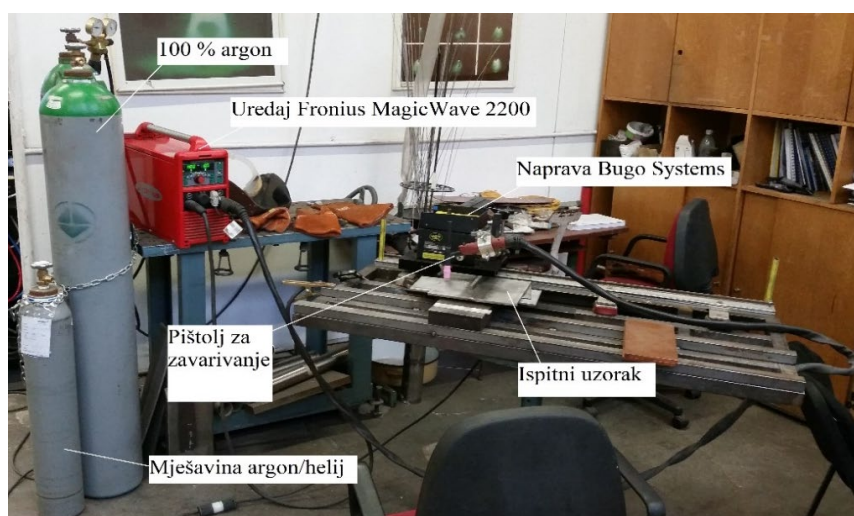
je karakterističan i na njemu se potencijal pitinga,  $E_{pit}$ , (ako do pojave pitinga dolazi), prepoznaje po naglom skoku vrijednosti struje, koja se zapaža u fazi kretanja potencijala u anodnom pravcu. Pri kretanju potencijala u katodnom pravcu, ako je pojava pitinga evidentna, nastaje histerežno odstupanje vrijednosti struje u odnosu na anodni pravac, pri čemu se za iste vrijednosti potencijala, u povratnom smjeru javlja veća struja, što formira tzv. histereznu petlju. Potencijal pri kojem se histerezna petlja zatvara (mjesto ponovnog izjednačavanja struja, tj. presjeka katodnog i anodnog pravca), predstavlja potencijal repasivacije ili, zaštitni potencijal za piting koroziju,  $E_{zpit}$ . Pri potencijalima negativnijim od potencijala repasivacije, metalni materijal neće podleći piting koroziji u primijenjenoj sredini [34].

## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Eksperiment se sastojao od nekoliko dijelova. U prvom dijelu rada provedeno je ispitivanje utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu zavora pri navarivanju ispitne ploče od super legure Hastelloy C-22 mehaniziranim TIG postupkom zavarivanja bez dodatnog materijala. Nakon navarivanja, izrađeni su makro izbrusci na kojima je izmjerena širina zavora i penetracija s ciljem određivanja optimalnih parametara zavarivanja potrebnih za drugi dio eksperimentalnog rada. U drugom dijelu rada provedeno je zavarivanje dviju ispitnih ploča osnovnog materijala super legure Hastelloy C-22 dimenzija 350 x 150 x 6,35 mm TIG postupkom zavarivanja (oznaka postupaka 141 prema HRN EN ISO 4063:2012). Nakon zavarivanja, u trećem dijelu eksperimentnog rada, provedena su elektrokemijska korozivna ispitivanja s ciljem određivanja korozivne postojanosti zavarenog spoja.

### 7.1. Ispitivanje utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu zavora

Prvi dio eksperimentalnog rada, odnosno ispitivanje utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu zavora pri TIG zavarivanju super legure Hastelloy C-22, provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno korištenjem dvije vrste zaštitnih plinova: čistog argona i mješavine argon/helij u omjeru 50:50. Trgovačka oznaka korištenog zaštitnog plina 100 % argona jest Argon 4.8 (oznaka I1 prema normi HRN EN ISO 14175:2008), a plinske mješavine argon/helij Aluline He50 (oznaka I3 prema normi HRN EN ISO 14175:2008) proizvođača Messer. Na slici 44. prikazano je radno mjesto za navarivanje gdje se proveo prvi dio eksperimenta.



Slika 44. Prikaz radnog mjesta za navarivanje, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb

Izvedena su šest navara na ispitnoj ploči od super legure Hastelloy C-22 dimenzija 350x150x6,35 mm mehaniziranim TIG postupkom zavarivanja uz pomoć naprave za zavarivanje BUGO Systems MDS 1002 i izvora struje za zavarivanje Fronius MagicWave 2200 Job G/F, bez korištenja dodatnog materijala.

### 7.1.1. Izvor struje za zavarivanje Fronius MagicWave 2200 Job G/F

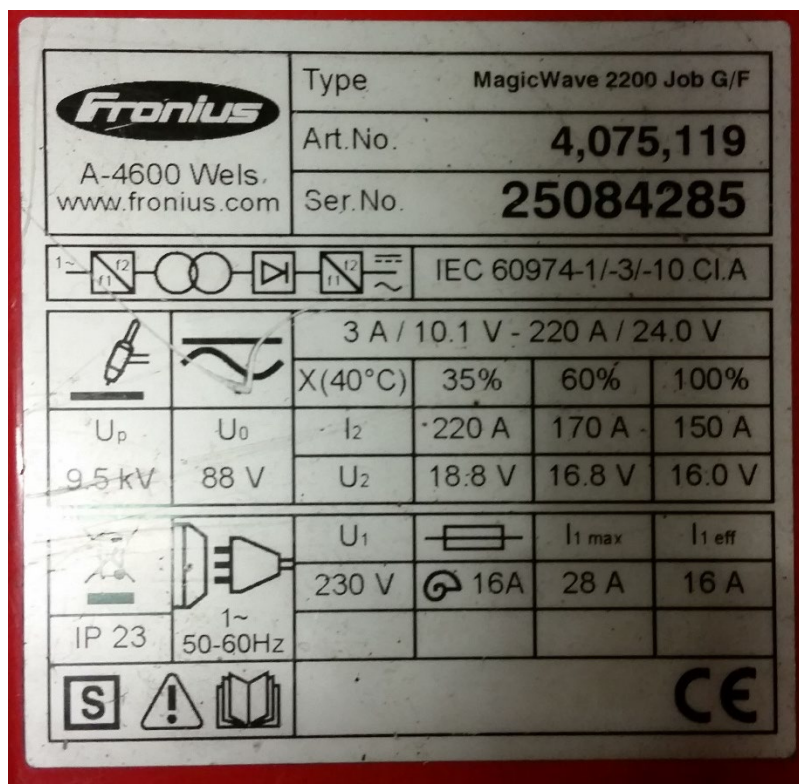
Na slici 45. prikazan je korišteni izvor struje za zavarivanje Fronius MagicWave 2200 Job G/F.



**Slika 45. Prikaz uređaja za zavarivanje Fronius MagicWave 2200 Job G/F, , Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**

Navedeni uređaj za zavarivanje ima digitalni zaslon preko kojeg se podešavaju parametri. Može se koristiti za REL ili TIG postupak zavarivanja s istosmjernom ili izmjeničnom strujom. Na slici 46. prikazana je identifikacijska pločica, a u tablici 21. tehničke karakteristike navedenog uređaja za izvor struje.





Slika 46. Prikaz identifikacijske pločice uređaja Fronius MagicWave 2200 Job G/F, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb

Najveća jakost struje zavarivanja koju ovaj uređaj može postići je 220 A pri intermitenciji od 35%. Također, uređaj ima mogućnost TIG zavarivanja s impulsnim strujama.

Tablica 21. Prikaz tehničkih karakteristika uređaja za zavarivanje MagicWave 2200 Job G/F [37]

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

### 7.1.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal korištena je super legura Hastelloy C-22 oznake UNS N06022. Navedena legura spada u grupu materijala 43 prema normi ISO/TR 15608 koju čine legure nikla, kroma, željeza i molibdena s udjelom nikla višim od 40 %. U tablici 22. prikazan je kemijski sastav, a u tablici 23. prikazana su mehanička svojstva ispitne ploče od legure Hastelloy C-22 prema atestu osnovnog materijala.

**Tablica 22. Prikaz kemijskog sastava ispitne ploče od legure Hastelloy C-22 prema atestu osnovnog materijala**

Udio kemijskog elementa, %											
C	Co	Cr	Fe	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	V	W
0,003	0,72	21,3	3,7	0,26	13	Ostatak	0,012	0,001	0,02	0,02	2,8

**Tablica 23. Prikaz mehaničkih svojstva ispitne ploče od legure Hastelloy C-22 pri sobnoj temperaturi prema atestu osnovnog materijala**

Granica razvlačenja, $R_{p0.2}$ , MPa	Vlačna čvrstoća, $R_m$ , MPa	Istezljivost, %
372	738	66

Hastelloy C22 je posebna vrsta austenitne nikal-krom-molibden-volfram legure koja je zbog svoje izuzetne korozijske otpornosti razvijena za sljedeća postrojenja [20]:

- Spalionice otpada zbog iznimne otpornosti na oblike lokalne korozije, rupičastu, procjepnu, i napetosnu koroziju pri kombinaciji ekstremno agresivnih medija poput dušične, klorovodične, mravlje, octene kiseline te ostalih medija poput mješavina organskih i neorganskih spojeva u otpadu i morskoj vodi.
- Farmaceutske reaktore zbog otpornosti na stvaranje zagađenja šarže korozijom tijekom eksploatacije ili gomilanjem bakterija na dijelu sustava s lošijim čišćenjem.
- Tvornice pesticida i gnojiva.
- Filtranama i sustavima za kloriranje.
- Pročišćivačima otpadnih voda.

### 7.1.3. Oprema za mehaniziranje postupka zavarivanja

Cilj ovog eksperimentalnog dijela rada bio je usporedba dvaju različitih zaštitnih plinova pri TIG zavarivanju. Da bi se postigli jednaki parametri i uvjeti pri navarivanju svakog navara

koristi se mehanizirani postupak zavarivanja. Mehanizam za automatsko vođenje pištolja za zavarivanje osigurava nepromijenjen nagib pištolja i kontinuiranu udaljenost između vrha volframove elektrode i radnog komada. Naime, pri ručnom zavarivanju teško je održavati konstantan nagib pištolja i udaljenost vrha volframove elektrode od radnog komada. Promjenom nagiba pištolja ili duljine električnog luka utječe se na rezultate ispitivanja. Stoga, kako bi postigla ponovljivost pri izvođenju svih stanja pokusa koristi se naprava za automatiziranje procesa zavarivanja „BUGO Systems“, kao što je prikazano na slici 47.




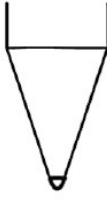

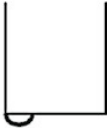


**Slika 47. Prikaz naprave za automatiziranje procesa zavarivanja „BUGO Systems“, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**

Pištolj za zavarivanje se pričvršćuje na navedenu napravu koja ima mogućnosti gibanja preko nosača paralelno uz radno mjesto, te mogućnost namještanja željene udaljenosti pištolja od radnog komada i podešavanje brzina zavarivanja [37].

#### **7.1.4. Netaljiva volframova elektroda**

Volframova elektroda je provodnik električne struje s pištolja za zavarivanje na radni komad. Između volframove elektrode i radnog komada uspostavlja se električni luk koji tali metal osnovnog i dodatnog materijala. Temperatura tališta volframa je vrlo visoka (3 683 K) pa se u plinskoj zaštiti ne tali prilikom zavarivanja. Volframove elektrode izrađuju se od čistog volframa ili volframa s dodacima torijevog oksida ( $\text{ThO}_2$ ) ili cirkonijevog oksida ( $\text{ZrO}_2$ ) ili lantanovog oksida ( $\text{LaO}_2$ ) kako bi im se povećala trajnost. Elektrode legirane torijevim oksidom u odnosu na ostale imaju manji električni otpor i zato se manje zagrijavaju prilikom zavarivanja. Također, uspostava i održavanje električnog luka kod tih elektroda je olakšano [27].

Pravilno toplinsko opterećenje volframove elektrode koje je određeno s jakosti struje zavarivanja osigurat će dulje trajanje volframove elektrode i manje onečišćenje zavarenog spoja volframom, kao što je prikazano na slici 48.

Vrsta struje	Vrsta elektrode	Jakost struje zavarivanja		
		Niska	Optimalna	Visoka
==	Torirana volframova elektroda			
~	Čista volframova elektroda			

Slika 48. Prikaz utjecaja jakosti struje zavarivanja na izgled vrha volframove elektrode [27]

Kod optimalno opterećene volframove elektrode na oštrm vrhu oblikuje se jedna vrlo mala kapljica u obliku kuglice kroz koju se održava stabilan električni luk. Kod zaobljenog vrha elektrode ne nastaje kapljica nego vrh ostaje zaobljen. Preopterećena volframova elektroda brže se troši i onečišćuje metal zavara s volframom, dok premalo opterećena volframova elektroda daje nestabilan električni luk pri zavarivanju [27].

Za proces navarivanja korištena je netaljiva volframova elektroda s dodatkom torijevog oksida promjera 3,2 mm. Za zavarivanje nikla, volframova elektroda mora biti spojena na negativan pol izvora istosmjerne struje. Prije navarivanja vrh volframove elektrode je zašiljen brušenjem.

#### 7.1.5. Proces navarivanja

Navarivanje je provedeno na ispitnoj ploči od legure Hastelloy C-22 dimenzija 350 x 150 x 6,35 mm. Na ispitnoj ploči izvedeno je ukupno šest navara. Tri navara su izvedena s argonom kao zaštitnim plinom, a ostalih tri navara s plinskom mješavinom argon/helij kao zaštitnim plinom. Ispitna ploča je prije navarivanja očišćena s brus papirom i etanolom. Budući da se navarivanjem želi odrediti utjecaj zaštitnog plina na penetraciju, nije korištena plinska zaštita s druge strane ploče. Svih 6 navara je provedeno pomoću naprave za mehanizaciju postupka s nagibom pištolja pod 90 stupnjeva i udaljenosti volframove elektrode od radnog komada u

iznosu od 4 mm kako bi se osigurali isti uvjeti kod svih šest prolaza. Na slici 49. prikazana je priprema radnog mjesta za navarivanje.



**Slika 49. Prikaz pripreme radnog mjesta za navarivanje, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**

Budući da temperatura predgrijavanja ispitne ploče utječe na unos topline, pa tako i na penetraciju i širinu navara, potrebno je bilo osigurati jednaku temperaturu predgrijavanja prije navarivanja svakog prolaza. To se postiglo mjerenjem temperature ispitne ploče pomoću uređaja za mjerenje temperature Fluke 568. Najveća dopuštena temperatura pregrijavanja iznosila je 30 °C. Na slici 50. prikazan je postupak mjerenja temperature ispitne ploče pomoću uređaja Fluke 568, a na slici 51. prikazan je navedeni uređaj.



**Slika 50. Prikaz postupka mjerenja temperature ispitne ploče pomoću uređaja Fluke 568, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**



**Slika 51. Prikaz uređaja za mjerenje temperature, Fluke 568, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**

U nastavku će biti prikazani promjenjivi i nepromjenjivi parametri prilikom procesa navarivanja šest prolaza.

### 7.1.5.1. Promjenjivi parametri navarivanja

Promjenjivi parametri pri izvođenju navarivanja TIG procesom su:

1. **Vrsta zaštitnog plina.** Prva tri prolaza izvedena su s čistim argonom kao zaštitnom plinom, a ostala tri prolaza s mješavinom argon/helij u omjeru 50:50 kao zaštitnim plinom.
2. **Jakost struje zavarivanja.** Za svaku vrstu zaštitnog plina izvedena su tri prolaza sa sljedećim vrijednostima jakosti struje: 80 A, 130 A i 180 A.
3. **Napon zavarivanja.** Napon električnog luka kod TIG postupka ovisi o jakosti struje zavarivanja, vrsti zaštitnog plina i duljini električnog luka.
4. **Unos topline.** Unos topline ovisi o postupku, struji zavarivanja, naponu zavarivanja i brzini zavarivanja. Računa se prema sljedećem izrazu [22]:

$$Q_z = k * \frac{U_z * I_z * 60}{v_z * 1000} \quad (1)$$

gdje su:

$Q_z$  – unesena topline, kJ/cm

$U_z$  – napon zavarivanja, V

$I_z$  – jakost struje zavarivanja, A

$v_z$  – brzina zavarivanja, cm/min

$k$  – koeficijent iskoristivosti topline električnog luka ( $k = 0,6$  za TIG postupak).

Nakon svakom prolaza očitana je vrijednost napona zavarivanja s uređaja za zavarivanja i izračunat je unos topline.

### 6.1.5.2. Nepromjenjivi parametri navarivanja

Nepromjenjivi parametri pri izvođenju navarivanja TIG procesom su:

1. **Protok zaštitnog plina:** 10 l/min.
2. **Brzina zavarivanja:** 9 cm/min
3. **Promjer volframove elektrode:** 3,2 mm.
4. **Polaritet i vrsta struje.** DC (-).
5. **Nagib pištolja:** 90 °.
6. **Udaljenost vrha volframove elektrode od radnog komada:** 4 mm.

Na temelju teorijskog dijela rada, pretpostavlja se da će napon biti veći pri korištenju mješavine argon/helij u odnosu na čisti argon kao zaštitni plina pri istoj vrijednosti struje. Naime,

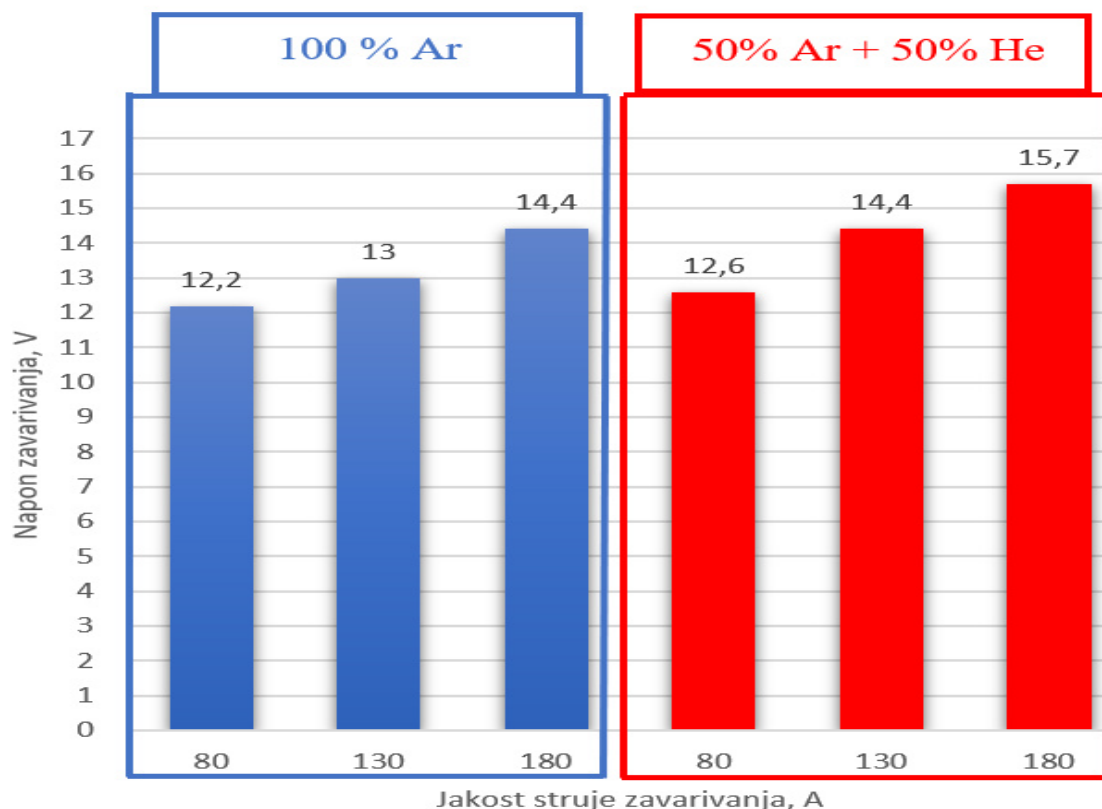
mješavina 50 % argona i 50 % helija utječe na povećanje energije električnog luka, što omogućava veće brzine zavarivanja i bolju penetraciju. Nedostatak je visoka cijena i teže uspostavljanja električnog luka [37].

## 7.2. Rezultati ispitivanja utjecaja zaštitnog plina na napon zavarivanja

Rezultati utjecaja vrste zaštitnog plina na napon zavarivanja prikazani su u tablici 24.

Tablica 24. Prikaz rezultata ispitivanja utjecaja vrste zaštitnog plina na napon zavarivanja

Prolaz	Vrsta zaštitnog plina	Jakost struje zavarivanja, A	Napon zavarivanja, V	Srednja vrijednost napona, V	Postotna promjena napona pri istim strujama, %	Unos topline, kJ/cm
1	100 % Ar	80	12,3 - 12,0	12,2	-	3,90
2		130	13,2 - 12,7	13,0	-	6,76
3		180	14,6 - 14,2	14,4	-	10,37
4	50 % Ar + 50% He	80	12,7 - 12,4	12,6	3,28	4,032
5		130	14,5 - 14,3	14,4	10,77	7,488
6		180	16,0 - 15,3	15,7	9,02	11,30



Slika 52. Grafički prikaz rezultata ispitivanja utjecaja vrste zaštitnog plina na napon



Uočava se da s porastom jakosti struje raste i napon zavarivanja za obje vrste zaštitnih plinova. Vrijednost napona zavarivanja je veća kod plinske mješavine 50 % Ar i 50 % He za istu vrijednost jakosti struje u odnosu na čisti argon. Postotno povećanje vrijednosti napona pri istim strujama zavarivanja jakosti 130 A i 180 A iznosi 9 – 10 % i veće je u odnosu na postotno povećanje pri jakost struje od 80 A koje iznosi 3 %. Na slici 52. prikazan je grafički prikaz navedenih rezultata, a na slici 53. prikazani su svih šest izvedenih prolaza.

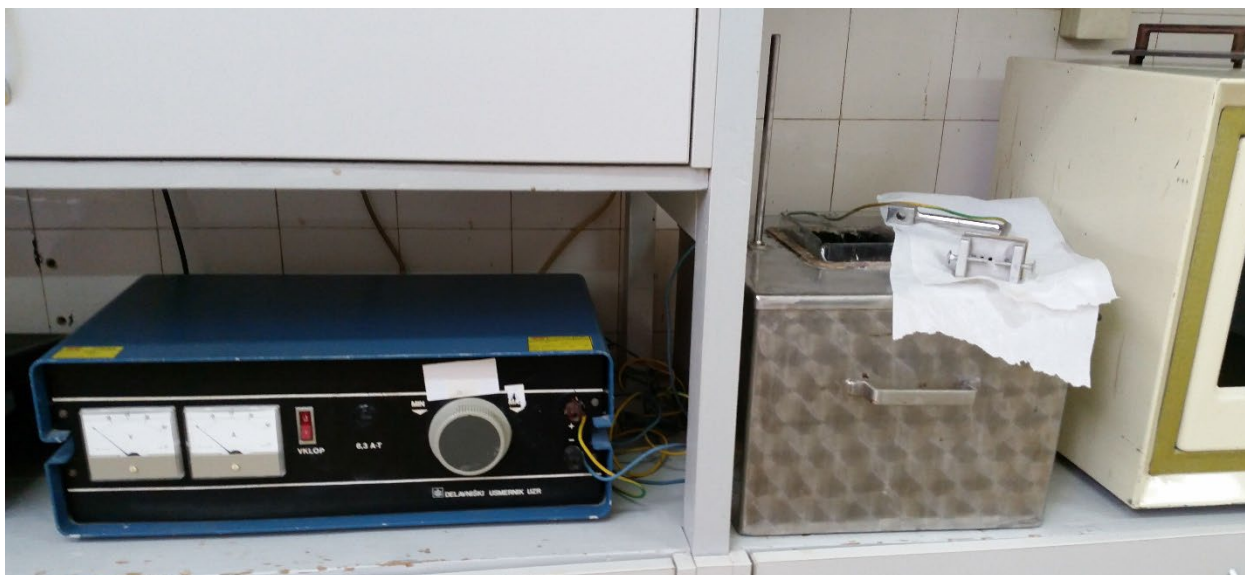


Slika 53. Prikaz svih šest prolaza izvedenih navarivanjem, Laboratorij za zavarivanje, FSB

Iz slike 53. vidljivo je da s povećanjem jakosti struje raste širina zavara, i da prolazi koji su izvedeni s plinskom mješavinom 50 % argon i 50 % helij imaju veću širinu pri istoj jakosti struje u odnosu na one izvedene s plinskom mješavinom čistog argona.

### 7.3. Rezultati ispitivanja utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu navara

Da bi se mogla izmjeriti penetracija i širina navara potrebno je izraditi makroizbruske za svaki navar i dobiti digitalnu sliku pojedinog makroizbruska koja se može obraditi u određenom softveru. Stoga, za izradu makroizbruska, nakon navarivanja, tračnom pilom iz ispitne ploče, izrezana su šest uzorka koji su najprije ručno brušeni brusnim papirima PAP, granulacije P80, P180, P320 i P500. Nakon brušenja, uzorci su nagrizeni elektrokemijskim putem s 10 % - tnom oksalnom kiselinom ( $C_2H_5O_4$ ) u vremenskom razdoblju od 20 s, pri naponu 6 V i struji 5 A pomoću uređaja „Delavniški usmernik uzr“, koji je prikazan na slici 54.

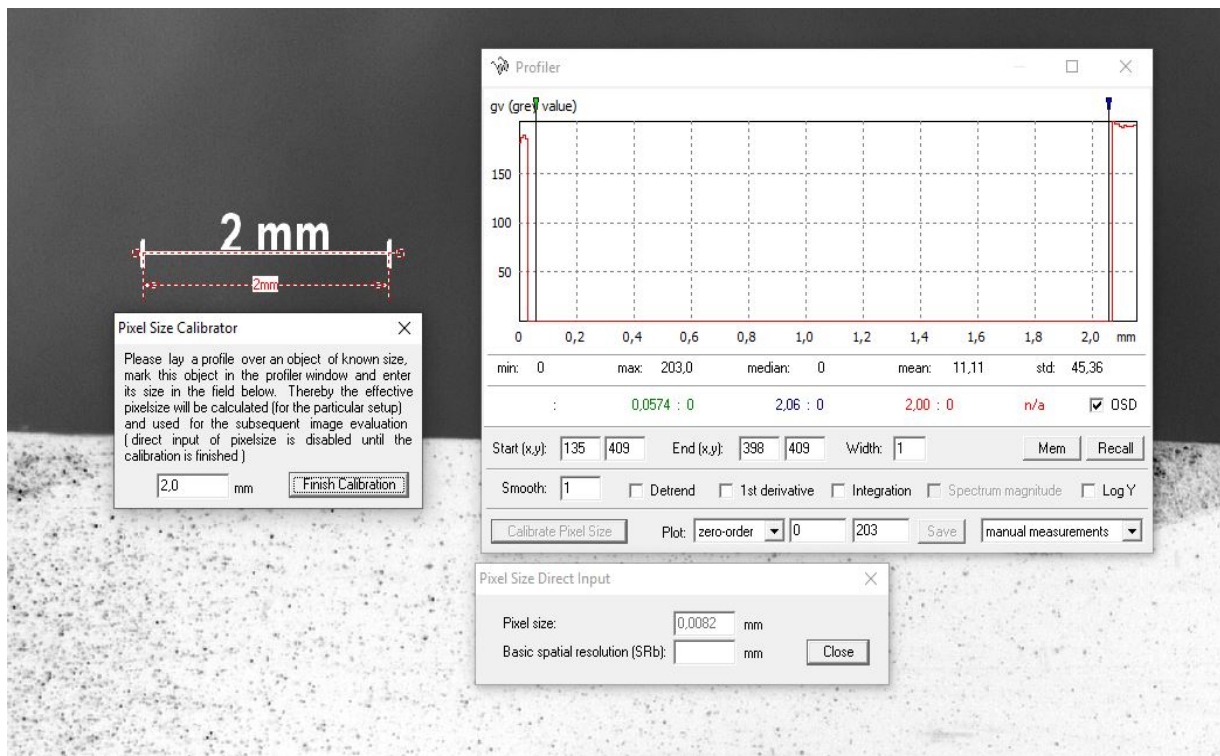


**Slika 54. Prikaz uređaja za elektrokemijsko nagrivanje „DELAVNIŠKI USMERNIK UZR“, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB, Zagreb**

Za dobivanje digitalne slike svakog makroizbruska, odnosno navara, korišten je stereo mikroskop LEICA MZ6 i pripadajući software Leica Application suite v3.2.0 koji se nalazi u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

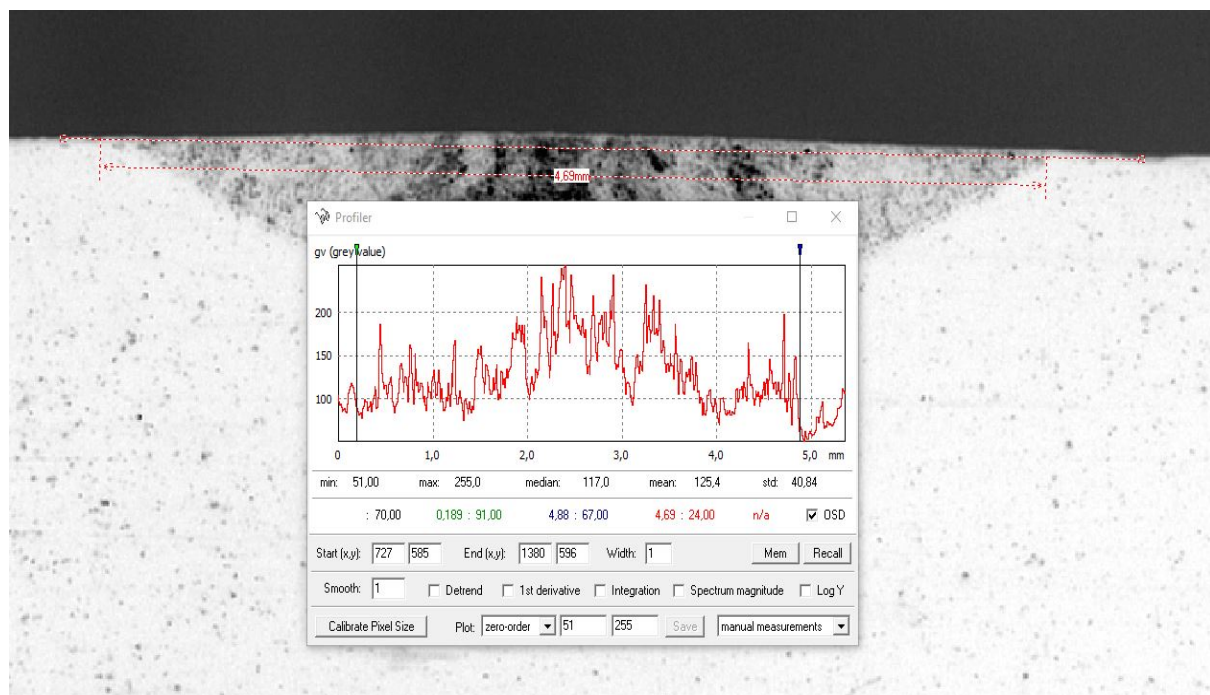
Konačno, dobivene digitalne slike pojedinog makroizbruska obrađene su u programu „iSee“ gdje je izmjerena širina i dubina makroizbruska pomoću poznate veličine piksela. Program mjeri duljine tako da se kalibrira pomoću poznate duljine sa slike. Na temelju poznate duljine sa slike određuje se veličina piksela, na osnovu čega se dalje mjeri bilo koju duljina sa slike. Pomoću opcije

„Calibrate pixel size“ u modu profiler (f3), slika 55., i poznate duljine od 2 mm za kalibriranje izračunata je veličina pixela.

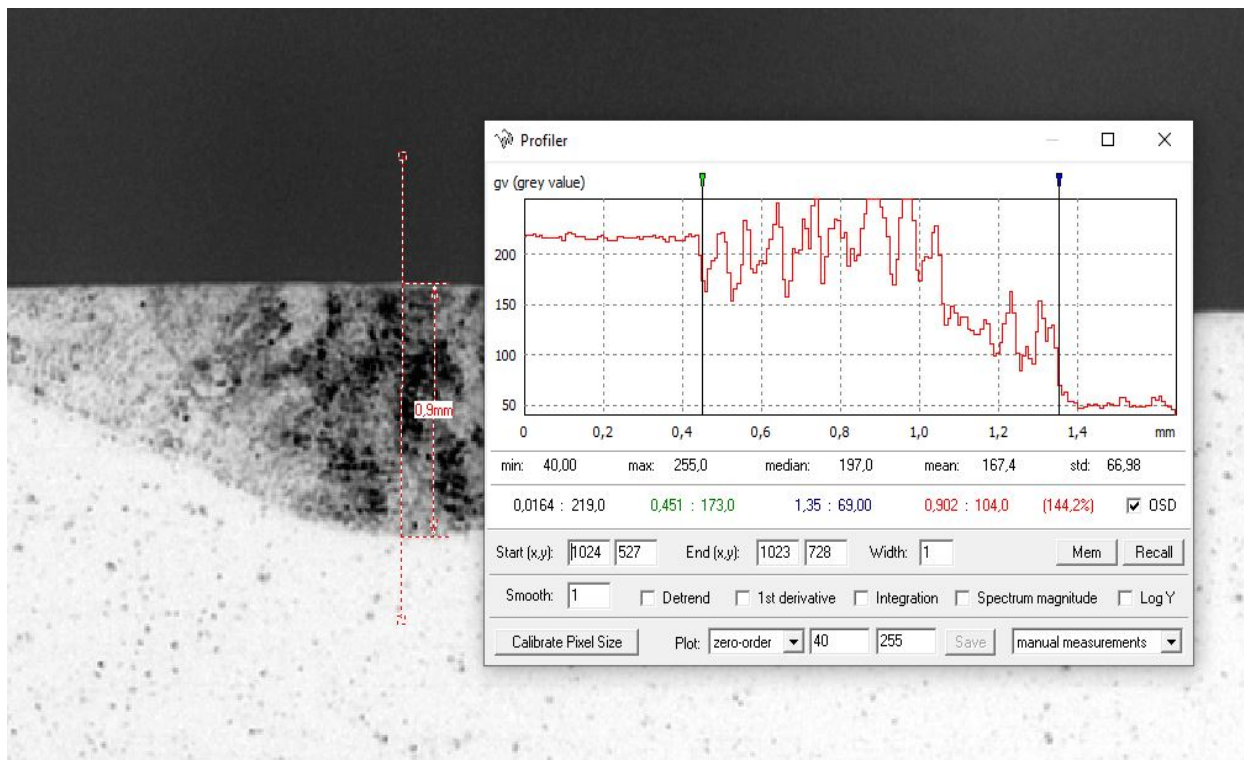


**Slika 55. Prikaz postupka određivanja veličine piksela u programu iSee**

Nakon kalibracije veličine piksela, pomoću funkcije profiler mjeri se dubina i širina navara, kao što je prikazano na slikama 56. i 57.



**Slika 56. Prikaz mjerenja širine navara pomoću programa iSee**



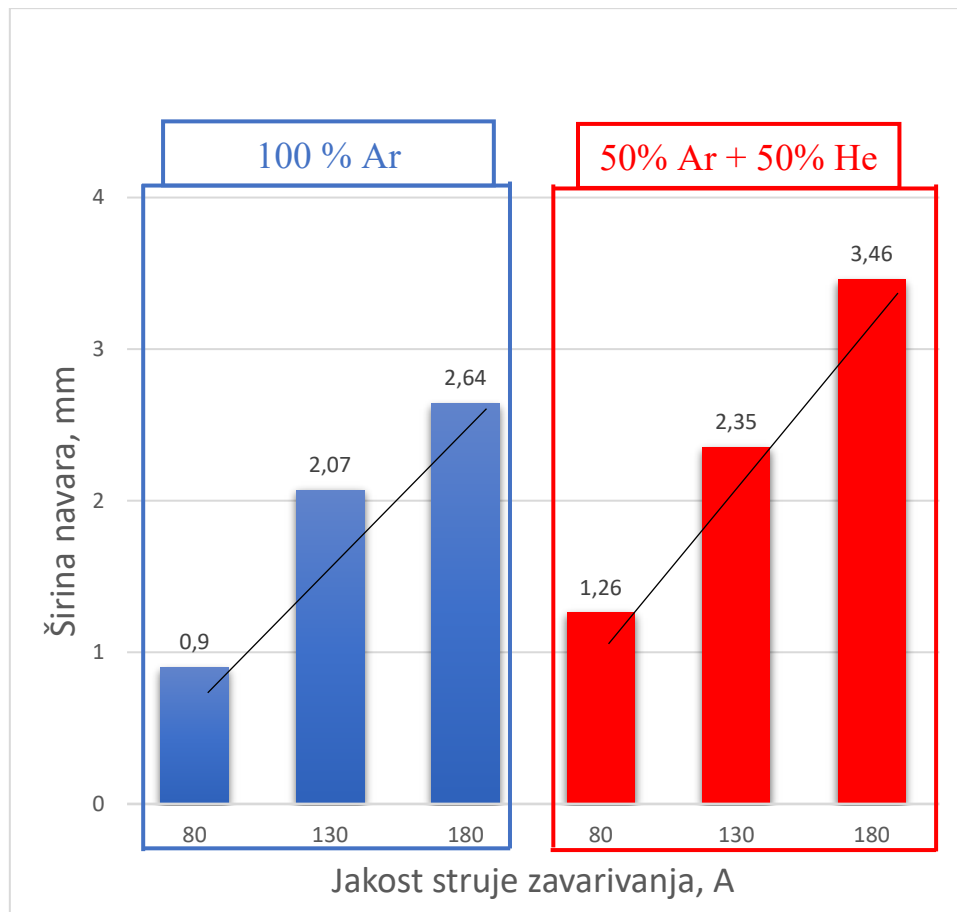
Slika 57. Prikaz mjerenja dubine navara pomoću programa iSee

U tablici 25. prikazani su rezultati ispitivanja utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu navara.

Tablica 25. Prikaz rezultata ispitivanja utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu navara

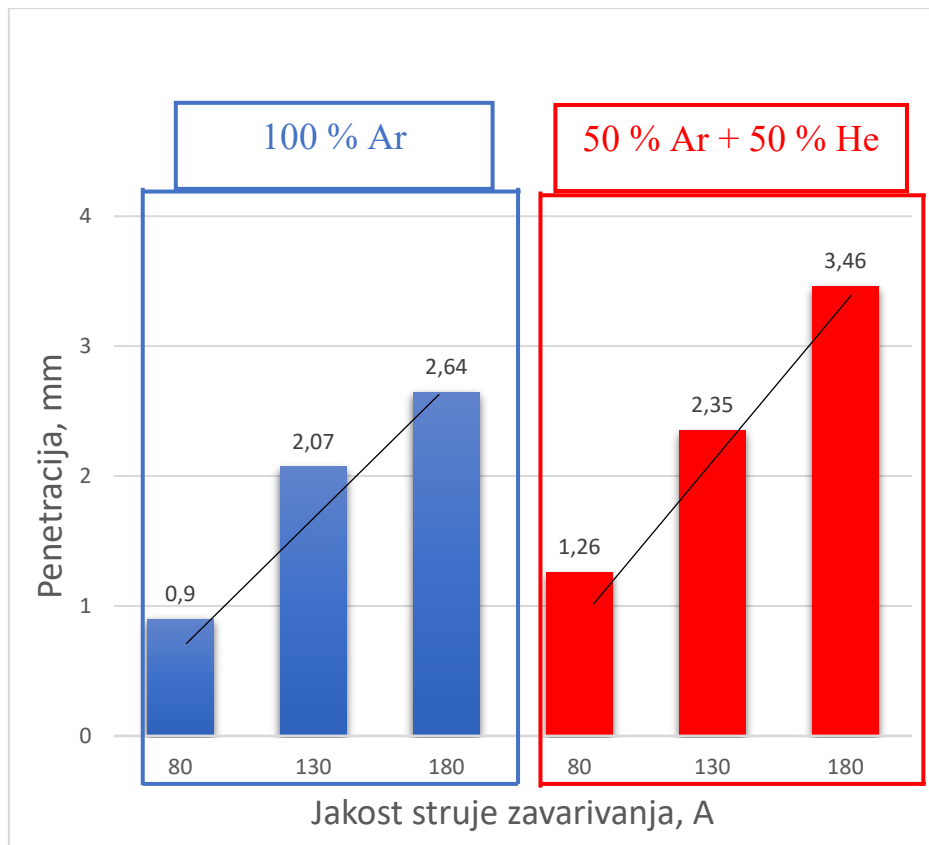
Makroizbrusak	Vrsta zaštitnog plina	Srednja vrijednost napona, V	Širina navara, mm	Dubina navara (penetracija), mm
1	100 % Ar	12,2	4,69	0,9
2		13,0	8,9	2,07
3		14,4	12,1	2,64
4	50 % Ar + 50% He	12,6	5,78	1,26
5		14,4	10,7	2,35
6		15,7	15,4	3,46

Iz tablice 25., može se uočiti da s porastom napona linearno rastu vrijednosti širine i dubine navara. Utjecaj zaštitnog plina na širinu navara grafički je prikazan je na slici 58.



**Slika 58. Prikaz rezultata ispitivanja utjecaja zaštitnog plina na širinu navara**

Širina navara je veća kod plinske mješavine 50 % Ar i 50 % He za istu vrijednost jakosti struje u odnosu na čisti argon. Uočava se linearna ovisnost između napona zavarivanja (jakosti struje) i širine navara. Utjecaj zaštitnog plina na penetraciju grafički je prikazan je na slici 59.

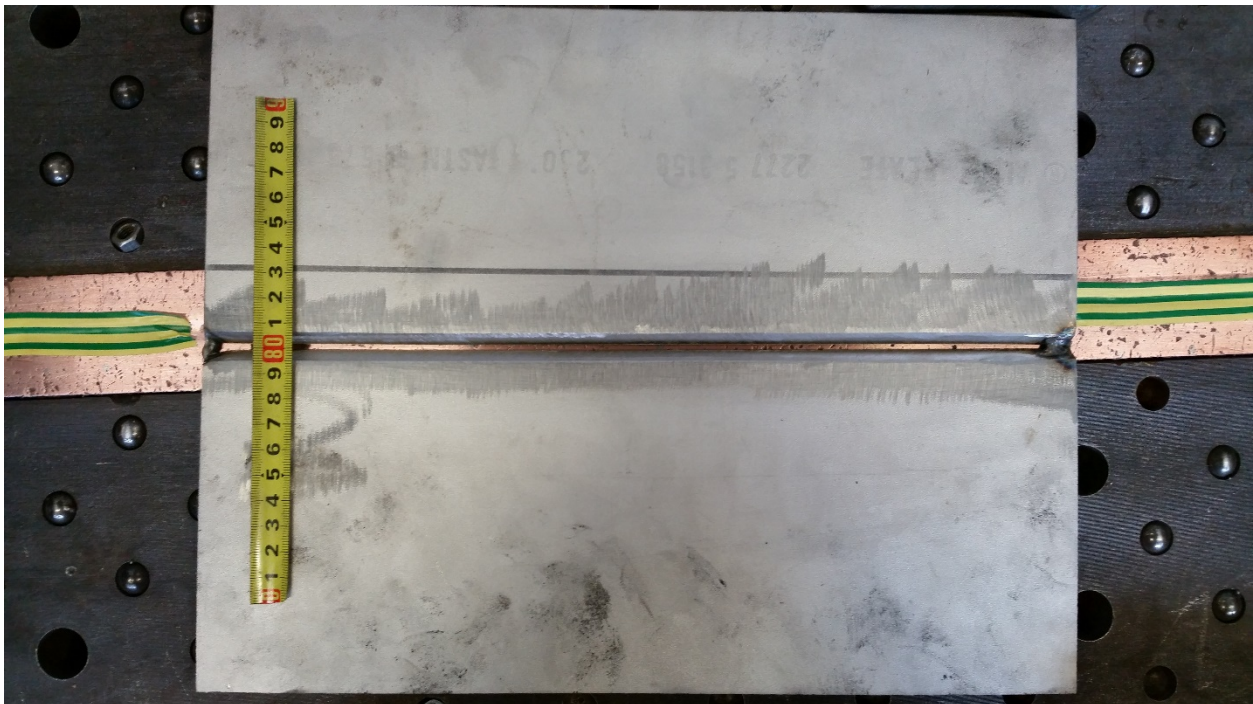


Slika 59. Prikaz rezultata ispitivanja utjecaja zaštitnog plina na penetraciju

Penetracija je isto veća kod plinske mješavine 50 % Ar i 50 % He za istu vrijednost jakosti struje u odnosu na čisti argon. Također, uočava se linearna ovisnost između napona zavarivanja (jakosti struje) i penetracije.

#### 7.4. Zavarivanje super legure Hastelloy C-22

Zavarivanje legure Hastelloy C-22 provedo se prema specifikaciji postupka zavarivanja koja je dana u poglavlju 6.4.1. Zahtjev za čistoću ovog materijala je prioritet jer o tome ovisi uspješnost zavarenog spoja. Priprema zavara započinje čišćenjem i brušenjem površinskog sloja metala do samoga sjaja u udaljenosti od 25 mm od zavarenog spoja sa svake strane, tj. na korijenskoj strani i na strani lica zavara. Nakon čišćenja i brušenja, potrebno je s alkoholom i čistom krpom prebrisati žlijeb zavara te osigurati odstranjivanje svih mogućih nečistoća, prašine, ulja, masti i otisaka prstiju na zavarenom spoju. Potrebno je očistiti površinski sloj oksida između svakog zavarenog prolaza čistom četkom od nehrđajućeg čelika. Također, zavarivač je imao potpuno nove rukavice za TIG zavarivanje i korištena je nova keramička sapnica. Kontrola međuslojne temperature je obavezna, i ona ne smije iznositi više od 80 °C. V priprema spoja i pripoji napravljeni TIG postupkom prikazani su na slici 60.



Slika 60. Prikaz pripreme spoja prije zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb

Provedeno je višeslojno zavarivanje u četiri prolaza: jedan korijenski prolaz i tri prolaza popune. Međutim, početni korijenski prolaz imao je puno nepravilnosti i pogrešaka i iz tog razloga bilo je potrebno brušenje korijena i popravak korijenskog prolaza (peti prolaz). U tablici 26. prikazani su parametri svakog prolaza.

Tablica 26. Prikaz parametara zavarivanja

Prolaz	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/cm	Protok plina, l/min	
					Zaštitni	Korijenski
1	85	10,1	5,9	5,24	12	7
2	110	11,5	6,2	7,34	12	-
3	110	11,2	6,1	7,27	12	-
4	110	11,4	6,05	7,46	12	-
5	110	11,8	7,14	6,54	12	-

Na sljedećim slikama prikazani su izvedeni prolazi prije i nakon čišćenja oksida.



Slika 61. Prikaz korijenskog prolaza s prednje strane zavara nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb



Slika 62. Prikaz korijenskog prolaza s prednje strane zavara nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb





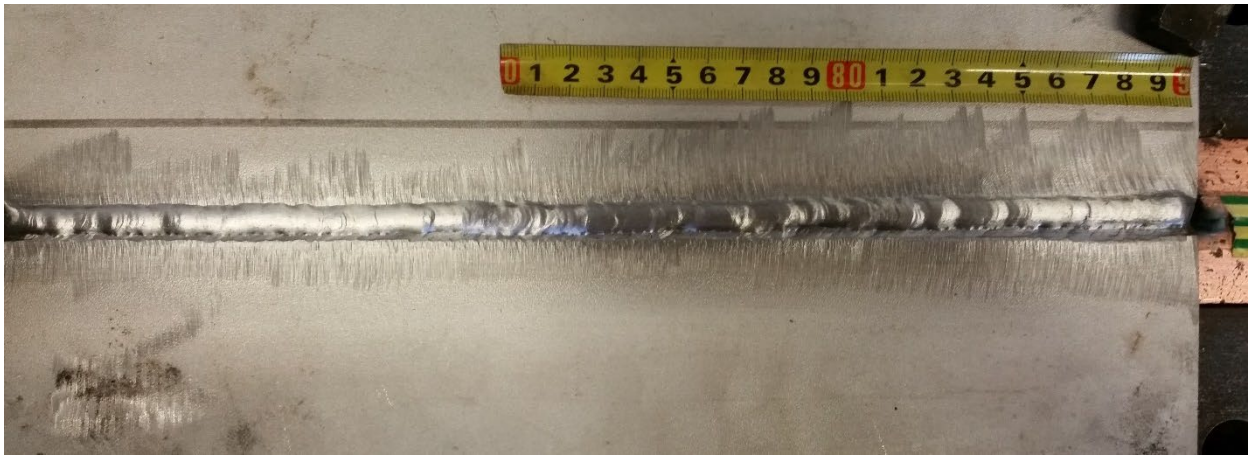
**Slika 63. Prikaz prvog prolaza popune nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**



**Slika 64. Prikaz prvog prolaza popune nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**



**Slika 65. Prikaz drugog prolaza popune nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**



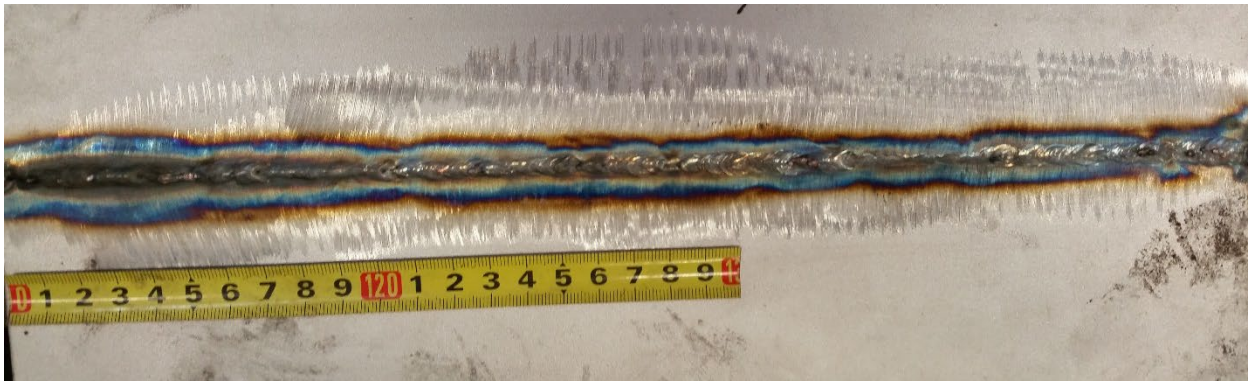
**Slika 66. Prikaz drugog prolaza popune nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**



**Slika 67. Prikaz trećeg prolaza popune nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**



**Slika 68. Prikaz trećeg prolaza popune nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**



Slika 69. . Prikaz korijenskog prolaza sa stražnje strane zavara nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb



Slika 70. Prikaz korijenskog prolaza sa stražnje strane zavara nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb

Na slici 70. uočava se da korijenski prolaz sadrži mnogo nepravilnosti, odnosno pogrešaka. Pogreške nepotpunog provara i poroznosti detaljnije su prikazani slikama 71. i 72.



Slika 71. Prikaz pogreške nedovoljnog provara korijenskog prolaza, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb



**Slika 72. Prikaz pogreške poroznosti korijenskog prolaza, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**

Zbog navedenih pogrešaka bilo je potrebno brušenje korijena. Na slici 73. prikazana je površina korijenskog dijela zavera nakon brušenja.



**Slika 73. Prikaz korijenskog dijela zavarenog spoja nakon brušenja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**



**Slika 74. Prikaz popravka korijenskog prolaza nakon zavarivanja, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**



**Slika 75. Prikaz popravka korijenskog prolaza nakon čišćenja oksida, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**

### 7.4.1. Specifikacija postupka zavarivanja

<b>Mjesto:</b> Zagreb <b>Izradio:</b> Antonio Radić <b>Pregledao:</b> Ivica Garašić <b>Oznaka uputstva za zavarivanje (WPS):</b> <b>Poduzeće:</b> <b>Ime zavarivača:</b> <b>Postupak zavarivanja:</b> TIG 141 <b>Vrsta spoja:</b> BW (Sučeljeni spoj) <b>Pojedinosti pripreme rubova:</b> V spoj	<b>Ispitno mjesto:</b> FSB, Zagreb <b>Način pripreme rubova i čišćenja:</b> Brušenje, četkanje, odmašćivanje (aceton), naknadno čišćenje <b>Specifikacija osnovnog materijala:</b> NiCr24Mo14W <b>Grupa materijala prema ISO/TR 15608:</b> 43 <b>Debljina osnovnog materijala:</b> 6 mm <b>Vanjski promjer:</b> <b>Položaj zavarivanja:</b> PA
Oblik pripreme zavarenog spoja	Redoslijed zavarivanja

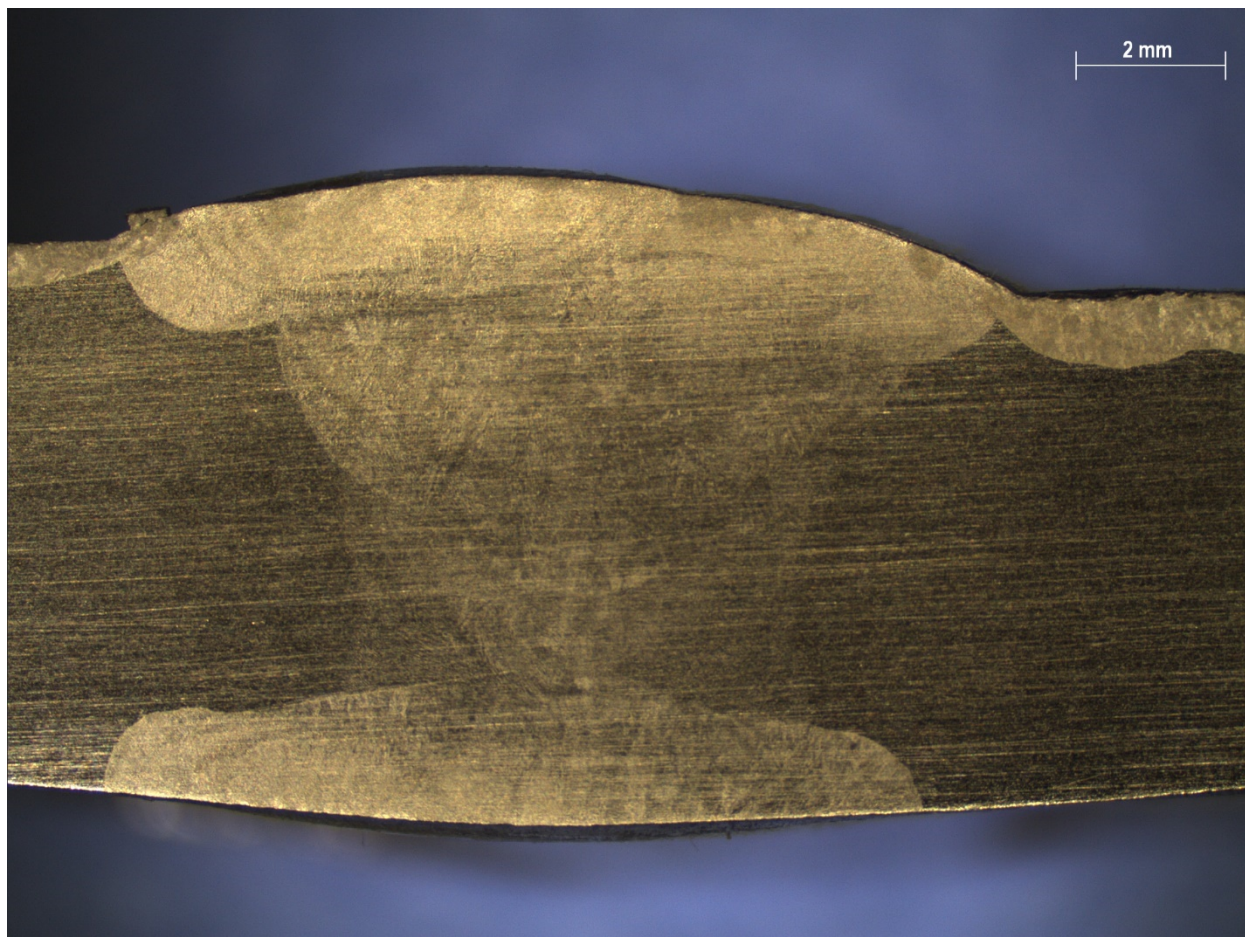
Pojedinosti postupka zavarivanja

Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina zavarivanja [cm/min]	Unos topline [kJ/cm]
1	141	Ø 1,6	60 - 90	10-12	DC (- pol)	6	3,6 - 6,48
2	141	Ø 1,6	80 - 120	10-12	DC (- pol)	6	4,8 - 8,64
3	141	Ø 1,6	80 - 120	10-12	DC (- pol)	6	4,8 - 8,64
4	141	Ø 1,6	80 - 120	10-12	DC (- pol)	6	4,8 - 8,64
5	141	Ø 1,6	80 - 120	10-12	DC (- pol)	6	4,8 - 8,64

<b>Dodatni materijal:</b> - oznaka prema normi: (ISO) SNI6022, (AWS) ERNiCrMo-10 - klasa prema normi: HRN EN ISO 18274 - trgovačko ime: TIG Daiko SF 622 - grupa materijala: FM 6  <b>Zaštitni plin/prašak:</b> - zaštitni plin: HRN EN ISO 14175: I3, 50% Ar + 50% He - korijenska zaštita: HRN EN ISO 14175: I1, 100 % Ar <b>Protok plina:</b> - zaštitni plin: 12 l/min - plin za korijensku zaštitu: 7 l/min  <b>Wolfram-elektroda/promjer:</b> WT 20 / Ø 2,4 mm <b>Pojedinosti o žljebljenju:</b> Bez žljebljenja <b>Temperatura predgrijavanja:</b> 20 °C <b>Međuslojna temperatura:</b> MAX. 80 °C <b>PWHT:</b> --- <b>Vrijeme, temperatura, postupak:</b> --- <b>Brzina grijanja i hlađenja:</b> ---	<b>Dodatne informacije:</b> 1. Pripremiti rubove lima brušenjem tako da kut između bude 60 ° 2. Nakon brušenja očistiti zavar s acetonom od masti i ostalih nečistoća 3. Prije zavarivanja obavezno očistiti i odmastiti površinu 4. Nakon zavarivanja korijenskog sloja potrebno je brušenje 5. Nakon svakog, pa i završnog prolaza četkati i očistiti površinski sloj oksida i sloj troske prikladnim alatom i sredstvima 6. Kontrola međuslojne temperature je obavezna
---	--

### 7.4.2. Ispitivanje makroizbruska

Analizom makroizbruska vidljiva je geometrija zavarenog spoja, veličina zone utjecaja topline, linija staljivanja te broj prolaza. Na slici 76. prikazan je makroizbrusak zavarenog spoja super legure Hastelloy C-22.



**Slika 76. Prikaz makroizbruska zavarenog spoja super legure Hastelloy C-22, Laboratorij za zavarivanje, FSB, Zagreb**

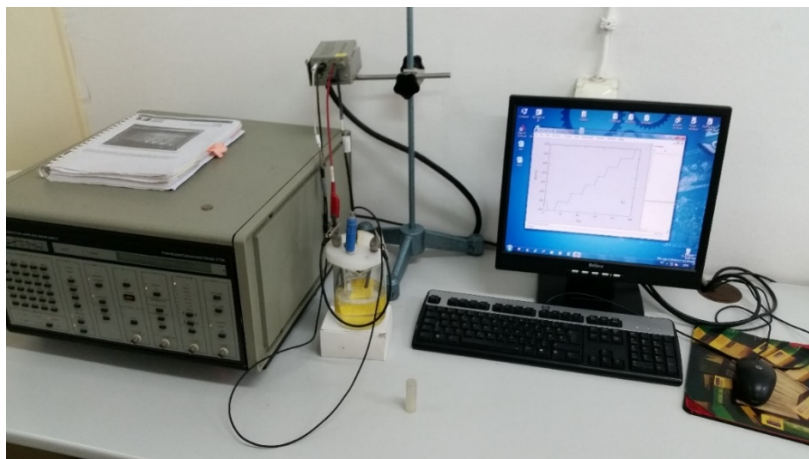
Pomoću programa „iSee“ izmjerena je geometrija zavarenog spoja, odnosno nadvišenje i širina lica zavara te nadvišenje i širina korijena zavara. Izmjerene vrijednosti prikazane su u tablici 27.

**Tablica 27. Prikaz geometrije zavarenog spoja super legure Hastelloy C-22**

Lice zavara		Korijen zavara	
Nadvišenje, mm	Širina , mm	Nadvišenje, mm	Širina , mm
1,57	12,3	0,71	11

## 7.5. Elektrokemijska ispitivanja istosmjernom strujom i određivanje kemijskog sastava

Elektrokemijska korozijska ispitivanja istosmjernom strujom zavara legure nikla Hastelloy C-22 provedena su prema normi ASTM G5-94 na uređaju Potentiostat/Galvanostat Model 273A EG&E, slika 77., uz primjenu programa SoftCorr III u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 77. Prikaz opreme za elektrokemijsko DC ispitivanje, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB, Zagreb

Uzorak, slika 78., pripremljen je za elektrokemijsko ispitivanje brušenjem na brusnom papiru granulacije P180, P320 i P500 i naknadno polirani papirom granulacije 1000. Na uzorku se ispituje površina u iznosu od 1 cm<sup>2</sup> za područje metala zavara i osnovnog materijala, dok je ostali dio izoliran. Elektrolit za sva ispitivanja je bila 3,5 %-tna otopina NaCl. Ispitivanje je provedeno pri temperaturi od  $22 \pm 2$  °C.



Slika 78. Prikaz ispitnog uzorka za elektrokemijska ispitivanja, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB, Zagreb

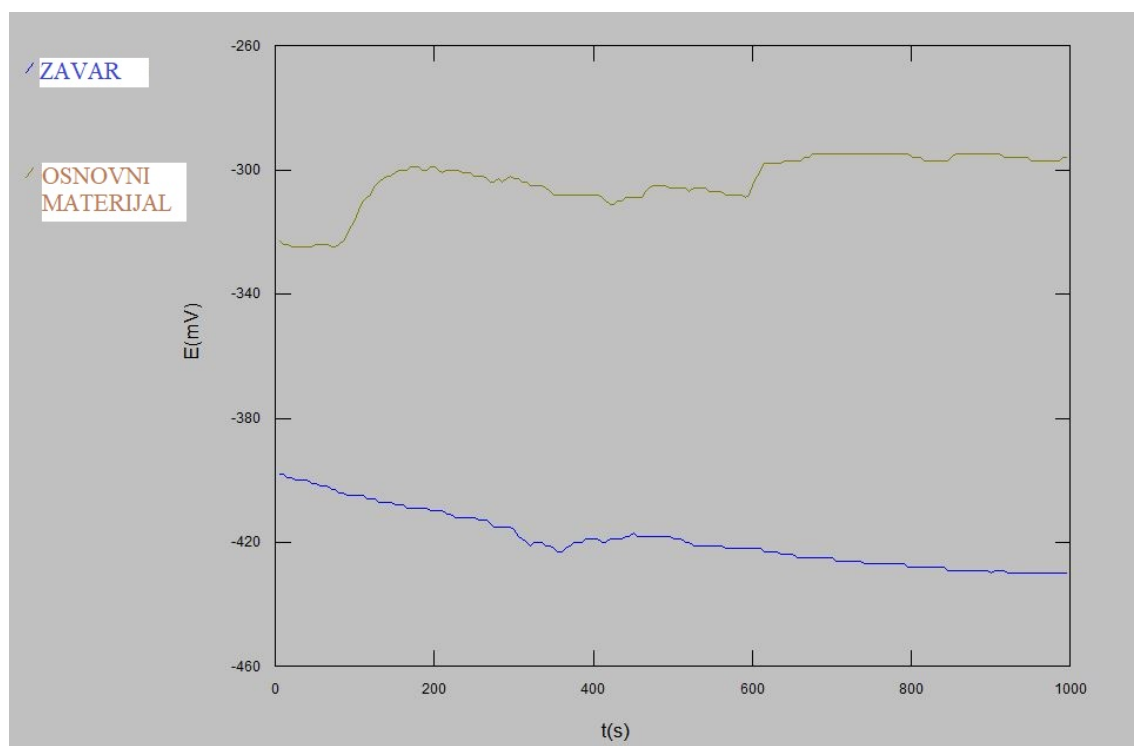
Elektrokemijskim ispitivanjima određeni su sljedeći parametri: korozijski potencijal ( $E_{kor}$ ), brzina korozije ( $v_{kor}$ ), polarizacijski otpor ( $R_p$ ), piting potencijal ( $E_{pit}$ ) te zaštitni potencijal ( $E_{zpit}$ ).

### 7.5.1. Određivanje korozijskog potencijala, $E_{kor}$

Korozijski potencijal određuje se tako da se električni krug između radne elektrode i protuelektrode drži otvorenim, te se prati razlika potencijala između radne i referentne elektrode u vremenu. Konačna izmjerena vrijednost je uzeta kao korozijski potencijal. U tablici 28. prikazani su rezultati ispitivanja korozijskog potencijala za područje zavara i za područje osnovnog materijala. Na slici 79. prikazano je kretanje korozijskog potencijala tijekom ispitivanja u vremenu za područje osnovnog materijala i za područje metala zavara, odnosno dijagram E-t.

Tablica 28. Prikaz rezultata ispitivanja korozijskog potencijala

Područje	Korozijski potencijal, mV
Zavar	-430
Osnovni materijal	-296



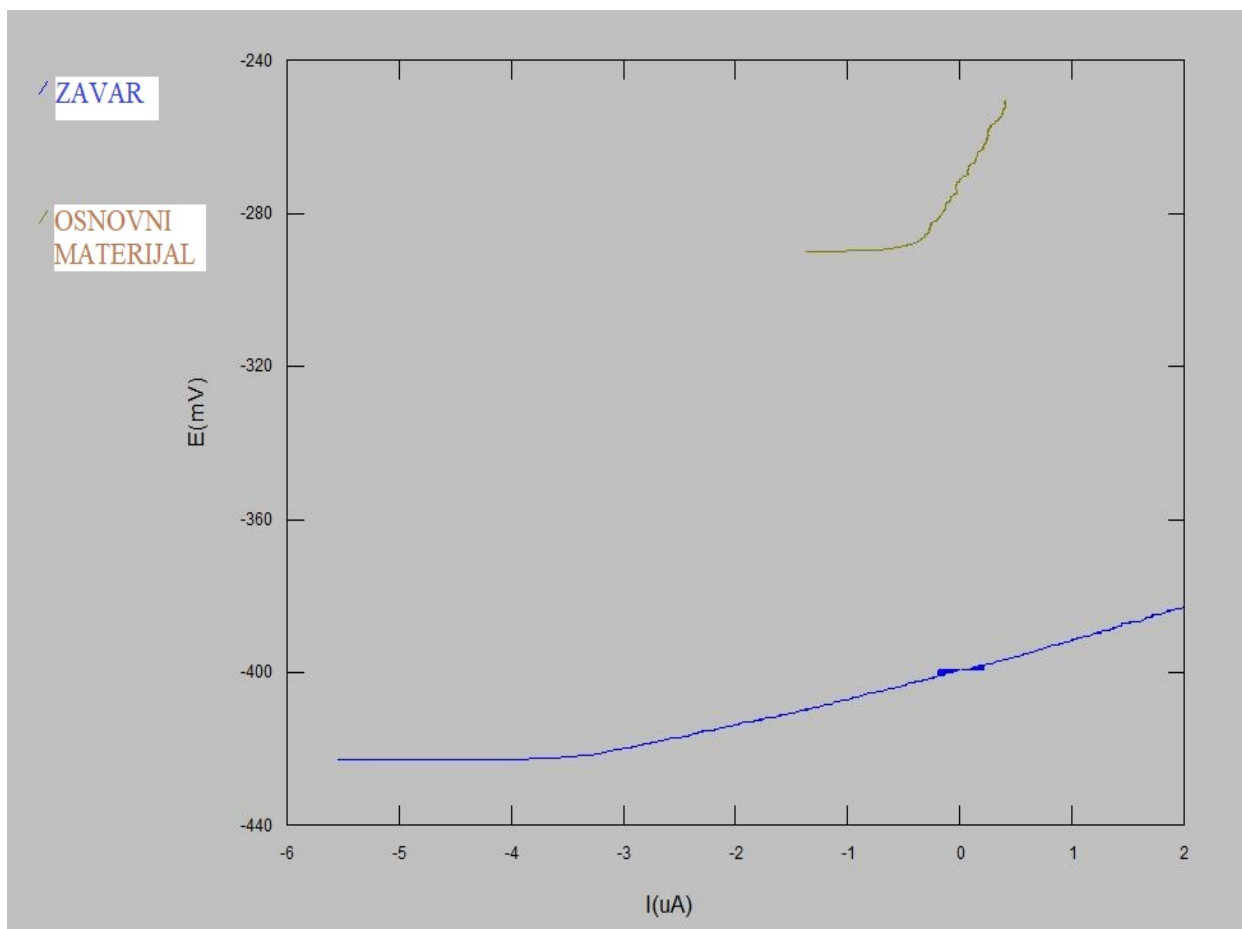
Slika 79. Prikaz kretanja korozijskog potencijala u vremenu za područje metala zavara i područje osnovnog materijala



Dobivene vrijednosti korozijskog potencijala područja metala zavara (-430 mV) i područja osnovnog materijala (-296 mV) su obje negativne, što ukazuju na nestabilnost, odnosno na otapanje (koroziju) legure Hastelloy C-22 u navedenom elektrolitu (3,5 %-tna otopina NaCl). Što je vrijednost korozijskog potencijala negativnija, to je materijal (područje) nepostojanije u tom elektrolitu (mediju). Naime, područje metala zavara i osnovnog materijala se razlikuju po kemijskom sastavu i strukturi zbog utjecaja topline tijekom zavarivanja i zbog toga im se vrijednosti korozijskog potencijala razlikuju. Područje metala zavara ima negativniji korozijski potencijal od područja osnovnog materijala, što znači da se područje metala zavara brže otapa od osnovnog materijala u 3,5 %-tnoj otopini NaCl.

### 7.5.2. Određivanje polarizacijskog otpora $R_p$

U tablici 29. prikazane su vrijednosti polarizacijskog otpora za područje metala zavara i za područje osnovnog materijala. Na slici 80. prikazan je preklap dijagrama linearne polarizacije za područje zavara i osnovnog materijala.



**Slika 80. Prikaz preklapa dijagrama linearne polarizacije za područje zavara i osnovnog materijala**

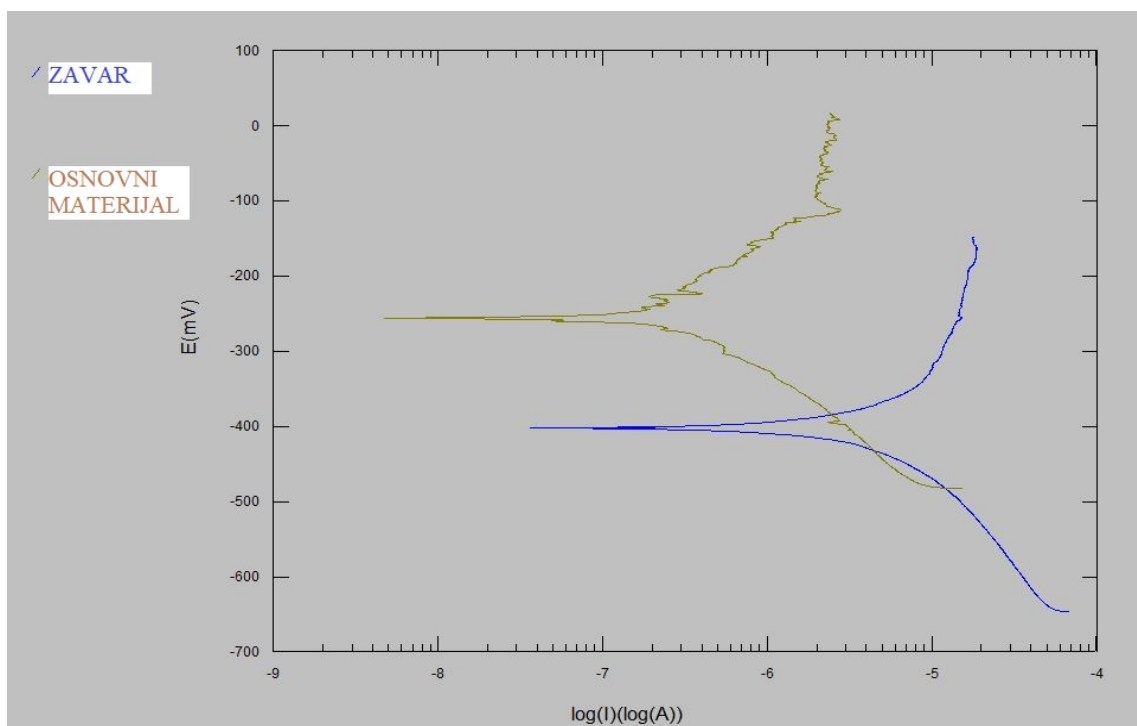
**Tablica 29. Prikaz vrijednosti polarizacijskog otpora za područje metala zavara i za područje osnovnog materijala**

Područje	Polarizacijski otpor, $k\Omega/cm^2$
Zavar	7,62
Osnovni materijal	46,88

Područje zavara ima manju vrijednost polarizacijskog otpora (7,62) u odnosu na područje osnovnog materijala (46,88), što se vidi i grafički iz slike 80., gdje je nagib krivulje linearne polarizacije osnovnog materijala veći od nagiba krivulje linearne polarizacije područja metala zavara. Što su veće vrijednosti polarizacijskog otpora, veća je otpornost materijala prema mediju u kojem se nalazi. Iz dobivenih rezultata, može se zaključiti da područje osnovnog materijala pokazuje veću otpornost prema 3,5 %-tnoj otopini NaCl u odnosu na područje metala zavara.

### 7.5.3. Određivanje brzine korozije

Brzina korozije određuje se metodom Tafelove ekstrapolacije. U tablici 30. dani su rezultati analize korozijskih parametara: brzine korozije,  $v_{kor}$  i korozijske struje  $J_{kor}$ . Na slici 81. dan je prikaz preklopa dijagrama Tafelove polarizacije.

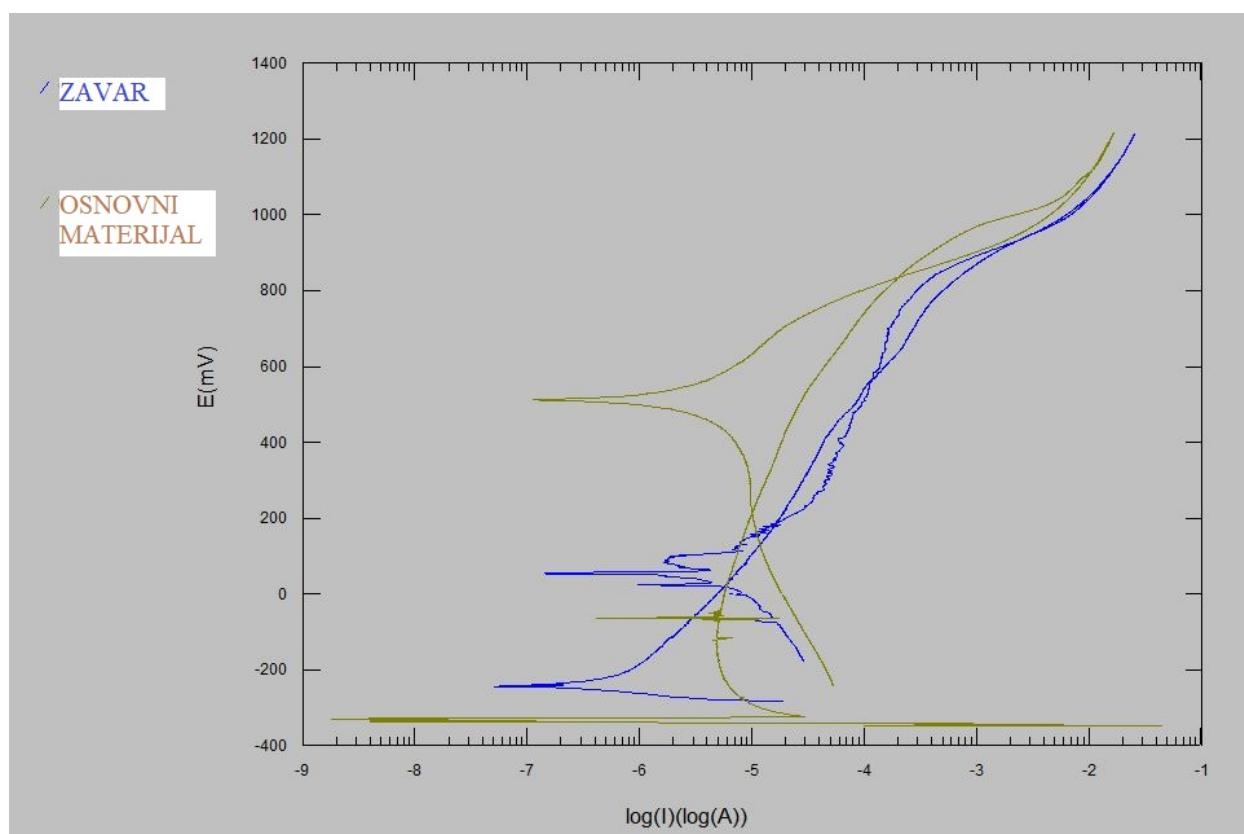
**Slika 81. Prikaz preklopa dijagrama Tafelove polarizacije za područje metala zavara i osnovnog materijala**

**Tablica 30. Prikaz vrijednosti brzine korozije i korozijske struje dobivenih Tafelovom ekstrapolacijom**

Područje	Brzina korozije, mm/god	Korozijska struja, $\mu\text{A}$
Zavar	0,3845	38,72
Osnovni materijal	0,007821	7,876

#### 7.5.4. Ispitivanje sklonosti prema rupičastoj koroziji

Ispitivanja sklonosti prema rupičastoj koroziji cikličkom polarizacijom provedeno je u 3,5 % otopini NaCl pri  $(20 \pm 2)$  °C i pri tlaku od 101325 Pa, sukladno normi ASTM G 61-98. Rezultati provedenog ispitivanja prikazani su na slici 82.



**Slika 82. Prikaz preklopa krivulje cikličke polarizacije područja metala zavara i osnovnog materijala**

Iz slike 82. vidljivo je da uzorak ne pokazuje sklonost rupičastoj koroziji u području metala zavara niti u području osnovnog materijala. To je zato što se iz dijagrama ne uočava nagli skok vrijednosti struje u anodnom pravcu, kao ni histerezna promjena struje u katodnom pravcu.

### 7.5.5. Određivanje kemijskog sastava

Određivanje kemijskog sastava provedo se pomoću uređaja XRF - Olympus proizvođača Innov-X Systems-a, prikazanog na slici 83.



Slika 83. Prikaz uređaja XRF – Olympus [38]

Rendgenska fluorescentna spektrometrija je nedestruktivna analitička tehnika koja se koristi za identifikaciju i određivanje masene koncentracije kemijskih elemenata u čvrstim, praškastim i tekućim uzorcima. XRF spektrometar mjeri individualnu komponentu valne duljine fluorescentnih emisija uzorka ozračenog rendgenskim zrakama [39].

Izmjereni kemijski sastav osnovnog materijala i metala zavara prikazani su u tablici 31.

Tablica 31. Prikaz kemijskog sastava metala zavara i osnovnog materijala legure Hastelloy C-22

Kemijski element	Udio kemijskog elementa, %	
	Metal zavara	Osnovni materijal
Cr	21,46	19,16
Mn	0,33	0,35
Fe	3,85	3,84
Co	1,1	0,91
Ni	57,02	59,48
Mo	13,56	13,14
W	2,68	2,68
Cu	-	0,4
Nb	-	0,044

## 8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je odrediti parametre potrebne za TIG zavarivanje sučeljenog spoja legure nikla Hastelloy C-22 uz primjenu plinske mješavine argon – helij. Na temelju proučene literature može se zaključiti da:

- Specifičnost zavarljivosti legura nikla je sklonost prema vrućim pukotina, najčešće u području metala zavara. Najčešći izvor problema nastanka vrućih pukotina su nečistoće poput sumpora i fosfora zato što stvaraju nisko-taljive spojeve. Temperatura tališta im je 600–660 °C, dok je temperatura tališta legure Hastelloy C-22, 1325-1370 °C. Prilikom hlađenja metala zavara, materijal se počne hladiti (stezati) dok su te nečistoće još u rastaljenom stanju. To dovodi do negativnog utjecaja na čvrstoću materijala i dolazi do pukotina.
- Najvažniji zahtjev prilikom zavarivanja legura nikla jest čistoća, a to znači da područje pripreme spoja mora biti bez prisustva masti, ulja, prašine. U protivnom će nastati pogreške u zavarenom spoju. Za razliku od zavarivanja nehrđajućih čelika, ne mogu se koristiti dodatni materijali s dodatkom delta-ferita kako bi smanjili sklonost prema toplim pukotinama.
- Visok unos topline prilikom zavarivanja dovodi do trajnog pogrubljenje zrna, smanjenju žilavosti i nepovoljnim metalurškim strukturama. Zbog toga je potrebno kontrolirati unos topline i ograničiti ga na maksimalno 15 kJ/cm. Također, obavezno je ograničiti međuprolaznu temperaturu koja ne smije prelaziti 100 °C. Zavare je potrebno izvoditi relativno brzo. Brzina zavarivanja mora iznositi minimalno 60 mm/min te do optimalnih 80 mm/min. Jakost struje zavarivanja najčešće je u rasponu od 90 – 120 A.
- Kao zaštitni plin pri TIG zavarivanju legura nikla najčešće se koristi čisti argon ili mješavina argon/helij. Prednosti argona u odnosu na helij su: manja energija ionizacije koja omogućava lakšu uspostavu i održavanje električnog luka, stabilniji električni luk, manji protok plina i manja cijena. Budući da helij ima veću energiju ionizacije u odnosu na argon, napon električnog luka pri zavarivanju mora biti veći i samo uspostavljanje luka je teže. Prednost helija u odnosu na argon jest ostvarivanje veće energije električnog luka, što je prednost pri zavarivanju debljih materijala velike toplinske vodljivosti.

- Primjenom helija kao zaštitnog plina u odnosu na argon postiže se veća širina i dubina zavara što omogućuje veće brzine zavarivanja. Veće brzine zavarivanja ujedno znače i veću produktivnost.

Na temelju provedenih ispitivanja u eksperimentalnom dijelu rada moguće je zaključiti sljedeće:

- Mjerenjem penetracije na probnim uzorcima ustanovljeno je da s porastom jakosti struje raste i napon zavarivanja za obje vrste zaštitnih plinova. Vrijednost napona zavarivanja je veća kod plinske mješavine 50 % Ar i 50 % He za istu vrijednost jakosti struje u odnosu na čisti argon. Postotno povećanje vrijednosti napona pri istim strujama zavarivanja jakosti 130 A i 180 A iznosi 9 – 10 % i veće je u odnosu na postotno povećanje pri jakost struje od 80 A koje iznosi 3 %.
- S povećanjem jakosti struje, raste i širina zavara za obje vrste zaštitnih plinova. Prolazi koji su izvedeni s plinskom mješavinom 50 % argon i 50 % helij imaju veću širinu i dubinu pri istoj jakosti struje u odnosu na one izvedene s plinskom mješavinom čistog argona.
- Parametri zavarivanja korijenskog prolaza i priprema spoja nisu bili optimalno određeni što je rezultiralo lošim korijenskim prolazom koji je morao biti naknadno popravljen. Struja zavarivanja korijenskog prolaza iznosila je 80 A, što se pokazalo nedostatnom za potpunu penetraciju korijena. Također, priprema spoja nije sadržavala visinu grla žlijeba što bi olakšalo izvedbu korijenskog prolaza.
- Parametri zavarivanja prolaza popune su pravilno odabrani. Tijekom zavarivanja električni luk je bio stabilan s pravilnom raspodjelom taline. Što je rezultiralo pravilnim zavarima ravnomjernog i jednoličnog izgleda.
- Zavarivanjem legure Hastelloy C-22 uz primjenu odabranih parametara zavarivanja dobivena je pravilna geometrija zavarenog spoja u području od lica zavara do područja korijenskog prolaza. Područje korijenskog prolaza, odnosno lice korijena zavara ima nepravilan oblik, odnosno preveliku širinu, što je posljedica popravka korijenskog prolaza.
- Područje metala zavara ima negativniji korozijski potencijal (-430 mV) od područja osnovnog materijala (-296 mV) u odnosu na , što znači da se područje metala zavara brže otapa od osnovnog materijala u 3,5 %-tnoj otopini NaCl.
- Područje zavara ima manju vrijednost polarizacijskog otpora ( $7,62 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$ ) u odnosu na područje osnovnog materijala ( $46,88 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$ ). Područje osnovnog

materijala pokazuje veću otpornost prema 3,5 %-tnoj otopini NaCl-a u odnosu na područje metala zavara.

- Brzina korozije područja metala zavara iznosi 0,3845 mm/god u 3,5 %-tnoj otopini NaCl-a, što je veće u odnosu na područje metala zavara čija brzina korozije iznosi 0,007821 mm/god.
- Područje metala zavara i osnovnog materijala pokazuje odličnu otpornost prema rupičastoj koroziji prema dijagramu cikličke polarizacije.

Na kraju se može donijeti zaključak da je za TIG zavarivanje legure nikla Hastelloy C-22 u normalnim okolnostima prikladniji zaštitni plin argon zbog niže cijene i bolje stabilnosti električnog luka u odnosu na plinsku mješavinu argon - helij. Međutim, glavni nedostatak konvencionalnog pristupa TIG postupka zavarivanja kada se koristi čisti argon je niska produktivnost koja se može povećati primjenom plinske mješavine argon – helij jer omogućuje veće brzine zavarivanja. Zbog toga, mješavina argon – helij, pogodna je za postupke mehaniziranog, automatiziranog i robotiziranog TIG zavarivanja legure nikla Hastelloy C-22 visokim brzinama zavarivanja.

## LITERATURA

- [1] Filetin T., Kovačiček F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [2] Dupont JN, Lippold JC, Kiser SD. Welding Metallurgy and Weldability of Nickel Base Alloys. Hoboken, NJ: Wiley and Sons, Inc; 2009.
- [3] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/zavar/nikl.html>, dostupno 27.2.2019.
- [4] PD CEN ISO/TR 15608:2017
- [5] <http://www.weldingengineer.com/ASME%20P-Numbers.htm>, dostupno 27.2.2019.
- [6] J.C.M. Farrer: The Alloy Tree: A Guide to Low-Alloy Steels, Stainless Steels, and Nickel-base Alloys, CRC Press, 2004.
- [7] <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/ni/spojevi.html>, dostupno 27.2.2019.
- [8] <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/85/>, dostupno 27.2.2019.
- [9] <https://sciencing.com/objects-made-out-nickel-8593586.html>, dostupno 1.3.2019.
- [10] Radić, Jurica: Mikrostrukturna analiza zavarenog spoja Ni-Cu legure, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [11] Schütze M., Roche M., Bender R.: Corrosion Resistance of Steels, Nickel Alloys, and Zinc in Aqueous Media: Waste Water, Seawater, Drinking Water, High-Purity Water, John Wiley & Sons, 2015.
- [12] John L. Everhart P. E.: Engineering Properties of Nickel and Nickel Alloys, Springer US, 1971.
- [13] G2.1M/G2.1:2012, Guide for the joining of wrought nickel-based alloys, American Welding Society.
- [14] [www.niwire.com/uploads/documents/Alloy%20C-22.pdf](http://www.niwire.com/uploads/documents/Alloy%20C-22.pdf), dostupno 1.3.2018.
- [15] <https://www.hpalloy.com/htmlpages/hpalloysbrochure.html>, dostupno 1.3.2018.
- [16] <https://www.corrosionmaterials.com/alloys/alloy-22/>, dostupno 1.3.2018.
- [17] I. Juraga, V. Alar, I. Stojanović: [17], Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, FSB, Zagreb, 2014.
- [18] Alar, Vesna: Kemijska postojanost metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [19] Durning E.D., Corrosion atlas: A collection of illustrated case histories, Elsevier Science, Amsterdam, 1997.
- [20] [www.haynes.ch/doc/haynes/c22\\_h2019.pdf](http://www.haynes.ch/doc/haynes/c22_h2019.pdf), dostupno 1.3.2019.



- [21] John C. Lippold, *Welding Metallurgy and Weldability*, Wiley, 2015.
- [22] Juraga Ivan, Ljubić Kruno, Živčić Milan, Garašić Ivica: *Pogreške u zavarenim spojevima*, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2015.
- [23] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hot-cracking>, dostupno 4.3.2018.
- [24] Lukačević, Z.: *Zavarivanje*, Sveučilište Josip Juraj Strossmayer, Strojarski fakultet u Slavenskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [25] *Weld Imperfections and Preventive Measures*, Kobelco, Kobe steel, ltd, 2015.
- [26] O'Brien Annette: *Welding Processes, Part 1*, American Welding Society, 2004.
- [27] K. Weman: *Welding processes handbook*, 2<sup>nd</sup> Edition, Woodhead Publishing Ltd, 2012.
- [28] Larry F. Jeffus: *Welding, Principles and Applications*, 8<sup>th</sup> edition, Cengage Learning, 2017.
- [29] S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić: *Zavarivački i srodni postupci*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [30] Grbin, M., Kovačević, B., Živčić, M.: *Elektrolučno zavarivanje u zaštiti plinova*, UNIMEX, d.o.o., Zagreb, 1996.
- [31] <https://cdn.sparkfun.com/assets/b/7/3/d/a/521e6ed1757b7fcc778b456a.png>, dostupno 10.3.2018.
- [32] Edward Bohnart: *Welding, Principles and Practices* 5<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill Education, 2 Penn Plaza, New York, 2018.
- [33] I. Garašić: *Zavarivanje u plinskoj zaštiti*, Predavanja iz kolegija: *Zavarivanje i montaža*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2010.
- [34] Stojanović I., *Utjecaj tehnoloških parametara na zaštitna svojstva vodorazrjeditivih premaza*, doktorski rad, FSB Zagreb, 2011.
- [35] <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/tig/magicwave/magicwave-2200>, dostupno 23.4.2019.
- [36] Babić, Nikola: *A-TIG zavarivanje duplex čelika*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [37] I. Garašić: *TIG zavarivanje*, Predavanja iz kolegija: *Zavarivanje i montaža*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2010.
- [38] <https://www.azom.com/equipment-details.aspx?EquipID=1335>, dostupno 25.5.2019.
- [39] <http://www.renacon.com/Tehnologija/XRF.html>, dostupno 25.5.2019.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc