

# Utjecaj aditivne proizvodnje električnik lukom i žicom na svojstva legure Inconel 625

---

Špehar, Jelena

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:756522>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-10**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Jelena Špehar**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Jelena Špehar

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na stručnom vođenju i korisnim savjetima prilikom izrade završnog rada.

Posebno zahvaljujem asistentu Ivanu Juriću mag. ing. mech. na velikoj pomoći, strpljenju i razumijevanju tijekom izrade ovog rada

Također zahvaljujem se prof. dr. sc. Vesni Alar na korisnim savjetima i pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rad.

Na posljétku zahvaljujem se prijateljima, kolegama i posebno svojoj obitelji na pruženoj podršci tijekom studiranja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

**JELENA ŠPEHAR**

Mat. br.: **0035197960**

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**UTJECAJ ADITIVNE PROIZVODNJE ELEKTRIČNIM LUKOM I  
ŽICOM NA SVOJSTVA LEGURE INCONEL 625**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**INFLUENCE OF WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING  
ON PROPERTIES OF INCONEL 625 ALLOY**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je opisati legure nikla s posebnim naglaskom na leguru Inconel 625. Navesti osnove karakteristike legure Inconel 625 te područja primjene u industrijskoj praksi. Posebno naglasiti korozivna svojstva navedene legure te opisati osnovne metode ispitivanja korozivne postojanosti. Ukratko opisati postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom te analizirati primjenjivost navedenog postupka za legure nikla.

U eksperimentalnom dijelu usporediti korozivna svojstva materijala Inconel 625 u isporučenom stanju te istog materijala izrađenog aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom. Utvrditi razlike u kemijskom sastavu između uzoraka. Konačno dati zaključak o primjenjivosti aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom za leguru Inconel 625.

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

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Zadatak zadao:

Rok predaje rada:

**1. rok: 22. veljače 2019.**

**2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.**

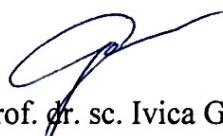
**3. rok: 20. rujna 2019.**


Predviđeni datumi obrane:

**1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.**

**2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.**

**3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.**

  
Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	III
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	1
2. NIKAL I NIKLOVE LEGURE .....	2
2.1. Nikal.....	2
2.2. Legure nikla.....	3
2.2.1. Korozijska otpornost niklovih legura.....	5
2.2.2. Zavarljivost nikla i niklovih legura.....	6
2.3. Inconel 625 .....	7
2.3.1. Korozijska otpornost legure Inconel 625 .....	9
2.3.2. Primjena legure Inconel 625.....	10
3. ADITIVNA PROIZVODNJA .....	12
3.1. Aditivna proizvodnja električnim lukom (WAAM) .....	12
4. ELEKTROKEMIJSKA KOROZIJSKA ISPITIVANJA .....	18
4.1. Elektrokemijska korozijska ispitivanja istosmjernom strujom .....	18
4.1.1. Postupak određivanja potencijala otvorenog strujnog kruga.....	19
4.1.2. Određivanje polarizacijskog otpora $R_p$ .....	20
4.1.3. Tafel ekstrapolacija .....	21
4.2. Elektrokemijska korozijska ispitivanja naizmjeničnom strujom.....	23
4.2.1. Elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS) .....	23
4.2.2. Elementi ekvivalentnog kruga.....	24
4.2.3. Randelsov ekvivalentni električni krug.....	24
5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA .....	27
5.1. Analiza kemijskog sastava .....	29
5.2. Elektrokemijsko ispitivanje istosmjernom strujom .....	30
5.2.1. Određivanje potencijala otvorenog kruga $E_{kor}$ .....	32
5.2.2. Određivanje polarizacijskog otpora $R_p$ .....	34
5.2.3. Tafelova ekstrapolacija .....	35
6. ZAKLJUČAK.....	39
7. LITERATURA .....	40

**POPIS SLIKA**

Slika 3.1 Prikaz osnovnih parametara zavarivanja na primjeru zavara[13] .....	13
Slika 3.2 Načini upravljanja zavarivanjem[14].....	14
Slika 3.3 Faze aditivne proizvodnje zavarivanjem [17] .....	15
Slika 3.4 Shematski prikaz zavarivanja aditivnom tehnologijom (WAAM)[19] .....	17
Slika 3.5 Primjeri dijelova izraženih WAAM tehnologijom ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Slika 4.1 Elektrokemijska ćelija za korozijska ispitivanja[21] .....	19
Slika 4.2 Potencijal otvorenog strujnog kruga[21].....	20
Slika 4.3 Određivanje polarizacijskog otpora $R_p$ [21] .....	20
Slika 4.4 Prikaz krivulje Tafelove ekstrapolacije[21] .....	23
Slika 4.5 Prikaz impedancijskih jednadžbi za elemente ekvivalentnog električnog kruga [23] .....	24
Slika 4.6 Randlesov krug [23].....	24
Slika 4.7 Nyquistov dijagram za jednostavni elektrokemijski sustav .....	25
Slika 4.8 Bodeov dijagram jednostavni elektrokemijski sustav.....	26
Slika 5.1 Prikaz uzoraka nakon brušenja površine .....	28
Slika 5.2 Uzorci pripremljeni za ispitivanje .....	28
Slika 5.3 XRF analizator Innov - X Systems .....	29
Slika 5.4 Prikaz elektrokemijskog ispitivanja.....	32
Slika 5.5 Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga $E_{kor}$ za Uzorak 1 .....	33
Slika 5.6 Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga $E_{kor}$ za Uzorak 2 .....	33
Slika 5.7 Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga $E_{kor}$ za Uzorak 3 .....	34
Slika 5.8 Tafelova ekstrapolacija, Uzorak 1 .....	35
Slika 5.9 Tafelova ekstrapolacija, Uzorak 2 .....	36
Slika 5.10 Tafelova ekstrapolacija, Uzorak 3 .....	37
Slika 5.11 Tafelova ekstrapolacija za sva tri uzorka .....	38

**POPIS TABLICA**

Tablica 1 Svojstva Nikla [2, 3] .....	3
Tablica 2 Podjela niklovih legura[6] .....	4
Tablica 3 Mehanička svojstva legure Inconel 625 pri sobnoj temperaturi [9] .....	8
Tablica 4 Kemijski sastav legure Inconel 625[10] .....	9
Tablica 5 Brzina korodiranja legure Inconel 625 u različitim medijima[4] .....	10
Tablica 6 Prikaz materijala koji se koriste u aditivnoj proizvodnji [12] .....	15
Tablica 7 Kemijski sastav za Uzorak 1, legura 59 .....	30
Tablica 8 Kemijski sastav Uzorka 2, Inconel 625, Ar 5.0. ....	30
Tablica 9 Kemijski sastav Uzorka 3, Inconel 625, Inoxline H5 .....	30
Tablica 10 Podaci za izračun ekvivalentne mase $E_w$ za uzorke 1,2 i 3 .....	31
Tablica 11 Iznos potencijala otvorenog strujnog kruga $E_{kor}$ za Uzorke 1, 2 i 3 .....	34
Tablica 12 Rezultati dobiveni linearnom polarizacijom za Uzorak 1 .....	35
Tablica 13 Rezultati dobiveni linearnom polarizacijom za Uzorak 2 .....	35
Tablica 14 Rezultati dobiveni linearnom polarizacijom za Uzorak 3 .....	35
Tablica 15 Rezultati Tafelove ekstrapolacije za Uzorak 1 .....	36
Tablica 16 Rezultati Tafelove ekstrapolacije za Uzorak 2 .....	36
Tablica 17 Rezultati Tafelove ekstrapolacije za Uzorak 3 .....	37



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
2D	-	Dvodimenzionalno
3D	-	Trodimenzionalno
A <sub>5</sub>	%	Istezljivost
AC	-	Izmjenična struja
Ag	-	Srebro
Al	-	Aluminij
Bi	-	Bizmut
C	-	Ugljik
<i>c</i>	J/kgK	Spec. toplinski kapacitet
CAD	-	Computer Aided Design
CNC	-	Computer Numerical Control
CO	-	Ugljikov (II) oksid
Co	-	Kobalt
Cr	-	Krom
Cu	-	Bakar
DC	-	Istosmjerna struja
<i>E</i>	Mpa	Modul elastičnosti
<i>E<sub>ef</sub></i>	-	unos topline
<i>E<sub>kor</sub></i>	mV	Korozijski potencijal
<i>E<sub>ok</sub></i>	mV	Potencijal otvorenog strujnog kruga
Fe	-	Željezo
HB	-	Tvrdoća po Brinellu
Hg	-	Živa
<i>I</i>	A	jakost struje
<i>j</i>	μA/cm <sup>2</sup>	gustoća struje
KOH	-	Kalijev Hidroksid
MAG	-	Metal Active Gass
MIG	-	Metal Inert Gass
Mn	-	Mangan
Mo	-	Molibden
N	-	Dušik
NaOH	-	Natrijev hidroksid
Nb	-	Niobij
Ni	-	Nikal
O	-	Kisik
Pb	-	Olovo
<i>R<sub>m</sub></i>	MPa	Vlačna čvrstoća
<i>R<sub>p</sub></i>	kΩcm <sup>2</sup>	Polarizacijski otpor
<i>R<sub>p0,2</sub></i>	MPa	Konvencionalna granica
S	-	razvlačenja
Si	-	Sumpor

---

$\beta a$	V/decade	Silicij
$\beta k$	V/decade	Nagib anodnog pravca
STL	-	Nagib katodnog pravca
Ti	-	Stereolithography
TIG	-	Titanij
$U$	V	Tungsten Inert Gas
$v$	mm/s	napon električnog luka
W	-	brzina
WAAM	-	Volfram
$\alpha$	$10^{-6}/K$	Wire ARC Additive Manufacturing
$\lambda$	W/mK	Koeficijent linearnog istezanja
$\rho$	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Koeficijent toplinske vodljivosti Specifični toplinski otpor

**SAŽETAK**

Tema ovog rada je ispitivanje utjecaja aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (WAAM) na korozijsku otpornost niklove legure Inconel 625.

U prvom dijelu rada obrađene su niklove legure i njihova mehanička i kemijska svojstva. Poseban naglasak stavljen je na leguru Inconel 625 te je navedena najčešća primjena istih.

Opisana je aditivna proizvodnja sa naglaskom na postupke zavarivanja (navarivanja) električnim lukom i žicom (WAAM) . Također opisani su osnovni postupci ispitivanja korozijske postojanosti materijala.

U eksperimentalnom dijelu rada ispitan je kemijski sastav i korozijska postojanost jednog uzorka u izvornom stanju, i dva uzorka izrađena aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom (WAAM) iz legure Inconel 625.

Ključne riječi: Inconel 625, aditivna proizvodnja, WAAM, korozija

---

**SUMMARY**

The topic of this thesis is testing the influence of additive production with arc and wire (WAAM) on the corrosion resistance of Inconel 625.

The first part of the thesis includes an overview of nickel alloys and their mechanical and chemical characteristics. Particular emphasis was placed on nickel alloy Inconel 625, and it is described the most common application. Furthermore, it is made an overview of additive manufacture with an emphasis on arc welding (WAAM) and basic procedures of testing the corrosion resistance of materials.

The experimental part of the thesis is testing chemical composition and corrosion resistance of one sample in its origin state, as well as two samples made with additive production with electric arc and wire (WAAM).

Key words: Inconel 625, additive manufacturing, WAAM, corrosion

## **1. UVOD**

Nikal i niklove legure čine veliku skupinu konstrukcijskih metala koji pronalaze veliku primjenu u raznim granama industrije. Zbog svojih iznimnih svojstava kao što su dobra mehanička svojstva i dobra korozijska otpornost, legure nikla jedan su od materijala koji može zadovoljiti gotovo sve zahtjeve koje industrija zahtjeva.

Unutar posljednjih 50 godina velika se pažnja pridaje istraživanju novih materijala i mnogo je vremena utrošeno u razvoj, kako bi se nastojala dobiti što otpornija legura koja bi zadovoljila sve veće zahtjeve za korozijskom otpornošću i traženim mehaničkim svojstvima. S druge strane tokom razvoja mnogo pažnje se pridaje i što boljem razumijevanju i kontroli zavarljivosti legura.

Istovremeno dolazi i do sve većeg razvoja novih, modernijih tehnologija izrade kao što su aditivne tehnologije. Iako aditivna proizvodnja u svijetu industrije nije novi pojam, sve se više uviđaju novi načini primjene i mogućnost primjenjivost za nove materijale. Danas aditivnu proizvodnju možemo koristiti u kombinaciji s velikim brojem materijala kao što su polimeri, metali, keramike i sl. Napretkom računalne tehnologije, razvojem suvremenih alata te modernizacijom inženjerske prakse razvijaju se i novi načini izrade prototipa u svrhu povećanja točnosti, proizvodnosti i povećanja kvalitete izratka.

Primjena aditivne proizvodnje u zavarivanju je područje koje se razvija velikom brzinom, a legure nikla uz legure titanija čine jednu od najčešće korištenih skupina metala u ovoj vrsti zavarivanja. Aditivna proizvodnja podrazumijeva proizvodnju slaganjem sloj po sloj, suprotno konvencionalnim metodama obrade gdje se od osnovnog materijala odvajaju čestice kako bi se dobio konačan izradak. Niklove legure zbog svoje slabije obradivosti odvajanjem čestica čine idealnog kandidata za aditivnu proizvodnju.

Niklova legura koja se najčešće koristi u aditivnoj proizvodnje je Inconel 625, a u ovom radu prikazan je utjecaj aditivne proizvodnje na korozijsku postojanost upravo ove legure.

## 2. NIKAL I NIKLOVE LEGURE

Pored česte upotrebe u zrakoplovstvu, brodogradnji, automobilskim i plinskim turbinama, nikal i njegove legure sve se češće koriste i u svemirskim letjelicama, raketnim motorima, nuklearnim reaktorima, podmornicama, parnim elektranama, te u petrokemijskoj industriji i u drugim industrijama u kojima su dijelovi izloženi visokim temperaturama. [1]

### 2.1. Nikal

Nikal je element mehaničkim i magnetskim svojstvima vrlo sličan željezu. Svojstva po kojima se nikal ističe su antikorozivnost, vatrootpornost, čvrstoća na visokoj temperaturi, dobra otpornost puzanju, te dobro provođenje topline i električne energije. Zbog spore oksidacije na zraku, nikal se smatra korozijski postojanim materijalom i zbog toga se preko 10 % ukupne godišnje proizvodnje nikla koristi za postupke platiniranja. Većina proizvodnje nikla odnosi se na niklove legure (oko 60 %), dio na superlegure, a dio na kemijsku primjenu (3 %). Nikal pri sobnoj temperaturi ima feromagnetična svojstva, što ga svrstava u rijetku skupinu od četiri elementa s tim obilježjem (željezo, kobalt, gadolinium i nikal). Pri sobnoj temperaturi nikal je otporan na djelovanje atmosferskih plinova, halogenih elemenata i fosfora. S kisikom tvori niklov (II)-oksid, a zagrijan s vodenom parom daje niklov (I)-oksid uz oslobađanje vodika. Iako njegova mehanička svojstva opadaju iznad 800 °C, za nikal se može reći da je postojan u vrućim oksidirajućim plinovima do 1000 °C. Praškasti nikal je piroforan te je zapaljiv pri zagrijavanju na zraku. Vrlo je otporan prema lužinama, a u neoksidirajućim kiselinama se vrlo sporo otapa. Koncentrirana dušična kiselina pasivizira površinu, ali dugotrajnijim djelovanjem dolazi do postupnog otapanja.[2]

U Tablica 1 prikazana su osnovna fizikalna i kemijska svojstva nikla.

Tablica 1 Svojstva Nikla [2, 3]

SVOJSTVO	MJERNA JEDINICA	VRIJEDNOST
Atomski broj	-	28
Atomska masa	g/mol	58,71
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	8908
Talište	°C	1455
Vrelište	°C	2913
Toplina taljenja	kJ/mol	17,48
Toplina isparavanja	kJ/mol	377.5
$\alpha$ - Koeficijent linearnog istezanja (0 °C-100 °C)	10 <sup>-6</sup> /K	13,3
$\lambda$ -Koeficijent toplinske vodljivosti (0 °C - 100 °C)	W/mK	0,088
$c$ - Spec. toplinski kapacitet (0 °C - 100 °C)	J/kgK	0,46
$\rho$ - Specifični toplinski otpor (20 °C)	$\Omega$ mm <sup>2</sup> /m	0,068
$E$ - Modul elastičnosti (20 °C)	MPa	224000

## 2.2. Legure nikla

Nikal se najčešće upotrebljava kao legirajući metal pri proizvodnji nehrđajućih i vatrootpornih čelika, te za dobivanje mnogobrojnih jednokomponentnih i višekomponentnih legura koje se odlikuju antikorozivnim, vatrootpornim, električnim, termoelektričnim i magnetskim svojstvima.[4]

Legure na bazi nikla jedna su od najvažnijih skupina materijala u inženjerstvu zbog svoje široke primjene. Ove legure otporne su na koroziju pri uvjetima visoke temperature, ali i visoke vlage. Imaju veliku čvrstoću pri sobnim i visokim temperaturama, dobru duktilnost i žilavost pri nižim temperaturama, dobra električna svojstva i mnoga druga, ovisno o primjeni. Kod zavarivanja, niklove legure kao dodatni materijal, nude svojstva u zavarenom stanju kakva se ne mogu dobiti niti s jednom drugom skupinom materijala. Naime, uz prisustvo određenih legiranih elemenata moguće je postići razrijeđenost a da se pritom zadrži čvrstoće i duktilnosti u rasponu od kriogenih temperatura do temperatura blizu solidusa. [5]

U Tablica 2 prikazana je osnovna podjela niklovih legura prema sadržaju legiranih elemenata.

**Tablica 2 Podjela niklovih legura[6]**

Skupina		Trgovački naziv (proizvođač)
1.	Nikal-bakar	Monel ( Inco Alloys)
	Nikal- krom	Nimonic (Inco Alloys)
2.	Nikal - molibden - krom	Hastelloy (Haynes)
3.	Nikal - krom – molibden - željezo	Inconel (Inco Alloys)
	Nikal – željezo - krom	Incoloy (Inco Alloys)
4.	Nikal – krom +	Aluminij - titanij
		Kobalt – volfram - željezo
		Ugljik
		Superlegure

Skupina Ni- Cr-Mo legura koriste se za zavarivanje 9% Ni kako bi se postigla izvrsna čvrstoća i žilavost čak i na temperaturama tekućeg dušika . Legure Ni-Fe primjenjuju se kod industrijske proizvodnje energije gdje se koriste za različite zavare ugljičnih čelika i austenitnih nehrđajućih čelika iz razloga što osiguravaju dobar prijelaz koeficijenta toplinskog širenja pri visokim temperaturama. U odnosu na čelike, legure nikla mogu se koristiti u rasponu od vrlo niskih temperatura pa do onih koje se približavaju 1200 °C jer matrice krute otopine legure ostaju austenitne od procesa očvršnuća sve do temperature apsolutne nule. [5]

Niklove legure su prvi put uvedene u komercijalnu upotrebu u kasnom dvadesetom stoljeću i od tad su razvijene do visoke razine sofisticiranosti.

Danas je raspon legura na bazi nikla vrlo širok i može se pronaći vrsta otporna na gotovo svaku vrstu korozije. Legure 200 i 201 pronalaze primjenu u industriji proizvodnje i prerade kiselina kao što su NaOH i KOH. U ovom slučaju nikal je legirajući element koji daje otpornost na nastanak pukotina zbog napetosne korozije u čistim kiselinama. Za razliku od nehrđajućih čelika, niklove legure koje sadrže više od 42% nikla gotovo su imune na kloridne ione.[5]

Precipitacijski očvršćivane legure nikla 300 i 301 zbog svoje se velike statičke i dinamičke čvrstoće te toplinske vodljivosti primjenjuju u izradi kalupa i dijelova za hidrauličke preše. Legure Ni-Cu (Monel skupina) često se koriste kod primjene u morskoj vodi, u industriji proizvodnje sol i generalno u situacijama u kojima se zahtijeva otpornost na kiseline. Povećanjem udjela bakra u niklovoj leguri povećava se otpornost legure na reducirajuće kiseline, ali niti nikal niti bakar ne pružaju otpornost oksidaciji i oksidacijskim kiselinama.



Precipitacijski očvrsnute Ni-Cu legure K-500 i K-501 primjenjuju se za torzijski opterećena vratila te u primjeni koja zahtjeva otpornost na morsku atmosferu. Legure Ni – Cr koje sadrže željezo, kobalt i aluminij primjenjuju se na temperaturama do 1150 °C zbog svoje iznimne oksidacijske otpornosti i otpora puzanja. Ostale Cr- Ni legure koje sadrže Mo i W su iznimno otporne na jamičastu i pukotinsku koroziju. [5]

Superlegure su višekomponentni sustavi na temelju nikla i kobalta s visokim udjelom kroma i manjim udjelima molibdena, volframa, titana i aluminijskih[4]. Njihova se mehanička svojstva postižu otapanjem legiranih elemenata u kristalima matrice i precipitacijom intermetalnih spojeva i karbida raspoređenih u austenitnoj matrici. Na očvršćivanje najjače djeluje kobalt, ali tek kada je njegov udio iznad 16%. Na precipitacijsko očvršćivanje djeluju: molibden stvaranjem Mo<sub>6</sub>C; krom stvaranjem Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>; aluminij i titan stvaranjem koherentnih  $\gamma'$  – faza (Ni<sub>3</sub>Al) i nekoherentnih  $\eta$  - faza (Ni<sub>3</sub>Ti); niobij, tantal i vanadij stvaranjem karbida[6]

### **2.2.1. Korozijska otpornost niklovi legura**

Prerađene niklove legure često se klasificiraju kao korozijski otporne ili toplinski otporne legure. Ova podjela razlikuje se ovisno o primjeni, odnosno o tome je li legirni sastav i mikrostruktura optimizirana za otpornost na koroziju u vodi ili na upotrebu pri povišenim temperaturama. Legure otporne na toplinu kasnije mogu biti svrstane prema tome jesu li osmišljene za otpornost na koroziju u vrućim i agresivnim atmosferama ili za optimalnu čvrstoću i metaluršku stabilnost. U praksi mnoge legure zadovoljavaju više navedenih svojstava u isto vrijeme. Na primjer legura Inconel 718 otporan je na koroziju u organskim kiselinama, lužinama, solima, a time i u morskoj vodi. Također otporan je na visoku temperaturu oksidacije, karburizacije i nitriranja, a osigurava i visoku čvrstoću na temperaturama do 700 °C. Kao rezultat svega toga leguru 718 može se smatrati korozijski i toplinski otpornom legurom ili vrlo učinkovitom superlegurom. Prva legura nikal koja se počela koristiti radi korozijske otpornosti bila je legura Monel 400 (N04400) koja je razvijena 1905.godine. [4]

### 2.2.2. Zavarljivost nikla i niklovih legura

Zavarljivost nikla i njegovih legura u pravilu je vrlo dobra, ali neke od mogućih poteškoća koje se mogu javiti prilikom zavarivanja su [3]:

- Tople pukotine - mogu biti posljedica prisutnosti elemenata kao što su S, Pb, P, Bi i drugih niskotaljivih elemenata. Nečistoće ovih elemenata s površine prodiru u unutrašnjost strukture i uzrokuju pojavu pukotina. Kako bi se smanjila vjerojatnost pojave toplih pukotina potrebo je odmastiti i očistiti rubove četkama od nehrđajućeg austenitnog čelika u području oko 25mm od svake strane zavara jer u toj zoni dolaziti do zagrijavanja prilikom zavarivanja.
- Poroznost - uzrokovana je prisustvom plinova: H, O, N, CO. Mjere koje mogu pomoći pri sprječavanju pojave poroznosti su održavanje čistoće rubova, zaštitnog plinom te održavanje kratkog luka prilikom zavarivanja.
- Oksidni sloj – budući da Ni ima višu točku taljenja od oksidnog sloja može doći do pojave oksidnih uključaka u zavaru. Debeli sloj oksida stvara se pri zavarivanju ili toplinskoj obradi. Prije zavarivanja preporuča se odstranjivanje oksida sa površine postupcima brušenja, pjeskarenja ili kemijskog nagrizanja kiselinama.

Zavarivanje Ni i Ni legura je moguće svim postupcima koji se koriste i za čelike. Više pažnje treba posvetiti prilikom zavarivanja onih legura koje su očvrsnute toplinskom obradom. Otvor žlijeba treba biti malo veći, jer se rastaljena Ni legura ne širi i ne vlaži rubove kao u slučaju zavarivanja čelika.

Čistoća materijala pri zavarivanju i toplinskoj obradi veoma je važna, stoga obrada smije započeti tek nakon temeljitog čišćenja površine od prljavština. Ni legure su osjetljive na prisustvo S, P, Cl, Bi, Pb i nekih drugih niskotaljivih materijala. Budući da su ovi elementi često prisutni u ulju, mastima, bojama, sredstvima za obilježavanje (markeri), uljima za hlađenje pri obradi odvajanjem čestica, radioničkoj prašini, potrebno je potpuno očistiti sve površine, koje će biti zavarivane.

Nakon zavarivanja, trosku je potrebno pažljivo očistiti, posebno ako se zavaruje na visokim temperaturama, jer se u troski nakuplja sumpor. Također, kod zavarivanja legura koje očvršćuju naknadnom termičkom obradom, stvaraju se oksidi s visokom temperaturom taljenja, pa ove

oksida treba pažljivo očistiti kako ne bi došlo do pojave uključaka oksida.

Masnoće i prljavštinu s površina rubova koji se zavaruju kao i sa žice dodatnog materijala treba odstraniti alkoholom ili acetonom i brisanjem čistim krpama, koje ne ostavljaju niti. Prljavština sa krpe može uzrokovati pukotine na površini.

Ako je osnovni materijal hladan, preporučuje se zagrijavanje na 20 °C kako bi se izbjegla kondenzacija vlage, koja može uzrokovati poroznost zavara. Ako se radi s velikim unošenjem topline ili visokom temperaturom međuprolaza, a uz slabu zaštitu inertnog plina može doći do stvaranja debelog sloja oksida, koji uzrokuje različite greške i grubu površinu zavara. Unošenje dodatne topline predgrijavanjem međuprolaznom temperaturom i prevelikim toplinskim unosom izvora topline može biti problematično. Bolje je raditi s manjim unošenjem topline. Preveliko unošenje topline može uzrokovati likvaciju, izlučivanje i druge metalurške pojave, koje mogu rezultirati pukotinama na osnovnom materijalu.

Zavarivanje treba provoditi bez predgrijavanja (izuzev u početku za odstranjenje kondenzirane vlage) uz što niži unos topline i ograničenu međuslojnu temperaturu npr. 100 °C. Ako je potrebno, zavar je moguće hladiti vodom.

Dodatni materijal za zavarivanje izabire se prema sastavu i bira se materijal što bliži osnovnom materijalu. Luk treba držati što kraći (1-2mm).

Korijensku stranu zavara treba štititi argonom. Termička obrada se treba provoditi u atmosferi bez sumpora (mazut ili gorivo ulje manje od 0,2%, a plin manji od 0,2 g na m<sup>3</sup>). [3]

### **2.3. Inconel 625**

Kada je riječ o učestalosti primjene, legura Inconel 625 jedna je od vodećih niklovihi legura iz skupine Inconel, a za to postoji i vrlo dobar razlog. Ne događa se često da legura visokih performansi ostane tako dugo u primjeni u tolikom broju industrija, a da ju pritom ne zamijeni neki novi materijal boljih specifikacija. Međutim Inconel 625 taj status zadržava godinama i ostaje standardni konstrukcijski materijal koji iznova pronalazi svoju primjenu u velikom broju situacija.

Inconel 625 razvijen je početkom 1960ih godina, a postao je često primjenjiv zahvaljujući svojoj svestranosti i mogućnosti višestruke primjene. Više od pola stoljeća kasnije i dalje zadržava svoj status jer inženjeri iznova pronalaze nove načine primjene. Za razliku od samih početaka kada je ova legura služila prvenstveno u primjeni kod vrlo opterećenih parnih

cjevovoda, danas je ta primjena puno šira. Kroz vrijeme razvoja niklovi legura uvedene su nove metode obrade koje su inženjerima omogućile bolje razumijevanje mogućnosti ove legure. Na primjer, neznatne promjene u njegovom sastavu, kao i poboljšana praksa glodanja, povećali su vijek trajanja tankog lima. Također legura Inconel 625 izvrstan je izbor za zavarivanje i može primiti razrjeđivanje iz drugih sastava, metala punila posebno pogodnim za različito zavarivanje.[4]

Jedinstveni sastav legure Inconel 625 daje poželjna svojstva. To je legura visokog sadržaja nikla (minimalno 58% ukupne smjese). Također sadrži veliku razinu kroma (20-23%). Ovaj omjer nikla i kroma daje izvanrednu razinu otpornosti na koroziju, posebno na oksidirajuće kemikalije. Udio molibdena (8-10%) leguri daje nevjerojatno visoku čvrstoću, te u djelovanju s niklom osigurava otpornost na neoksidirajuću atmosferu. Također, molibden je zaslužan za otpornost na rupičastu i pukotinsku koroziju. Nobij, iako malog udjela služi za stabiliziranje legure na preosjetljivost tijekom zavarivanja. Zajedno svi ovi elementi pomažu u stvaranju čvrstog, otpornog i vrlo obradivog materijala koji je rješenje za mnoge današnje probleme u konstruiranju.[7]

Nikal krom molibden legure poznate su po svojim svojstvima otpornosti puzanju i visoke otpornosti na koroziju zbog čega često pronalazi primjenu u naftnoj i petrokemijskoj industriji. Međutim, zbog svoje visoke cijene alternativni način uporabe je kao Ni obloga na osnovnom materijalu. Legure Ni moguće je nanijeti različitim metodama poput valjanja i eksplozijskog navarivanja. Postupak navarivanja je jednostavan i ne zahtjeva veliku pripremu. Navarivanje se koristi za poboljšanje korozijskih svojstava razne opreme koja se primjenjuje u naftnoj i petrokemijskoj industriji [8]

Osnovna mehanička svojstva legure Inconel 625 prikazane su u Tablica 3 Mehanička svojstva legure Inconel 625 pri sobnoj temperaturi [9]

**Tablica 3 Mehanička svojstva legure Inconel 625 pri sobnoj temperaturi [9]**

<b>Vlačna čvrstoća <math>R_m</math>, MPa</b>	<b>Konvencionlna granica razvlačenja <math>R_{p0,2}</math>, MPa</b>	<b>Istezljivost <math>A_5</math>, %</b>	<b>Tvrdoća po Brinellu , HB</b>
827-1034	414-621	55-30	145-240

U Tablica 4 prikazan je kemijski sastav legure Inconel 625 , odnosno raspon vrijednosti udjela za svaki pojedini element u leguri.

**Tablica 4 Kemijski sastav legure Inconel 625[10]**

ELEMENT	MASENI UDIO, %
Ni	min. 58
Cr	20,0 do 23,0
Fe	maks. 5,0
Mo	8,0 do 10,0
Nb	3,15 do 4,15
C	maks. 0,1
Mn	maks. 0,5
Si	maks. 0,5
P	maks. 0,015
S	maks. 0,015
Al	maks. 0,40
Ti	maks. 0,40
Co	maks. 1,0

Izuzetna čvrstoća legure Inconel 625 dobivena je zahvaljujući učinku očvršnuća elemenata molibdena i niobija u nikal – krom matrici. Zbog toga kod ovih legura nije potrebno precipitacijsko očvršćivanje. Ova kombinacija elemenata odgovorna je i za vrhunsku otpornost na široki raspon korozivnih atmosfera te na pojave pri visokim temperaturama kao što su oksidacija i karburizacija. [10]

### **2.3.1. Korozijska otpornost legure Inconel 625**

Ova legura je gotovo u potpunosti otporna na blaga okruženja kao što su atmosfera, svježa voda, morska voda, neutralne soli i lužnate otopine. U agresivnijim atmosferama, kombinacija nikla i kroma osigurava otpornost na oksidirajuće kemikalije, a kombinacija nikla i molibdena otpornost pri uvjetima snažne redukcije. Također udio molibdena osigurava visoku otpornost na jamičastu i pukotinsku koroziju. Visoki sadržaj nikla osigurava sigurnost od pucanja uslijed napetosne korozije. U 65% dušičnoj kiselini pri temperaturi vrenja Inconel 625 korodira brzinom od 0,76 mm/godina , u 50% otopini natrij hidroksida korodira brzinom 0,13

mm/godina .U tablici su prikazane vrijednosti brzine korodiranja Inconela 625 u još nekim otopinama

**Tablica 5 Brzina korodiranja legure Inconel 625 u različitim medijima[4]**

Koncentracija, %	$v_{kor}$ , mm/god
<b>Sumporna kiselina</b>	
15	0,188
50	0,432
60	0,711
70	1,626
80	2,286
<b>Klorovodična kiselina</b>	
5	1,803
10	2,057
15	1,651
20	1,270
25	0,965
30	0,864

### 2.3.2. Primjena legure Inconel 625

Legura 625 pogodna je za primjenu u vrlo vrućim atmosferama, ali i onima vrlo niskih, kriogenih temperatura. Ova legura posjeduje izvrsnu kombinaciju čvrstoće, otpora puzanju, otpornosti na zamor materijala te izvrsne otpornosti na oksidaciju i na korozijski agresivna sredstva. Zbog svojih dobrih svojstava zavarljivosti i obradivosti omogućena je raznolikost primjene. Više od 50 godina Inconel 625 se široko primjenjuje u zrakoplovstvu, kemijskoj i petrokemijskoj industriji te u brodogradnji. [11]

Također jedna od ključnih primjena Inconela 625 je u industriji rafiniranja goriva gdje prekomjerna korozija može stvarati veliki problem. Prilikom korištenje legure Inconel 625 u proizvodnji bešavnih cijevi sprječava se korozija naftnim kiselinama, pucanje uslijed napetosne korozije i povećava se otpornost na oksidaciju. Korozija u naftnim kiselinama problem je s kojim se suočavaju destilacijski tornjevi rafinerija koji rade u okruženjima visoke temperature

od 220-400 °C, posebno cjevovodima, mlaznicama i koljenima cjevovoda. Dokazano je da legura Inconel 625 daje dobru i dugoročnu otpornost na ovu vrstu korozije u industriji i obično se koristi za proizvodnju tornjeva za destilaciju. Može se koristiti i u nadzemnim kondenzatorima u rafinerijama goriva gdje izbor materijala ovisi o nekoliko različitih faktora, uključujući izvor rashladne vode, količinu klorida, kontrolu pH, brzinu vode itd. Također zbog svoje iznimne otpornosti na pitku i slanu vodu često se koristi u izradi cjevovoda. Cjevovodi mogu biti u cijelosti izrađeni iz ove legure, ali ekonomičnija alternativa je oblaganje cijevi legurom. Isto tako koristi se u izmjenjivačima topline u morskoj vodi i elektranama. Legura 625 pronalazi primjenu i u izradi raznih dijelova koji dolaze u doticaj sa morskom vodom kao što su kablovi za vez, propeleri kod brodova, pogonski motori, oprema za podmornice, ispušni kanali za pomoćne brodove i komponente za oceanografske instrumente. Zahvaljujući visokoj rasteznoj čvrstoći, otporu na puzanje i pucanje i izvrsnoj zavarljivosti, može se koristiti za dijelove zrakoplovnih sustava, ispušnih sustava, sustava za povrat potiska i mnogih drugih tehničkih komponenti. Također primjenjuje se i u nekim nuklearnim postrojenjima, posebno za jezgru reaktora i komponente tlakovodnih nuklearnih reaktora. Legura Inconel 625 je u pogledu upotrebe i razvoja već desetljećima u koraku s vremenom i pruža rješenja čak i za najsuvremenije probleme. Njegova popularnost zasigurno još uvijek ne pokazuje znakove slabljenja.[4]

### 3. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja može se definirati kao proces spajanja materijala u svrhu izrade predmeta iz podataka 3D modela. Ključna karakteristika koja razlikuje aditivnu proizvodnju od konvencionalne je ta što se kod aditivne proizvodnje predmet izrađuje sloj po sloj, a kod konvencionalnih metoda se oduzima materijal od početnog komada. Aditivna proizvodnja se danas primjenjuje za široku paletu materijala, kao što su: polimeri, metali, keramike, kompoziti ali i biološke stanice. Iako se aditivna proizvodnja već dva desetljeća spominje u pogledu obrade materijala, tek se nedavno počela razvijati kao važna komercijalna proizvodna tehnologija.

Neke od osnovnih prednosti aditivne proizvodnje su:

- mogućnost postizanja iznimno komplicirane geometrije koju nije moguće postići niti jednom drugom konvencionalnom metodom proizvodnje ili bi ista bila preskupa.
- mogućnost izrade prototipa prije puštanja proizvoda u masovnu proizvodnju. Na taj se način mogu smanjiti troškovi jer je moguće uočiti eventualne nedostatke i moguće je napraviti određene promjene i prije nego što krene masovna proizvodnja.
- moguće je korištenje velikog palete materijala.
- moguće je korištenje u biomedicinske svrhe, gdje pronalazi veliku primjenu.
- puno je isplativiji i energetski učinkovitiji postupak. [12]

#### 3.1. Aditivna proizvodnja električnim lukom (WAAM)

Postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom, ili skraćeno WAAM, je tehnologija koja omogućava aditivnu proizvodnju metalnih komponenti navarivanjem sloj po sloj koristeći električni luk kao izvor topline.

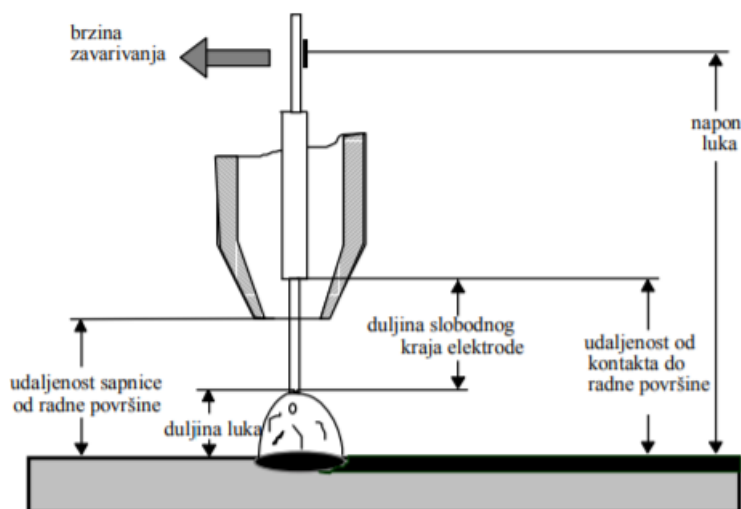
Elektrolučni postupci zavarivanja međusobno se dosta razlikuju ali svima je zajedničko da postoji električni luk, a također im je zajedničko da se ubrajaju u postupke zavarivanja taljenjem. Električni luk se uspostavlja između dvije elektrode, a to su kod zavarivanja elektroda (koja može biti i dodatni materijal) i radni komad.

Glavni parametri zavarivanja za određeni materijal i geometriju su :[13]

- napon električnog luka,  $U$  (V)
- jakost struje za zavarivanje,  $I$  (A)



- brzina zavarivanja,  $v$  (mm/s)
- stupanj iskorištenja energije u električnom luku,  $\eta(-)$
- unesena toplina,  $E_{ef}$
- temperatura metala koji se zavaruje definirana temperaturom predgrijavanja i
- temperaturom međuprolaza .
- duljina(visina) električnog luka  $L$ (mm)
- promjer elektrode odnosno žice
- vrsta i polaritet struje
- duljina slobodnog kraja žice



Slika 3.1 Prikaz osnovnih parametara zavarivanja na primjeru zavara[13]

Kombinacija električnog luka kao izvora topline i žice kao sirovine skraćeno se naziva WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) . Početak razvoja ove tehnologije unutar aditivnih tehnika započela je 1900-ih godina, a prvi patent prijavljen je 1925. godine. WAAM strojevi koriste standardnu opremu za zavarivanje: izvor struje za zavarivanje, pištolj za zavarivanje i sustav za dobavu žice, stroj koji osigurava gibanje po zadanoj putanji te kontrolnu jedinicu na kojoj se upravlja robotom. Kretanje i posmak može se osigurati ili robotskim sustavom (a) ili modificiranim CNC strojem (b). [14]



**Slika 3.2 Načini upravljanja zavarivanjem[14]**

Ovom tehnologijom dobivamo dio koji je potrebno naknadno obraditi kako bi se uklonila valovitost nastala prilikom navarivanja.

Princip rada u aditivnoj proizvodnji započinje generiranjem 3D CAD modela koji se zatim prebacuje u STL datoteku te se matematičkim metodama dijeli na 2D slojeve. Zatim se za svaki 2D sloj generira putanja gibanja pištolja i postavljaju se parametri taloženja.

Zahtjevi koji se postavljaju prilikom generiranja putanje kod WAAM-a su: minimalan broj prolaza, što manje gibanja i dobra geometrijska točnost. [14]

Kod WAAM postupka kapljice metala se talože jedna do druge u slojevima. Rezultat takvog taloženja kapljica je ravan metalni zid minimalne širine 1 mm do 2 mm, uključujući "valovitost". Ta "valovitost", koja nastaje tijekom zavarivanja na svakom sloju, mora se ukloniti naknadnim postupcima obrade kako bi se eliminirale površinske nepravilnosti [15].

Količina nataloženog materijala kreće se od 50 g/min do 130 g/min, a kod lasera ili elektronske zrake iznosi od 2 g/min do 10 g/min[16]

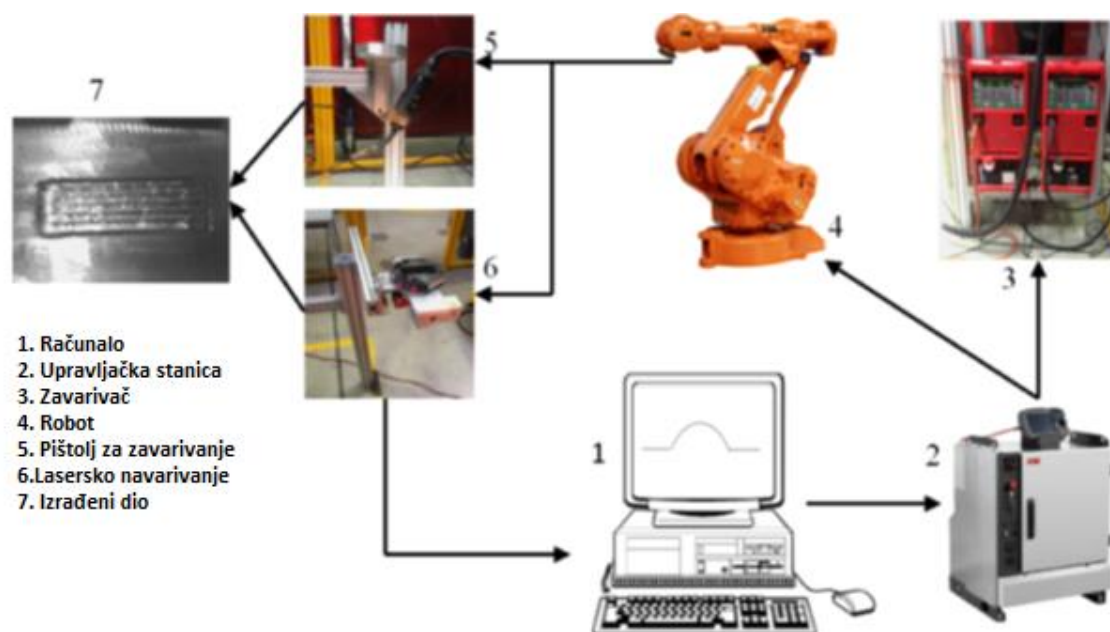
Samo ograničeni broj legura se koristi u zavarivanju aditivnim tehnologijama. Neki od njih prikazani su u Tablica 6.

S obzirom na brzi razvoj aditivnih tehnologija jasno je da će se nastaviti razvijati i nove legure pogodnije za ovakav način zavarivanja.

Tablica 6 Prikaz materijala koji se koriste u aditivnoj proizvodnji [12]

Titanij	Aluminij	Alatni čelici	Superlegure	Nehrdajući čelici	Vatrootporni materijali
Ti-6Al-4V	Al-Si-Mg	H13	IN625	316 & 316L	MoRe
ELI Ti	6061	Kermet	IN718	420	Ta-W
CP Ti			Stelit	347	CoCr
$\gamma$ -TiAl				PH 17-4	Al

Na Slika 3.3 prikazan je sustav aditivne proizvodnje u području zavarivanja. Prva faza proizvodnje je generiranje CAD modela u STL datoteku putem računala. Zatim operater na upravljačkoj stanici pomoću STL datoteke zadaje putanju kretanja i parametre zavarivanja. Idući korak je zavarivanje bilo ono poluautomatsko ili automatsko, odnosno zavarivanje pištoljem ili laserom. U konačnici dobivamo gotovi proizvod nastao slaganjem sloja na sloj.



Slika 3.3 Faze aditivne proizvodnje zavarivanjem [17]

### Osnovne prednosti WAAM proizvodnje[14]

- mogućnost automatizacije proizvodnog procesa čime se smanjuje vrijeme proizvodnje
- mogućnost postizanja vrlo složene geometrije
- smanjenje gubitaka materijala
- gotovo da nema ograničenja u veličini dijela
- mogućnost primjene za bilo kojeg proizvođača izvora struje i manipulatora
- veliki depozit materijala
- izrada komponenti od skupih materijala (titanij, i nikal i njihove legure)

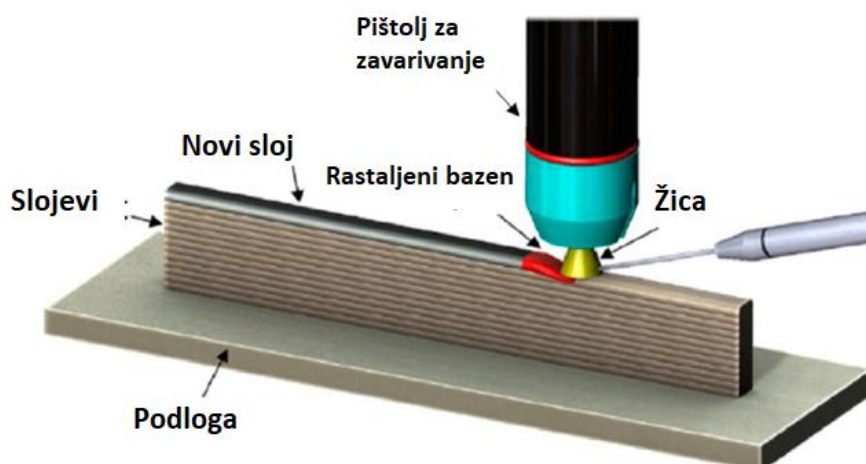
### Nedostaci WAAM proizvodnje: [14]

- visoka zaostala naprezanja
- nedostatak iskustva
- teško praćenje parametara zavarivanja
- deformacija dijelova
- potreba za naknadnom obradom

Mnoga su istraživanja provedena kako bi se riješili gore navedeni nedostaci. Smanjenje zaostalih naprezanja i deformacija dobiva se optimiranjem procesa taloženja i predgrijavanja podloge. Neujednačena geometrija zavara posljedica je smanjenog unosa topline kod velikih podloga na početku zavarivanja. Rezultat toga je veća visina zavara na početku prolaza.

Kada se električni luk zaustavi, dolazi do bježanja rastaljenog metala i dobiva se nagnuti oblik zavara. Ova greška dovodi do poroznosti prilikom izgradnje nekoliko prolaza. Da bi se dobio geometrijski ispravan proizvod, parametri procesa vezani uz geometriju se moraju pažljivo odabrati [18]

Najčešći postupci aditivne proizvodnje u zavarivanu su MIG/MAG zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje plazmom. S obzirom da su u eksperimentalnom dijelu rada analizirani uzorci zavarivani MIG/MAG postupkom u nastavku su obrađene osnovne karakteristike MIG/MAG zavarivanja.



Slika 3.4 Shematski prikaz zavarivanja aditivnom tehnologijom (WAAM)[19]



Slika 3.5 Primjeri dijelova izraženih WAAM tehnologijom

[20, 21, 22]

## 4. ELEKTROKEMIJSKA KOROZIJSKA ISPITIVANJA

Elektrokemijski procesi korozije obuhvaćaju primjenu raznih elektrokemijskih tehnika mjerenja za određivanje intenziteta korozije. Tehnike se razlikuju ovisno o vrsti struje, pa tako postoje one s istosmjernom strujom (DC) i one s izmjeničnom strujom (AC).

Prilikom ispitivanja otpornosti materijala na koroziju, u eksperimentalnom dijelu rada korištena je tehnika sa istosmjernom strujom stoga će u nastavku biti prikazane osnova ispitivanja iz te skupine.[23]

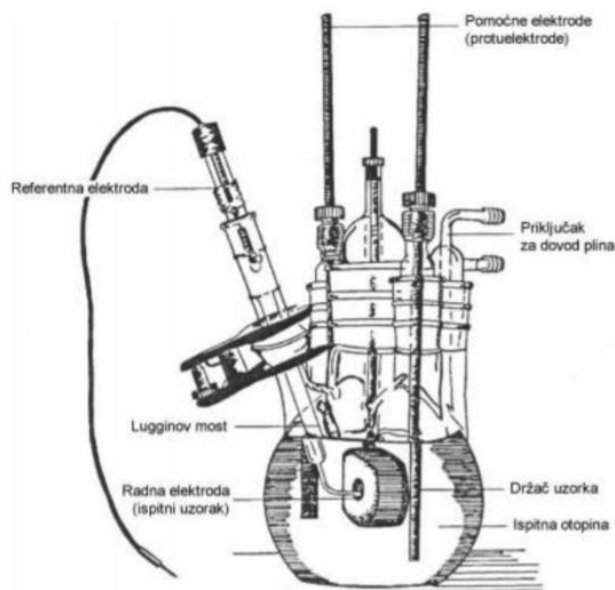
### 4.1. Elektrokemijska korozijska ispitivanja istosmjernom strujom

Kod elektrokemijskog ispitivanja istosmjernom strujom upotrebljavaju se polarizacijske metode mjerenja (potenciostatska i galvanostatska polarizacija).

Potenciostatska polarizacija se provodi posebnim uređajem – potenciostatom, pomoću kojega se na mjernoj elektrodi uspostavlja određeni potencijal, a mjeri se struja odziva sustava. Kod galvanostatske polarizacije, na mjernoj elektrodi se uspostavlja određena struja, a mjeri se napon odziva sustava. Za mjerenje se koristi 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.

Karakteristika polarizacijskih mjerenja jest da se na sustav djeluje signalom izvana te se prati odziv sustava. Cilj mjerenja je snimanje krivulja polarizacije struja-napon. Na temelju anodnih i katodnih krivulja dobiva se slika o korozijskom ponašanju određenog materijala u određenom mediju. Elektrokemijska mjerenja provode se u elektrokemijskoj ćeliji koja se sastoji od 3 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.

Slika 4.1 prikazuje uobičajenu elektrokemijsku ćeliju za korozijska ispitivanja. Radna elektroda je ispitni uzorak, pripremljen u obliku valjka promjera  $\text{Ø}16$  mm, što odgovara veličini držača radne elektrode. Elektrolitu je izložena površina od  $1 \text{ cm}^2$ . 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.[23]



Slika 4.1 Elektrokemijska ćelija za korozijska ispitivanja[23]

#### 4.1.1. Postupak određivanja potencijala otvorenog strujnog kruga

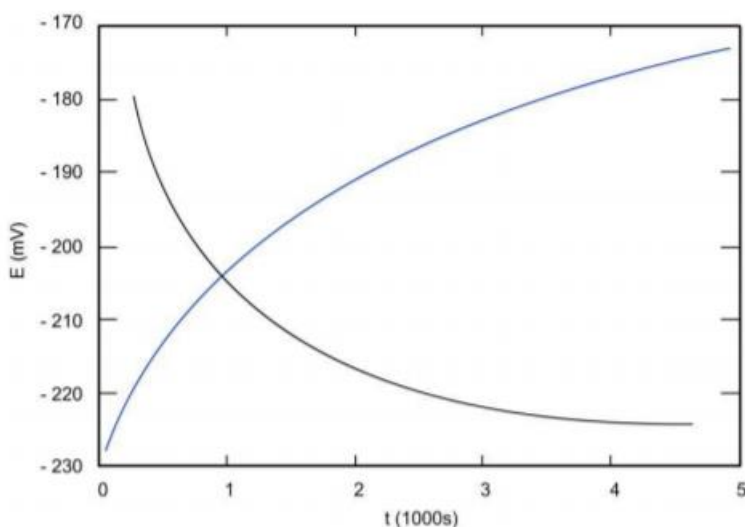
Prije početka polarizacijskog mjerenja potrebno je stabilizirati sustav metal – elektrolit

Stabilizacija sustava znači da se nakon uranjanja u elektrolit, električni krug između radne elektrode i protuelektrode pusti otvorenim, a razlika potencijala između referentne i radne elektrode se prati kao funkcija vremena. Krivulje u E-t dijagramu ovise o vrsti ispitivano materijala. Nakon određenog vremena, uspostavlja se približno stacionarno stanje na nekoj vrijednosti potencijala, koji je jednak potencijalu otvorenog strujnog kruga  $E_{ok}$  ili korozijskom potencijalu  $E_{kor}$ . Na površini metala koji je uronjen u elektrolit uspostavlja se stacionarno stanje. Anodna struja otapanja metala i katodna struja redukcije su istog iznosa, ali suprotnog smjera ( $I_a = I_k = I_{kor}$ ). [23]

Praćenjem promjena stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga  $E_{ok}$ , moguće je dobiti podatak o korozijskom ponašanju ispitivanog uzorka u određenom mediju:

- pozitivne vrijednosti  $E_{ok}$  ukazuju na stabilnost elektrode (imunost uzorka u ispitnoj vodenoj otopini)
- negativne vrijednosti  $E_{ok}$  ukazuju na nestabilnost odnosno na otapanje (koroziju)

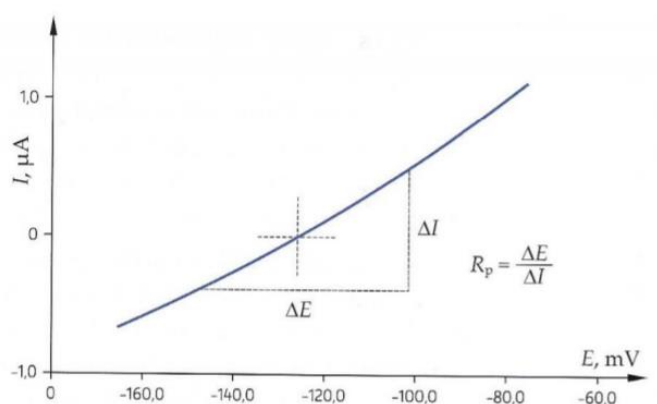
- ako se vrijednosti mijenjaju od negativnih prema pozitivnim dolazi do spontane pasivacije.



Slika 4.2 Potencijal otvorenog strujnog kruga[23]

#### 4.1.2. 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. Određuje se u odnosu prema potencijalu otvorenog strujnog kruga u području polarizacije  $\pm 20$  mV. Veće vrijednosti polarizacijskog otpora upućuju na veću otpornost materijala na medij u kojemu se nalazi. Na dijagramu na slika prikazane su vrijednosti i način određivanja polarizacijskog otpora.[23]

Slika 4.3 Određivanje polarizacijskog otpora  $R_p$  [23]



### 4.1.3. Tafel ekstrapolacija

Osnovna jednadžba elektrokemijske kinetike je Butler-Volmerova jednadžba, kojom se opisuje ovisnost gustoće struje o narinutom prenaponu. Tom jednadžbom se opisuje takozvana metoda ekstrapolacije Tafelovih pravaca koja se koristi u slučajevima kad su anodne i katodne reakcije kontrolirane prijelazom naboja. Tafelova metoda je zapravo grafička metoda kojom se određuju korozijski parametri i tako da se rezultati dobiveni katodnom i anodnom polarizacijom u području potencijala oko korozijskog potencijala prikažu u polulogaritamskom obliku. Linearni dijelovi anodnih i katodnih Tafelovih pravaca se ekstrapoliraju te u sjecištu tih pravaca se određuju vrijednosti korozijskog potencijala ( $E_{kor}$ ) i gustoće korozijske struje ( $i_{kor}$ ), a nagibi katodnog i anodnog pravca ( $\beta_a$  i  $\beta_k$ ) se izračunaju iz tangensa kuta koji svaki od tih pravaca zatvara s apscisom [23]

Mjerenja ovom metodom provode se promjenom potencijala radne elektrode (polariziranjem ispitivane elektrode) od potencijala otvorenog strujnog kruga u katodnom i anodnom smjeru.

$$j = j_0 \left\{ \exp \left[ \frac{(1-\alpha) \times z \times F \times \eta}{RT} \right] - \exp \left[ \frac{-\alpha \times z \times F \times \eta}{RT} \right] \right\} \quad (1)$$

gdje je:

$j$  – gustoća struje [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]

$j_0$  – gustoća strujne izmjene

$\eta$  – prenapon,  $\eta = E - E_0$  [mV]

$z$  – broj elektrona

$F$  – Faradayeva konstanta,  $F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ Cmol}^{-1} \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

$R$  – opća plinska konstanta,  $R = 8,314 \text{ J/molK}$

$T$  – Termodinamička temperatura [K]

$\alpha$  – koeficijent prijenosa (vrijednost od 0 do 1).

Povećanjem prenapona reakcija redukcije se usporava, a ubrzava se reakcija oksidacije. Kada je prenapon tako velik da se struja redukcije može zanemariti, Butler–Volmerova jednačba poprima slijedeći oblik:

$$j = j_0 \left\{ \exp \left[ \frac{(1-\alpha) \times z \times F \times \eta}{RT} \right] \right\} \quad (2)$$

Koja se logaritmiranjem prevodi u :

$$\eta = \frac{-2,303RT}{z \times F \times (1-\alpha)} \log j_0 + \frac{-2,303RT}{z \times F \times (1-\alpha)} \log j \quad (3)$$

a može pisati i kao Tafelova jednačba :

$$\eta = a + b \times \log j \quad (4)$$

gdje je :

$$a_a = \frac{-2,303RT}{z \times F \times (1-\alpha)} \log j_0 \quad (5)$$

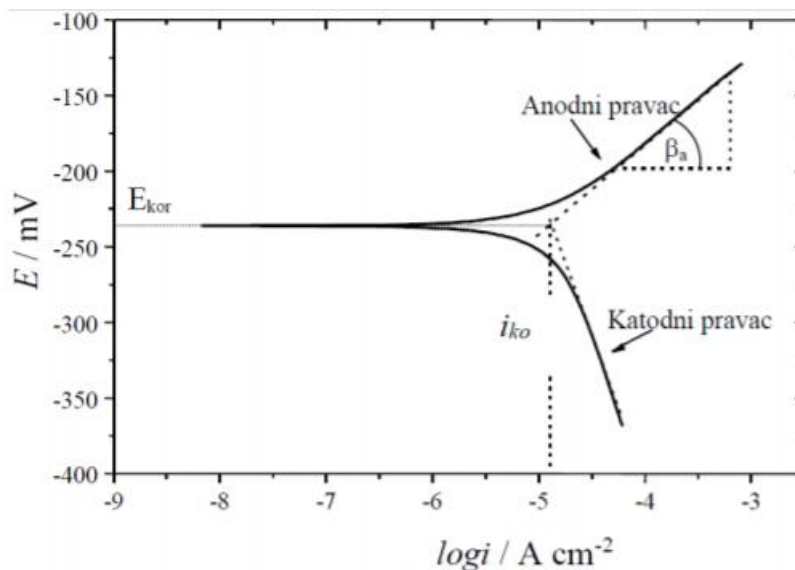
$$a_k = \frac{2,303RT}{\alpha \times z \times F} \log j_0 \quad (6)$$

Nagib anodnog Tafelovog pravca:

$$\beta_a = \frac{2,303RT}{z \times F \times (1-\alpha)} \quad (7)$$

Nagib katodnog Tafelovog pravca:

$$\beta_k = \frac{2,303RT}{\alpha \times z \times F} \quad (8)$$



Slika 4.4 Prikaz krivulje Tafelove ekstrapolacije [23]

## 4.2. Elektrokemijska korozivna ispitivanja izmjeničnom strujom

U elektrokemijskim tehnikama s izmjeničnom strujom ne dolazi do narušavanja sustava, što je slučaj pri uporabi elektrokemijskih polarizacijskih tehnika koje se temelje na istosmjernoj struji (DC – tehnika), pa se metodi elektrokemijske impedancijske spektroskopije (EIS) daje prednost pri istraživanju elektrokemijskih reakcija na granici faza. [24]

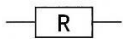
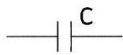
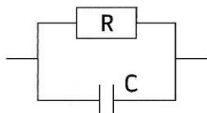
### 4.2.1. Elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS)

Elektrokemijska impedancijska spektroskopija je elektrokemijska tehnika ispitivanja koja se temelji na korištenju izmjenične struje. Kod elektrokemijskih tehnika koje koriste izmjeničnu struju ne dolazi do narušavanja sustava, pa se elektrokemijska impedancijska spektroskopija koristi za istraživanja reakcija na granici faza. Opisivanja granice elektroda/elektrolit na kojoj se odvija elektrokemijska reakcija, moguće je opisati kao električni krug koji se sastoji od kombinacija otpornika i kondenzatora. Zato za svaki ispitivani uzorak postoji njegov ekvivalentni električni krug.

Jednom kada se odabere određeni model, mogu se povezati fizikalna i/ili kemijska svojstva sustava s elementima električnoga kruga i izvući numeričke vrijednosti usklađivanjem izmjerenih podataka s modelom kruga. Interpretacijom rezultata dolazi se do informacija o elektrokemijskim parametrima površine elektrode te do podataka o korozivnom procesu i njegovu mehanizmu. [24]

### 4.2.2. Elementi ekvivalentnog kruga

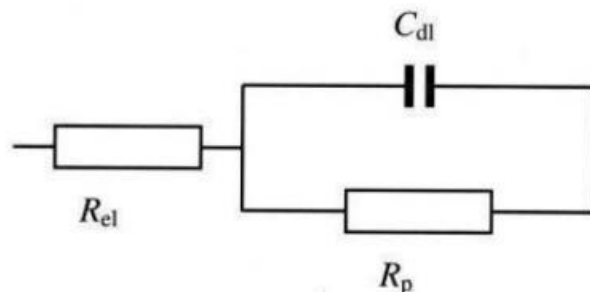
Kako bi se odredila ukupna impedancija strujnog kruga potrebno je kombinirati različite impedancijske vrijednosti pojedinih elemenata. Na slici Slika 4.5 prikazane su impedancijske jednadžbe za određene elemente strujnog kruga. Za dva paralelno spojena elementa kruga zbrajaju se inverzne vrijednosti impedancije, a za dva serijski spojena elementa kruga zbrajaju se vrijednosti impedancije. [24]

Element kruga	Simbol	Impedancijska jednadžba	Značajke
otpornik		$Z = R + j \cdot 0$	impedancija otpornika nema imaginarnu komponentu, struja je u fazi s potencijalom, tj. nema faznog pomaka, te su struja i impedancija neovisne o frekvenciji
kondenzator		$Z = 0 - \frac{j}{\omega C}$	impedancija kondenzatora nema realne komponente, a imaginarna komponenta je funkcija kapaciteta i frekvencije; pri visokim frekvencijama impedancija teži k nuli dok pri niskim frekvencijama teži beskonačnoj vrijednosti
paralelno spojeni otpornik i kondenzator		$Z = \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2} - j \frac{\omega C R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}$	zbroj inverznih vrijednosti impedancije paralelno spojenih otpornika i kondenzatora

Slika 4.5 Prikaz impedancijskih jednadžbi za elemente ekvivalentnog električnog kruga [25]

### 4.2.3. Randlesov ekvivalentni električni krug

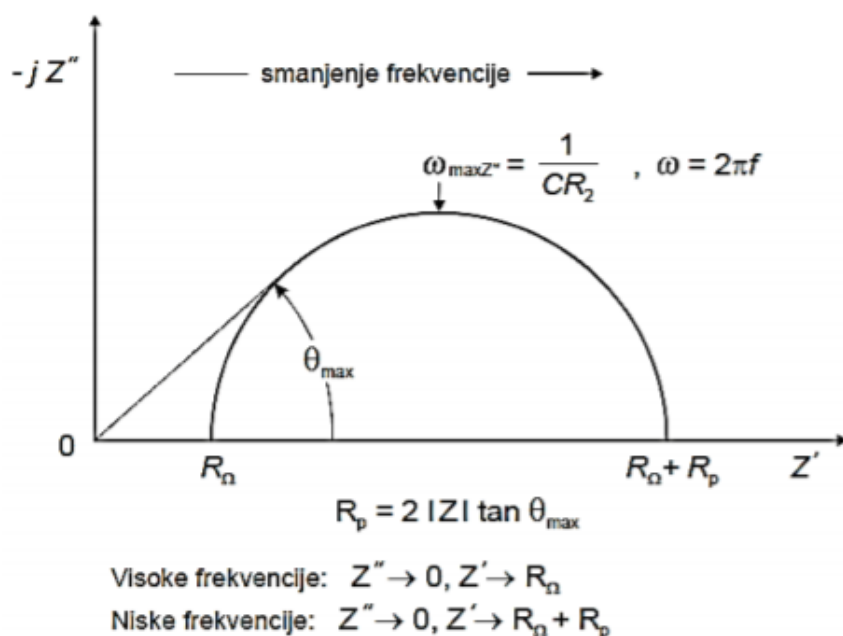
Randlesov ekvivalentni električni krug primjenjuje se za opisivanje jednostavne elektrokemijske ćelije, a sastoji se od polarizacijskog otpora  $R_p$ , kapaciteta dvosloja  $C_{dl}$  i otpora elektrolita  $R_{el}$ ,



Slika 4.6 Randlesov krug [25]

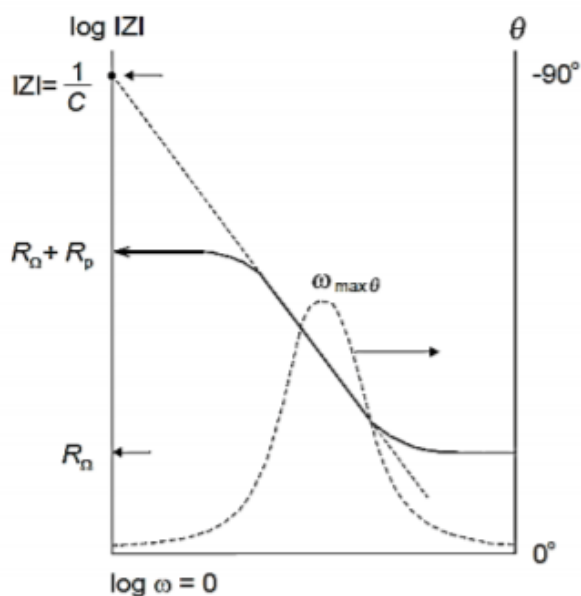
Podaci dobiveni elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom prikazuju se Nyquistovim i Bodeovim dijagramom.

Nyquistovim dijagramom prikazuje se ovisnost imaginarne komponente impedancije o realnoj komponenti za svaku frekvenciju. Nyquistov dijagram za Randlesov krug prikazan je na slici 15. Prema ekvivalentnom strujnom krugu na slici 14, Randlesov strujni krug sastoji se od samo jednog kondenzatora. Zato je sustav u Nyquistovom dijagramu prikazan s jednom kapacitivnom petljom u obliku polukruga. Na najvišim frekvencijama gdje polukrug siječe realnu os nalazi se otpor elektrolita, dok se na najnižoj frekvenciji nalaze otpor elektrolita i polarizacijski otpor. Vrijednost polarizacijskog otpora jednaka je promjeru polukruga[24]



**Slika 4.7** Nyquistov dijagram za jednostavni elektrokemijski sustav[24]

Bodeov dijagram grafički prikazuje podatke koji su jednaki kao i na Nyquistovom dijagramu. Bodeov dijagram je ovisnost logaritma apsolutne vrijednosti impedancije i faznog kuta, o logaritmu frekvencije  $\log(\omega)$ . Na visokim frekvencijama očitava se otpor elektrolita, dok se u spektru visokih frekvencija očitava otpor elektrolita i polarizacijski otpor, kao što je prikazano na slici 16. Između perioda visokih i niskih frekvencija krivulja ima oblik pravca s nagibom -1.



Slika 4.8 Bodeov dijagram jednostavni elektrokemijski sustav[24]

Elektrokemijska impedancijska spektroskopija pokazala se kao učinkovita nerazorna tehnika za istraživanje premaza kojom je moguće opisati ponašanje organskih premaza u smislu unosa vode u premaz, gubitka prionjivosti, mjehuranja, ljuštenja i korozije podloge ispod premaza. Primjena EIS-a omogućuje proizvođačima premaza i istraživačima da brzo dođu do detaljnih informacija o zaštitnim svojstvima premaza u različitim elektrolitima koji simuliraju okolišne uvjete u eksploataciji, zbog čega je EIS danas standardan alat za kontrolu formulacija premaza u razvoju i istraživanjima.[24]

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

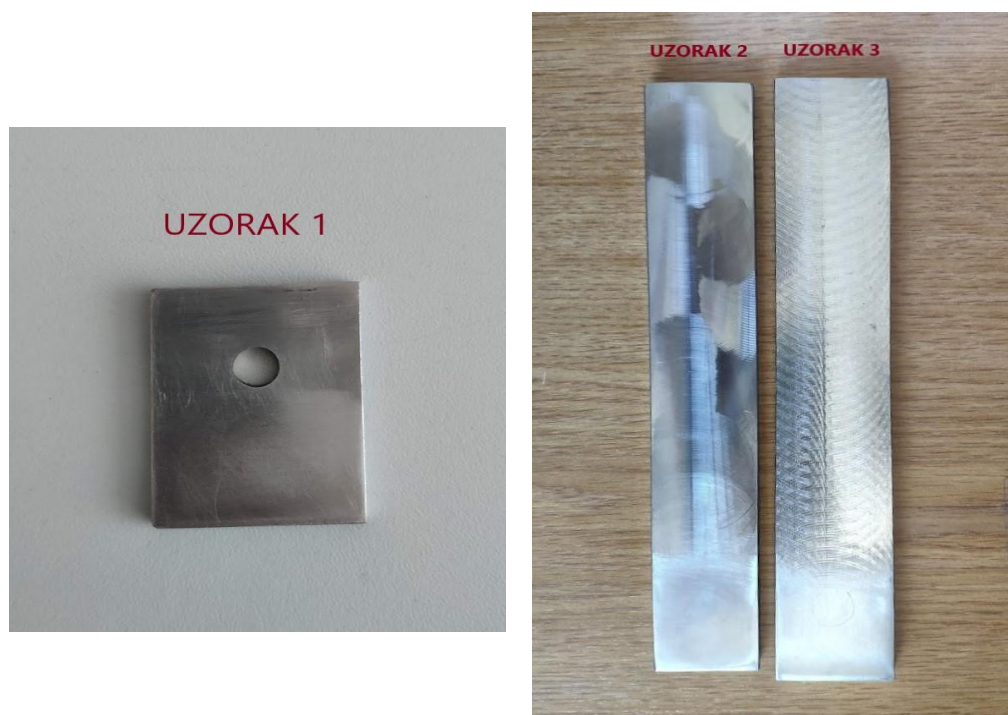
Eksperimentalni dio rada odrađen je u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu

U eksperimentalnom dijelu rada ispitana je korozivna postojanost legure 59 (N06059) u izvornom, neobrađenom obliku i korozivna postojanost dva uzorka navarena aditivnom tehnologijom iz žice Inconela 625. Zbog nedostupnosti materijala Inconel 625 u izvornom obliku izabrana je legure 59 zbog vrlo sličnih svojstava i najbližijeg sastava Inconelu 625. S obzirom da se radi o nehrđajućem čeliku, antikorozivna svojstva su im vrlo slična, a razlika u sastavu vidljiva je u postotku molibdena u leguri. Kod legura iz skupine Inconel udio molibdena je do 10%, a u leguri 59 je između 15% i 16,5%.

Zavareni uzorci izrađeni su aditivnom tehnologijom, MIG postupkom, ali u prisustvu različitih plinova. Uzorak 2 izrađen je zavarivanjem uz prisustvo plina Argon 5.0. Brzina zavarivanja bila je konstantna i iznosila je 120 cm/min. Slobodni kraj žice iznosio je 12 mm, protok plina 21 l/min, a uzorak je izrađen u 55 prolaza. Uzorak 3 zavaren je uz prisustvo plina Inoxline H5 uz iste parametre navedene za Uzorak 1, ali je broj prolaza ovog komada 53. [9]

Zbog svojih dimenzija uzorci nisu mogli biti ispitani u standardnoj posudi koja se koristi za elektrokemijsko ispitivanje (Slika 4.1) stoga je napravljena improvizacija i uzorci su ispitani u laboratorijskoj čaši.

Prije ispitivanja uzorci su izbrušeni brusnim papirom granulacije P500, odmašćeni su etanolom i na kraju isprani destiliranom vodom. Sva tri uzorka su izolirana ljepljivom trakom na kojoj je izrezan kružić promjera 1 cm što je propisana veličina ispitne površine za ovo ispitivanje. Na Slika 5.1 prikazani su uzorci 1, 2 i 3 nakon brušenja, odmašćivanja i ispiranja, a na Slika 5.2 prikazani su uzorci izolirani ljepljivom trakom na kojoj je izrezana površina na kojoj se radi ispitivanje.



Slika 5.1 Prikaz uzoraka nakon brušenja površine



Slika 5.2 Uzorci pripremljeni za ispitivanje



### 5.1. Analiza kemijskog sastava

Analiza kemijskog sastava provedena je pomoću XRF-analizatora Innov-X Systems, proizvođača Olympus.



Slika 5.3 XRF analizator Innov - X Systems

XRF analizator se koristi za identifikaciju prisutnosti i udjela metala ili ostalih elemenata u materijalu. Ovaj uređaj se zasniva na prepoznavanju elemenata mjerenjem zračenja energije X – zraka. Svaki kemijski element ima fiksni broj elektrona posloženih u elektronskom omotaču. Kada fotoni X zraka pogode predmet analiziranja sa dovoljnom energijom da izbacuju elektrone iz najudaljenije orbitale, atom postane nestabilan. Kako bi povratili stabilnost elektroni vanjskih orbitala prelaze u novonastale nepopunjene praznine unutarnjih orbitala. Tranzicija iz vanjskih u unutarnje orbitale emitira fotonsku energiju poznatu kao fluorescencija x zraka, a emitirano zračenje valnim duljinama korespondira točno određenim elementima.

Ovaj uređaj koristi računalni software preko kojeg se jednostavno očitavaju podaci kemijske analize.

U Tablica 7 prikazan udio elemenata u Uzorku 1 izrađenog iz legure 59 u izvornom stanju.

**Tablica 7 Kemijski sastav za Uzorak 1, legura 59**

Kemijski element	Ni	Cr	Mo
Udio, %	59,98	22,51	16,16

U Tablica 8 prikazan je udio elemenata u Uzorku 2, izrađenog aditivnom tehnologijom od legure Inconel 625 uz prisustvo plina argona.

**Tablica 8 Kemijski sastav Uzorka 2, Inconel 625, Ar 5.0.**

Kemijski element	Ni	Cr	Mo	Nb	Si	Fe	Ti
Udio, %	64,30	22,27	9,06	3,59	0,37	0,26	0,15

U Tablica 9 prikazan je udio elemenata u Uzorku 2, izrađenog aditivnom tehnologijom od legure Inconel 625 uz prisustvo plina Inoxline H5.

**Tablica 9 Kemijski sastav Uzorka 3, Inconel 625, Inoxline H5**

Kemijski element	Ni	Cr	Mo	Nb	Si	Fe	Mn	Ti
Udio, %	64,27	22,16	9,02	3,52	0,37	0,30	0,18	0,18

## 5.2. Elektrokemijsko ispitivanje istosmjernom strujom

Nakon analize kemijskog sastava uzorci su sastava podvrgnuti postupku elektrokemijskog ispitivanja istosmjernom strujom. Elektrokemijska korozivna ispitivanja provedena su na uređaju Potentiostat/Galvanostat Model 273A uz primjenu programskog paketa SoftCorr III. Ispitivanja su provedena u odnosu na referentnu zasićenu kalomel elektrodu (ZKE), potencijala +0,242 V prema standardnoj vodikovoj elektrodi. S obzirom na dimenzije uzorka, ispitivanje nije moglo biti odrađeno u standardnoj posudi koju se koristi za ovo ispitivanje, već je napravljena improvizacija. Kao posuda za ispitivanje korištena je laboratorijska čaša u koju je

uronjen uzorak i elektrode. Otopina korištena u postupku je 3,5 % NaCl, sobne temperature (20°C).

Prije početka elektrokemijske analize bilo je potrebno izračunati ekvivalentnu masu  $E_w$  materijala za sva tri uzorka. Taj podatak potrebno je unijeti u software prije početka ispitivanja. Ekvivalentna masa izračunata je prema formuli , a sastav je određen iz tablica 6,7 i 8. Svi elementi koji su prisutni u sastavu u postotku većem 1% ulaze u proračun.

$$E_w = \sum \frac{A_r \times x}{z} \quad (9)$$

$E_w$  - ekvivalentna masa

$A_r$  - relativna atomska masa

$x$  - maseni udio određenog elementa u uzorku

$z$  - broj elektrona određenog elementa

**Tablica 10 Podaci za izračun ekvivalentne mase  $E_w$  za uzorke 1,2 i 3**

Element	$A_r$	$x_{Uzorak1}, \%$	$x_{Uzorak2}, \%$	$x_{Uzorak3}, \%$	$z$
Ni	58,693	59,98	64,30	64,27	2
Cr	51,996	22,51	22,27	22,16	3
Mo	95,960	16,16	9,06	9,02	3
Nb	92,90	/	3,59	3,52	2

$$E_{w,uzorak1} = \frac{58,693 \times 0,5998}{2} + \frac{51,996 \times 0,2251}{3} + \frac{95,960 \times 0,1616}{3}$$

$$E_{w,uzorak1} = 26,67$$

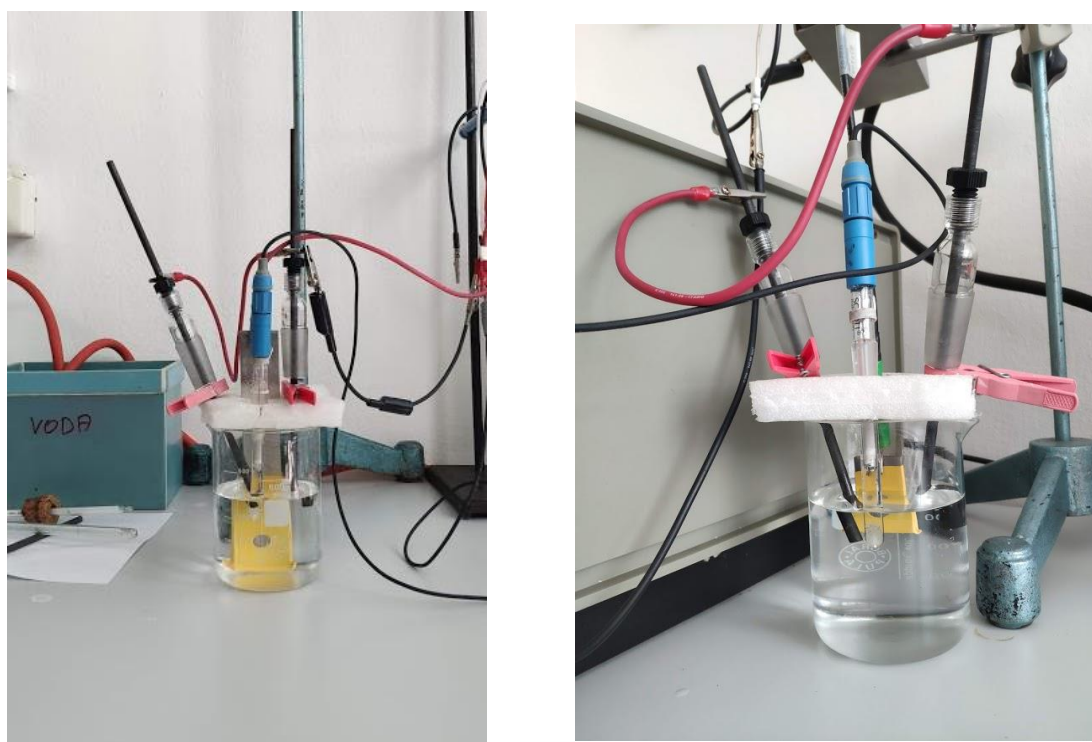
$$E_{w,uzorak2} = \frac{58,693 \times 0,6430}{2} + \frac{51,996 \times 0,2227}{3} + \frac{95,960 \times 0,0906}{3} + \frac{92,90 \times 0,0359}{3}$$

$$E_{w,uzorak2} = 27,29$$

$$E_{w,uzorak3} = \frac{58,693 \times 0,6427}{2} + \frac{51,996 \times 0,2216}{3} + \frac{95,960 \times 0,0902}{3} + \frac{92,90 \times 0,0352}{3}$$

$$E_{w,uzorak3} = 26,68$$

Na Slika 5.4 su prikazani uronjeni uzorci i elektrode te način na koje su spojene na potenciometar.

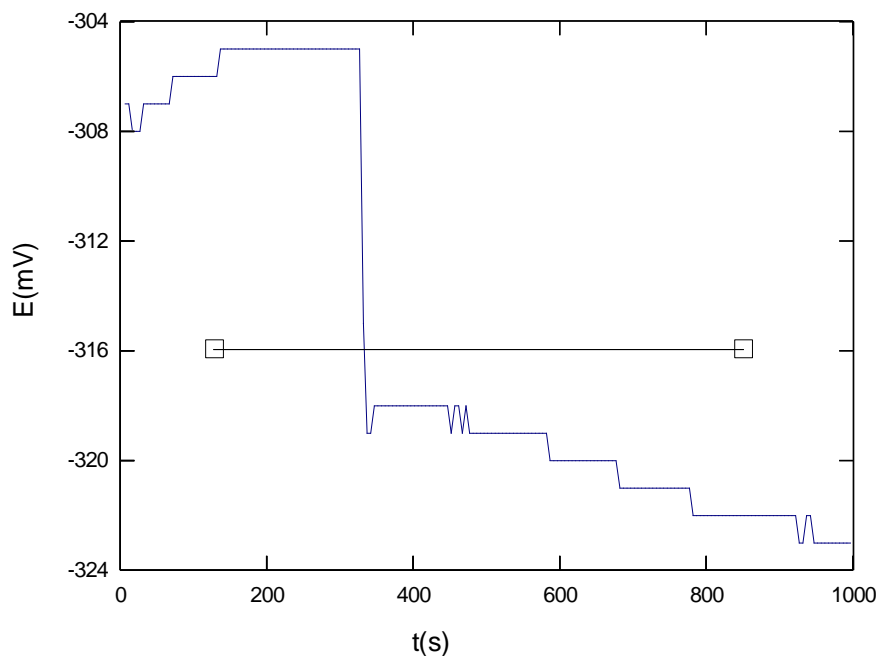


Slika 5.4 Prikaz elektrokemijskog ispitivanja

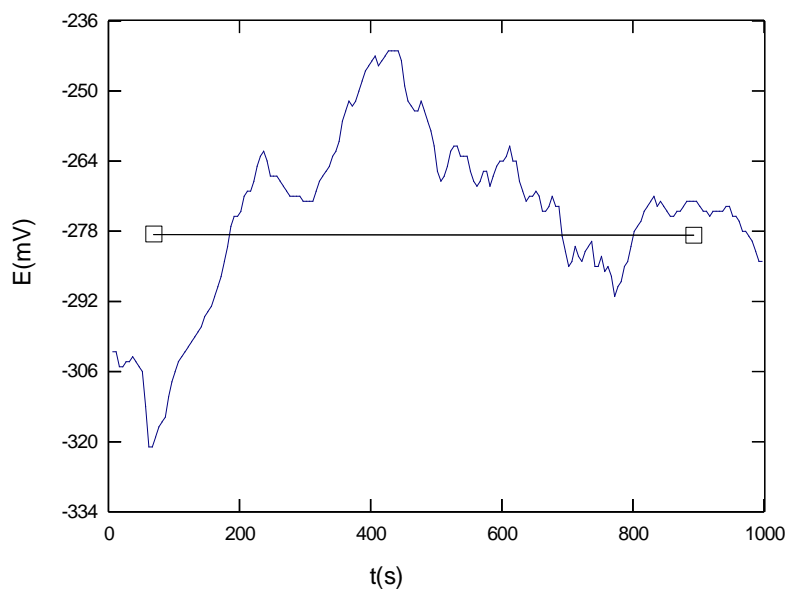
### 5.2.1. Određivanje potencijala otvorenog kruga $E_{kor}$

Korozijski potencijal otvorenog kruga  $E_{ok} = E_{kor}$  određen je praćenjem promjene potencijala u vremenu od 1000 s. Konačna dobivena vrijednost prihvaćena je kao korozijski potencijal ili potencijal otvorenog strujnog kruga  $E_{kor}$ . Naziv Potencijal otvorenog strujnog kruga koristi se jer je za vrijeme mjerenja strujni krug otvoren tj. ne odvija se elektrokemijska reakcija na radnoj

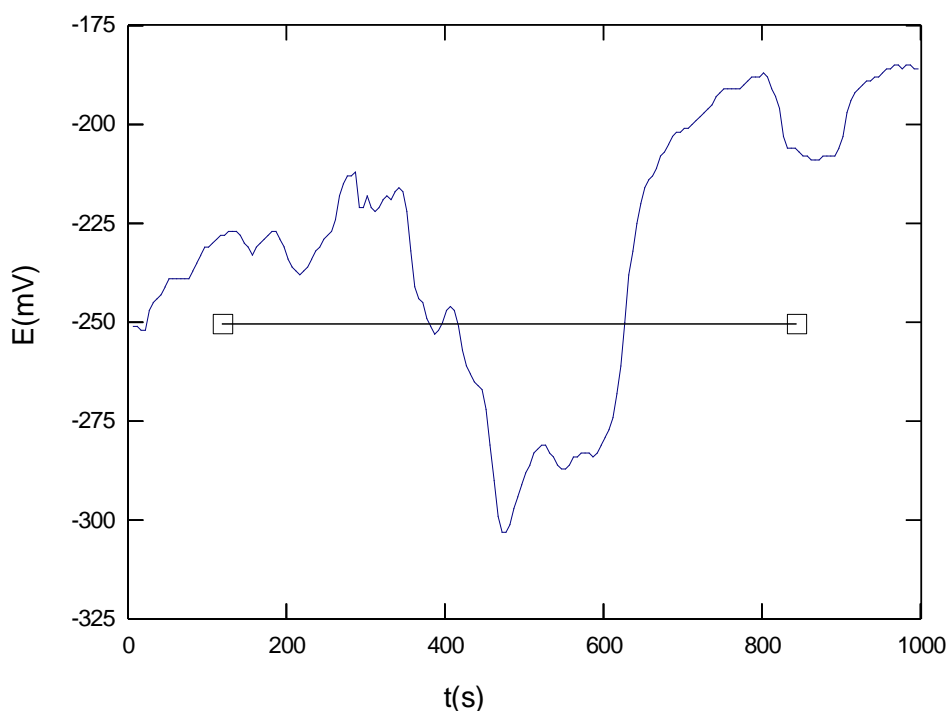
elektrodi. Na Slika 5.5, Slika 5.6 i Slika 5.7 prikazan je način na koji je iz grafova određen potencijal otvorenog strujnog kruga za pojedini uzorak.



Slika 5.5 Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga  $E_{kor}$  za Uzorak 1



Slika 5.6 Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga  $E_{kor}$  za Uzorak 2



Slika 5.7 Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga  $E_{kor}$  za Uzorak 3

U Tablica 11 prikazane su vrijednosti dobivene iz dijagrama.

Tablica 11 Iznos potencijala otvorenog strujnog kruga  $E_{kor}$  za Uzorke 1, 2 i 3

Potencijal otvorenog strujnog kruga $E_{kor}$ , mV		
Uzorak 1 (legura 59)	Uzorak 2 (Inconel 625,Ar)	Uzorak 3( Inconel 625,H5)
-316	-278	-250

### 5.2.2. 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 obratno. Određuje se u odnosu prema potencijalu otvorenog strujnog kruga ( $E_{kor}$ ) u području polarizacije  $\pm 20$  mV. Veće vrijednosti polarizacijskog otpora upućuju na veću otpornost materijala prema mediju u kojem se nalazi.

Rezultati dobiveni mjerenjem polarizacijskog otpora:

**Tablica 12** Rezultati dobiveni linearnom polarizacijom za Uzorak 1

$E_{kor}$ vs ZKE, mV	$j_{kor}$ , $\mu\text{a}/\text{cm}^2$	$\nu_{kor}$ , mm/god	$R_p$ , $\text{k}\Omega\text{cm}^2$
-317,6	$314,5 \times 10^{-3}$	0.003705	69,05

**Tablica 13** Rezultati dobiveni linearnom polarizacijom za Uzorak 2

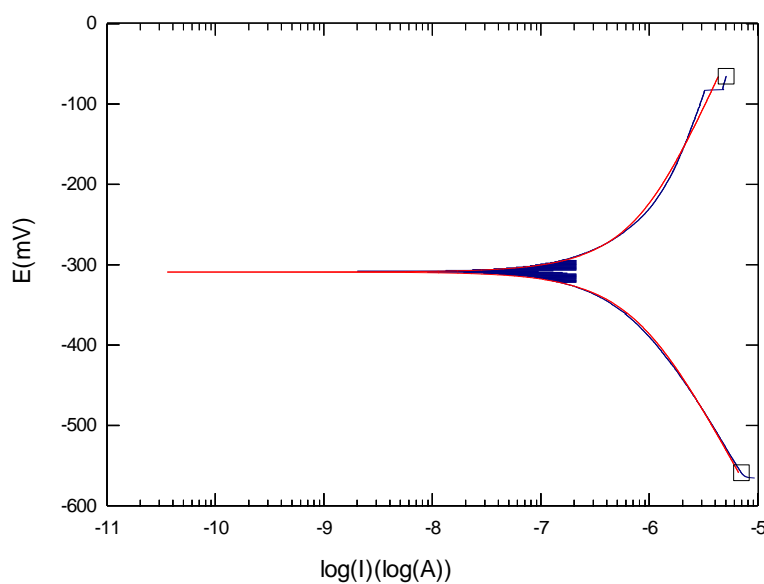
$E_{kor}$ vs ZKE, mV	$j_{kor}$ , $\mu\text{a}/\text{cm}^2$	$\nu_{kor}$ , mm/god	$R_p$ , $\text{k}\Omega\text{cm}^2$
-223,7	$406,4 \times 10^{-3}$	0,004127	53,44

**Tablica 14** Rezultati dobiveni linearnom polarizacijom za Uzorak 3

$E_{kor}$ vs ZKE, mV	$j_{kor}$ , $\mu\text{a}/\text{cm}^2$	$\nu_{kor}$ , mm/god	$R_p$ , $\text{k}\Omega\text{cm}^2$
-145,6	$312,6 \times 10^{-3}$	0,003175	69,46

Iza tablica 11, 12 i 13 možemo vidjeti da je za sva tri materijala  $E_{kor}$  negativan što znači da dolazi do korozijskih procesa, međutim  $E_{kor}$  uzoraka izrađenih iz legure Inconel 625 su pozitivniji što znači da je njihova otpornost koroziji veća.

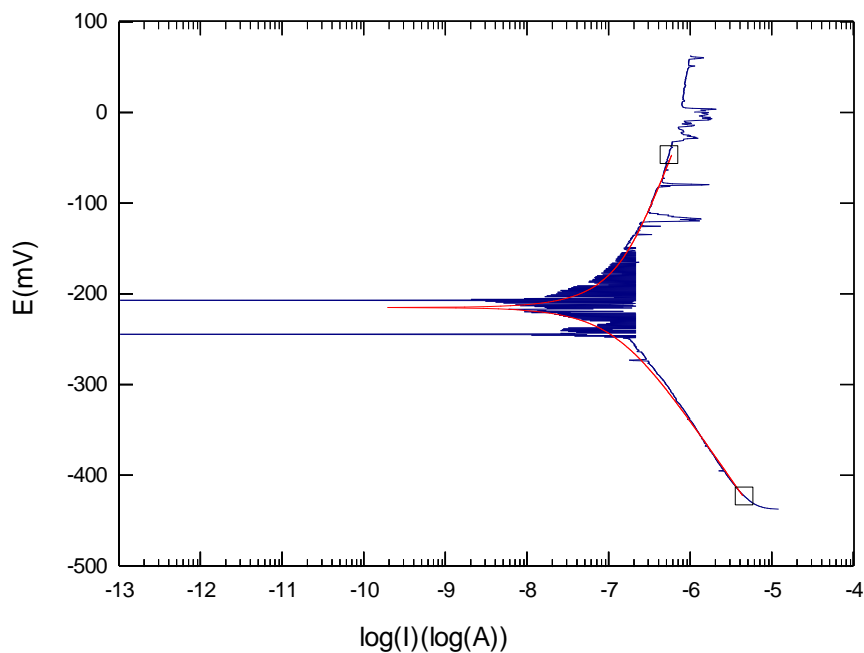
### 5.2.3. Tafelova ekstrapolacija



**Slika 5.8** Tafelova ekstrapolacija, Uzorak 1

Tablica 15 Rezultati Tafelove ekstrapolacije za Uzorak 1

$E (I=0)$ mV	$v_{kor}$ mm/god	$j_{kor}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\beta_a$ V/decade	$\beta_k$ V/decade
-309,0	0,007700	$653,5 \times 10^{-3}$	0,002986	0,002490

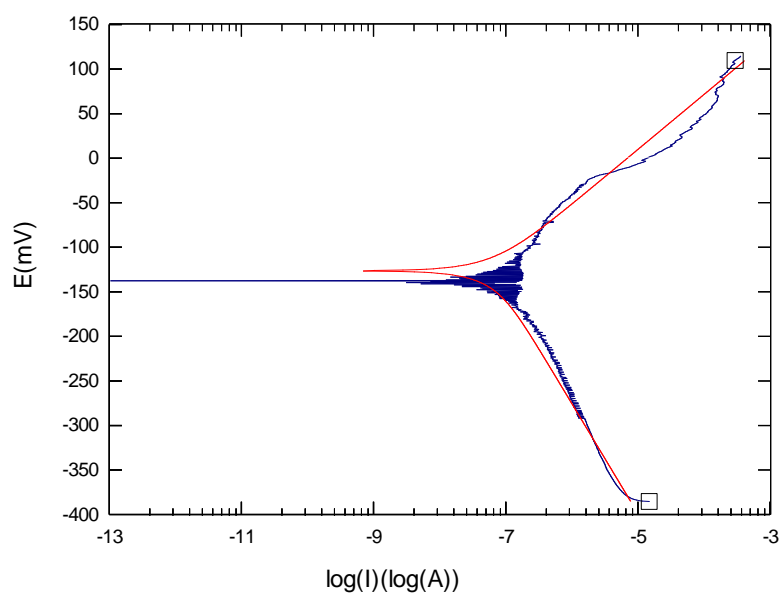


Slika 5.9 Tafelova ekstrapolacija, Uzorak 2

Tablica 16 Rezultati Tafelove ekstrapolacije za Uzorak 2

$E (I=0)$ mV	$V_{kor}$ mm/god	$j_{kor}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\beta_a$ V/decade	$\beta_k$ V/decade
-215,2	0,001051	$103,5 \times 10^{-3}$	0,002254	0,001275

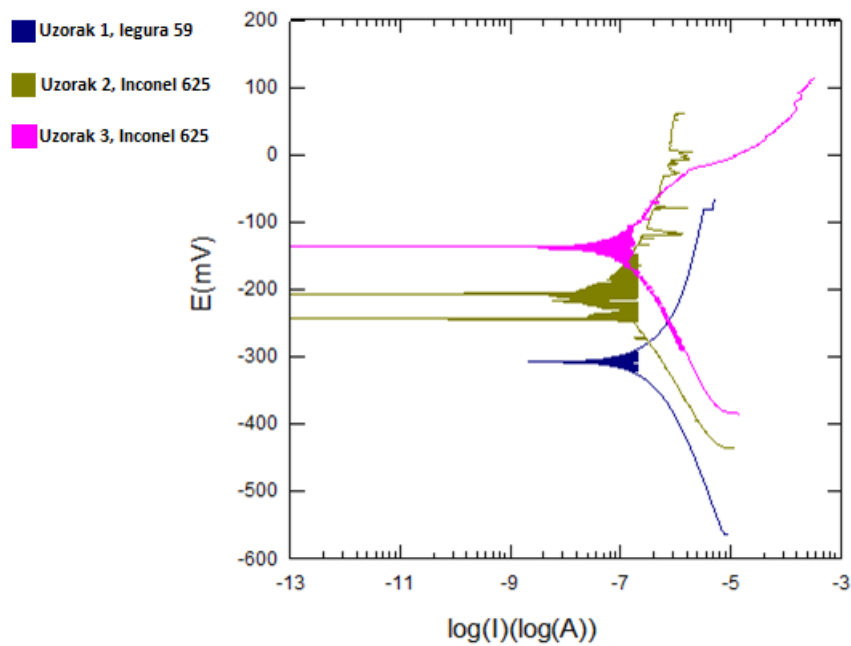




Slika 5.10 Tafelova ekstrapolacija, Uzorak 3

Tablica 17 Rezultati Tafelove ekstrapolacije za Uzorak 3

$E (I=0)$ mV	$v_{kor}$ mm/god	$j_{kor}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$\beta_a$ V/decade	$\beta_k$ V/decade
-126,3	0,000006	$59,14 \times 10^{-3}$	0,06164	0,1233



**Slika 5.11 Tafelova ekstrapolacija za sva tri uzorka**

U dijagramu na Slika 5.11 moguće je primijetiti kako su razlike korozijskog potencijala  $E_{kor}$  vrlo male i nalaze se unutar raspona od 200mV. Tafelove krivulje Uzorka 1 i Uzorka 2 odnosno legura Inconela 625 nalaze se iznad Tafelove linije Uzorka 1 (legura 59), što ukazuje na to da Uzorak 2 i Uzorak 3 imaju pozitivniju vrijednost  $E_{kor}$  te da su otporniji na koroziju od Uzorka 1.

## 6. ZAKLJUČAK

Uvođenje aditivne proizvodnje u područje zavarivanja otvorilo je novo područje primjene različitih legura u svrhu izrade geometrijski znatno kompliciranijih proizvoda. Jedna od legura koja je pronašla svoju primjenu u ovom području svakako je i niklova legura Inconel 625. Primjenom aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom u kombinaciji sa legurom Inconel 625 dobivena je mogućnost izrade proizvoda iznimnih mehaničkih i korozivskih svojstava koji odgovaraju na visoke zahtjeve trendova koji se iznova postavljaju kao posljedica brzog razvoja ove industrije.

Izradom eksperimentalnog dijela rada htjela se usporediti korozivska postojanost ove legure u navarenom i izvornom stanju. S obzirom da je zavarivanje izvođeno u 53 odnosno 55 prolaza, unos topline tijekom cijelog postupka može igrati veliku ulogu u kvaliteti materijala u zavarenom stanju. Isto tako zaostala naprezanja koja mogu nastati kao posljedica hlađenja navarenog zida, mogu znatno utjecati na mehanička svojstva, ali isto tako i na korozivska svojstva koja su ovdje bila predmet ispitivanja.

Elektrokemijska analiza istosmjernom strujom pokazala je da je korozivski potencijal negativan kod sva tri uzorka što znači da dolazi do određenih korozivskih procesa, međutim brzina korozije nije značajna. Tafelovom ekstrapolacijom i uvidom u tafelove dijagrame sva tri uzorka možemo vidjeti da ne postoji velika razlika u intenzitetu korozije između Uzorka 1, izrađenog iz legure u izvornom stanju i Uzorka 2 i 3 izrađenih aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom. Štoviše korozivski potencijal  $E_{kor}$  legure u izvornom stanju nešto je negativniji od  $E_{kor}$  navarenih komada. Ta razlika može biti posljedica razlike u sastavu legure 59 (N06059) i legure Inconel 625, ali sastav ove dvije legure dovoljno je sličan da se može zaključiti kako postupak navarivanja ne utječe znatno na korozivsku otpornost legure.

Naposljetku dolazimo do zaključka kako uz pravilan izbor zaštitnog plina, parametara zavarivanja i uz dobru inženjersku praksu prilikom aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom ne dolazi do značajnih promjena u korozivskoj postojanosti legure Inconel 625.

## 7. LITERATURA

- [1] E. O. Ezugwu, Z. M. Wang, and A. R. Machado, "The machinability of nickel-based alloys : a review," vol. 86, pp. 1–16, 1999.
- [2] J. Radić, "Mikrostrukturalna analiza zavarenog spoja Ni - Cu legura," Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagrebu, 2012.
- [3] "Zavarljivost nikal legura," *Strojarski fakultet Slavonski Brod*. [Online]. Available: <http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/zavar/nikl.html>. [Accessed: 10-Sep-2019].
- [4] J. R. Davis, Ed., *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. ASM International.
- [5] J. Dupont, J. Lippold, and S. Kiser, *Welding metallurgy and weldability of nickel base alloys*. New Jersey, 2009.
- [6] T. Filetin, F. Kovačiček, and J. Indof, *Svojstva i karakteristike materijala - Katalog opisa*, 1st ed. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1993.
- [7] "The ultimate guide to INCONEL alloy 625," *Corrotherm News*, 2019. [Online]. Available: <https://www.corrotherm.co.uk/blog/the-ultimate-guide-to-inconel-alloy-625>. [Accessed: 20-Aug-2019].
- [8] B. Sethuraman, "Welding Parameters for Inconel 625 Overlay on Carbon Steel using GMAW," no. May, 2017.
- [9] M. Sinkovic, "Mikrostruktura i mehanička svojstva legure Inconel 625 pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom," Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [10] "INCONEL alloy 625," 2013. [Online]. Available: <http://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [11] G. P. Dinda, A. K. Dasgupta, and J. Mazumder, "Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy : Microstructural evolution and thermal stability," vol. 509, pp. 98–104, 2009.
- [12] W. E. Frazier, "Metal Additive Manufacturing : A Review," vol. 23, no. June, pp. 1917–1928, 2014.
- [13] "Glavni parametri elektrolučnih postupaka zavarivanja," *Strojarski fakultet Slavonski Brod*. [Online]. Available: [http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/cz\\_dipl3/3.1.pdf](http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/cz_dipl3/3.1.pdf).
- [14] S. W. Williams *et al.*, "Wire + Arc Additive Manufacturing Wire þ Arc Additive Manufacturing," vol. 0836, 2016.
- [15] A. Busachi, J. Erkoyuncu, P. Colegrove, F. Martina, and J. Ding, "Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications ," *Procedia CIRP*, vol. 37, no. 2013, pp. 48–53, 2015.
- [16] D. Ilić, "Optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom," Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [17] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "Robotics and Computer-Integrated Manufacturing A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing ( WAAM )," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 31, pp. 101–110, 2015.
- [18] M. Krišto, "Primjena legure Inconel 625 za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom," Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [19] A. M. Waam and J. P. Oliveira, "Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)," 2019.

- 
- [20] “WAAM — Wire Arc Additive Manufacturing,” *FIT Prototyping*. [Online]. Available: <http://www.fit-prototyping.de/waam.php?language=2>. [Accessed: 02-Sep-2019].
- [21] “Demo parts.” [Online]. Available: <https://waammat.com/>. [Accessed: 02-Sep-2019].
- [22] “WAAM (WIRE-ARC ADDITIVE MANUFACTURING).” [Online]. Available: <http://fitnik.tech/en/technologies/waam>. [Accessed: 02-Sep-2019].
- [23] I. Juraga, V. Alar, and I. Stojanović, *Korozija i zaštita premazima*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [24] I. Mikec, “Inhibirajuća sredstva za privremenu zaštitu od korozije,” Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [25] A. Pappo, “Elektrokemijska svojstva nehrđajućih čelika,” Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.