

# Utjecaj toplinske obrade na svojstva aluminijske legure AlSi1MgMn

---

**Fekonja, Domagoj**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:235:151300>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Domagoj Fekonja**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Domagoj Fekonja

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku na susretljivosti, uloženom trudu te nesebičnoj pomoći i savjetima pri izradi ovog rada. Također, zahvaljujem se i svim djelatnicima Katedre za toplinsku obradu i inženjerstvo površina na pomoći pri provedbi eksperimentalnog dijela rada. Isto tako, veliko hvala svim djelatnicima Katedre za zaštitu materijala na pomoći, a posebno hvala asistentu dr.sc. Marinu Kurteli, dipl.ing. na savjetima i vođenju pri provedbi eksperimentalnih ispitivanja.

Na kraju, najviše hvala roditeljima, cijeloj obitelji te prijateljima na pružanoj podršci i povjerenju tijekom studiranja.

Domagoj Fekonja





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DOMAGOJ FEKONJA** Mat. br.: 0035209794

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj toplinske obrade na svojstva aluminijske legure AlSi1MgMn**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of heat treatment on the properties of AlSi1MgMn aluminum alloy**

Opis zadatka:

Aluminijske legure iz skupina EN-AW 20XX, EN-AW 60XX i EN-AW 70XX svoja uporabna svojstva postižu nakon precipitacijskog očvršćivanja. Parametri toplinske obrade značajno utječu na mikrostrukturu, mehanička i korozivna svojstva obrađene legure.

U radu treba opisati posebnosti dijagrama stanja, mikrostrukturne karakteristike, toplinsku obradu te svojstva i primjenu precipitacijski očvršćivih aluminijskih legura iz skupina EN-AW 20XX, EN-AW 60XX i EN-AW 70XX. U opisu toplinske obrade objasniti utjecaj homogenizacijskog žarenja i starenja na mehanička i korozivna svojstva ovih legura.

U eksperimentalnom dijelu rada treba predložiti plan pokusa kojim će se ispitati utjecaji brzine hlađenja s temperature homogenizacijskog žarenja i temperature umjetnog starenja na mikrostrukturu, tvrdoću i otpornost na koroziju aluminijske legure AlSi1MgMn. Na temelju rezultata ispitivanja predložiti optimalne parametre toplinske obrade.


Navesti u radu korištenu literaturu i stručnu pomoć.

Zadatak zadan:  
20. siječnja 2022.

Rok predaje rada:  
24. ožujka 2022.

Predviđeni datum obrane:  
28. ožujka do 1. travnja 2022.

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	1
POPIS SLIKA .....	3
POPIS TABLICA.....	5
POPIS OZNAKA .....	5
SAŽETAK.....	7
SUMMARY .....	8
1. UVOD.....	9
TEORIJSKI DIO .....	10
2. SISTEMATIZACIJA I OČVRSNUĆE ALUMINIJEVIH LEGURA .....	11
2.1. Sistematizacija aluminijevih legura .....	11
2.2. Mehanizmi očvršnuća aluminijevih legura .....	13
2.3. Sustav označavanja kovanih aluminijevih legura .....	14
3. TOPLINSKA OBRADA ALUMINIJEVIH LEGURA.....	16
3.1. Prikaz i svojstva kovanih aluminijevih legura .....	20
3.1.1. Utjecaj intenziteta gašenja na svojstva aluminijevih legura .....	22
3.1.2. Toplinska obrada aluminijevih legura iz skupine EN-AW-20xx.....	28
3.1.3. Toplinska obrada aluminijevih legura iz skupine EN-AW-60xx.....	31
3.1.4. Toplinska obrada aluminijevih legura iz skupine EN-AW-70xx.....	34
4. METODE ISPITIVANJA.....	37
4.1. Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće .....	37
4.2. Ispitivanje korozijske postojanosti Tafelovom metodom .....	38
4.3. Ispitivanje korozijske postojanosti cikličkom polarizacijom.....	40
EKSPERIMENTALNI DIO.....	43
5. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA .....	44
5.1. Plan pokusa i priprema uzoraka .....	44
5.2. Označavanje i toplinska obrada uzoraka.....	46
5.2.1. Određivanje intenziteta gašenja u ispitivanim sredstvima za gašenje .....	49
5.3. Ispitivanje tvrdoće uzoraka .....	53
5.4. Ispitivanje otpornosti na elektrokemijsku koroziju.....	55
5.5. Analiza korodirane površine stereomikroskopijom .....	56
6. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA.....	58
6.1. Rezultati ispitivanja tvrdoće.....	58
6.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na koroziju .....	62
6.2.1. Određivanje brzine korozije pomoću Tafelove ekstrapolacije .....	63
6.2.2. Rezultati ispitivanja cikličke polarizacije .....	67
6.2.3. Analiza površine uzoraka nakon provedenih ispitivanja .....	71
6.3. Analiza mikrostrukture uzoraka .....	76

---

6.4. Diskusija o rezultatima ispitivanja.....	79
7. ZAKLJUČAK.....	82
PRILOZI.....	87

## POPIS SLIKA

Slika 2.1	Podjela aluminijskih legura, (a) lijevane i (b) kovane [3].....	11
Slika 2.2	Blok motora V8 od lijevane legure aluminija A319 AlSiCu [5].....	12
Slika 2.3	Šipke od kovane aluminijske legure 6061 T6 [6] .....	13
Slika 2.4	Dijagram naprezanje - istežanje kod aluminijskih legura [1] .....	13
Slika 2.5	Osnovni tipovi nesavršenosti u mikrostrukturi aluminija [1].....	14
Slika 3.1	Shematski prikaz faznog dijagrama toplinski obradivih aluminijskih legura [1].	17
Slika 3.2	Proces toplinske obrade Al-Cu legure s opisanim stadijima [2] .....	18
Slika 3.3	Krivulje prirodnog dozrijevanja triju toplinski obradivih legura [2] .....	19
Slika 3.4	Krivulje umjetnog dozrijevanja toplinski obrađene i gašene aluminijske legure 6061 [2] .....	20
Slika 3.5	Shematski dijagram ovisnosti temperature o intenzitetu difuzije, precipitacije i prezasićenosti [11].....	23
Slika 3.6	Shematski prikaz Leidenfrostovih faza gašenja [12] .....	24
Slika 3.7	Krivulje gašenja s fazama gašenja [12] .....	24
Slika 3.8	Određivanje intenziteta gašenja nekog sredstva za gašenje [12] .....	25
Slika 3.9	Shematski prikaz faznog dijagrama i TTP precipitacijskih krivulja za aluminijsku leguru 6082 [14] .....	26
Slika 3.10	TTP dijagram za aluminijsku leguru 2024 [15] .....	26
Slika 3.11	CCP dijagram aluminijske legure EN AW-6082 [16] .....	27
Slika 3.12	CCP dijagram aluminijske legure EN AW-7150 [17] .....	28
Slika 3.13	Binarni dijagram Al-Cu s temperaturama toplinske obrade [7] .....	29
Slika 3.14	Dijagrami aluminijskih legura 2014 (lijevo) i 2024 (desno) ovisnosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja o vremenu dozrijevanja [7] .....	30
Slika 3.15	Dijagrami aluminijske legure 6061 ovisnosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja o trajanju precipitacijskog očvrstuća [7] .....	33
Slika 3.16	Dijagram ovisnosti tvrdoće o vremenu dozrijevanja aluminijske legure 6061-T6 pri različitim temperaturama dozrijevanja [20].....	34
Slika 3.17	Fazni dijagram aluminijske legure iz skupine 7xxx s prisutnim fazama pri određenim temperaturama [22] .....	35
Slika 4.1	Ispitivanje tvrdoće metodom Vickers [23].....	37
Slika 4.2	Metoda Tafelove ekstrapolacije [26].....	40
Slika 4.3	Dijagram cikličke polarizacije s pozitivnom histerezom [29].....	42
Slika 5.1	Prijenosni uređaj za analizu kemijskog sastava Olympus XRF .....	44
Slika 5.2	Dimenzije ispitnih uzoraka.....	45
Slika 5.3	Izrezani uzorci prije pripreme površina za ispitivanja .....	45
Slika 5.4	Tračna brusilica pomoću koje su brušene površine uzoraka.....	46
Slika 5.5	Primjer žigom označenog uzorka .....	46
Slika 5.6	Shematski prikaz toplinske obrade ispitivanih uzoraka .....	48
Slika 5.7	Komorna električna peć za toplinsku obradu ispitivanih uzoraka .....	48
Slika 5.8	Gašenje uzorka s vidljivim prisutnim fazama .....	49
Slika 5.9	Mjerni sustav IVF Smart Quench System (ISO 9950) [30] .....	50
Slika 5.10	Krivulja ohlađivanja i krivulja brzine ohlađivanja u vodi temperature 23 °C .....	51
Slika 5.11	Krivulja ohlađivanja i krivulja brzine ohlađivanja u vodi temperature 50 °C .....	52
Slika 5.12	Krivulja ohlađivanja i krivulja brzine ohlađivanja u vodi temperature 75 °C .....	52

Slika 5.13	Tvrdomjer INSTRON Wilson-Wolpert Tukon 2100B (lijevo) te pripremljeni uzorak za ispitivanje tvrdoće na uređaju (desno) .....	54
Slika 5.14	Označene dimenzije, tj. dijagonale otiska za određivanje tvrdoće u softveru .....	54
Slika 5.15	Ispitna aparatura za ispitivanje otpornosti na koroziju.....	55
Slika 5.16	Elektrokemijska ćelija s dijelovima u trenutku ispitivanja .....	56
Slika 5.17	Snimanje površine uzorka pomoću stereomikroskopa Leica MZ6.....	57
Slika 6.1	Tvrdoće ispitnih uzoraka nakon rastvornog žarenja.....	58
Slika 6.2	Tvrdoće uzoraka serije A nakon umjetnog starenja .....	59
Slika 6.3	Tvrdoće uzoraka serije B i uzorka D nakon umjetnog starenja .....	60
Slika 6.4	Tvrdoće uzoraka serije C nakon umjetnog starenja .....	61
Slika 6.5	Usporedba najveće i najmanje vrijednosti tvrdoće za ispitnih uzoraka .....	62
Slika 6.6	Tafelovi dijagrami za uzorke A11, B11 i C11 .....	63
Slika 6.7	Tafelovi dijagrami za uzorke A12, B12 i C12 .....	64
Slika 6.8	Tafelovi dijagrami za uzorke A21, B21 i C21 .....	64
Slika 6.9	Tafelovi dijagrami za uzorke A22, B22 i C22 .....	65
Slika 6.10	Tafelovi dijagrami za uzorke A30, B30 i C30 .....	65
Slika 6.11	Krivulje cikličke polarizacije uzoraka A11, B11 i C11 .....	67
Slika 6.12	Krivulje cikličke polarizacije uzoraka A12, B12 i C12 .....	68
Slika 6.13	Krivulje cikličke polarizacije uzoraka A21, B21 i C21 .....	68
Slika 6.14	Krivulje cikličke polarizacije uzoraka A22, B22 i C22 .....	69
Slika 6.15	Krivulje cikličke polarizacije uzoraka A30, B30 i C30 .....	69
Slika 6.16	Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 .....	76

**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1	Sustav označavanja kovanih aluminijevih legura [2] .....	15
Tablica 3.1	Prikaz kovanih aluminijevih legura prema mehanizmu očvršćivanja [9] .....	21
Tablica 3.2	Raspon vlačnih čvrstoća raznih kovanih aluminijevih legura [9] .....	21
Tablica 3.3	Faze precipitacijskog očvršnuća i skupine legura u kojima se javljaju [1] .....	22
Tablica 3.4	Kemijski sastav najčešće korištenih legura iz skupine 6000 [19] .....	32
Tablica 5.1	Kemijski sastav aluminijeve legure EN-AW 6082 .....	44
Tablica 5.2	Oznake uzoraka s pripadajućim parametrima toplinske obrade .....	47
Tablica 5.3	Opisani parametri hlađenja dobiveni pri ispitivanju sredstava za gašenje.....	50
Tablica 5.4	Vrijednosti parametara gašenja mirne vode zagrijane na 23 °C, 50 °C i 75 °C	53
Tablica 6.1	Prikaz oznaka slika te ispitivanih uzoraka na njima (Tafelova ekstrapolacija) .	63
Tablica 6.2	Vrijednosti dobivene Tafelovom ekstrapolacijom za sve ispitne uzorke .....	66
Tablica 6.3	Prikaz oznaka slika te ispitivanih uzoraka na njima (ciklička polarizacija) .....	67
Tablica 6.4	Vrijednosti dobivene cikličkom polarizacijom za sve ispitne uzorke.....	70
Tablica 6.5	Snimke površina uzoraka A11, A12 i A21 nakon elektrokemijskih ispitivanja	71
Tablica 6.6	Snimke površina uzoraka A22 i A30 nakon elektrokemijskih ispitivanja.....	72
Tablica 6.7	Snimke površina uzoraka B11 i B12 nakon elektrokemijskih ispitivanja .....	72
Tablica 6.8	Snimke površina uzoraka B21, B22 i B30 nakon elektrokemijskih ispitivanja.	73
Tablica 6.9	Snimke površina uzoraka C11, C12 i C21 nakon elektrokemijskih ispitivanja.	74
Tablica 6.10	Snimke površina uzoraka C22 i C30 nakon elektrokemijskih ispitivanja.....	75
Tablica 6.11	Mikrostruktura uzoraka A12, B12 i C12 .....	77
Tablica 6.12	Mikrostruktura uzoraka A22, B22 i C22.....	78
Tablica 6.13	Vrijednosti određenih parametara svih uzoraka nakon provedenih ispitivanja	81

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis oznake
$H_{sredstva}$	-	Intenzitet gašenja sredstva
$HV$	-	Tvrdoća po Vickersu
$g_n$	$m/s^2$	Ubrzanje sile teže
$F$	N	Sila utiskivanja indentora
$d$	mm	Aritmetička sredina dviju izmjerenih dijagonala otiska
$j$	$\mu A/cm^2$	Gustoća korozijske struje
$j_0$	$\mu A/cm^2$	Gustoća struje izmjene iona
$F$	C/mol	Faradayeva konstanta
$R$	J/Kmol	Opća plinska konstanta
$\eta$	mV	Prenapon korozijskog članka
$T$	K	Termodinamička temperatura
$z$	-	Broj elektrona
$\alpha$	-	Koeficijent prijenosa
$v_{kor}$	mm/god	Brzina korozije
$EW$	-	Ekvivalentna masa
$\rho$	$g/cm^3$	Gustoća
$E_{pit}$	mV	Potencijal pitinga
$E_{zpit}$	mV	Zaštitni potencijal za rupičastu koroziju
$\vartheta_{r\dot{z}}$	$^{\circ}C$	Temperatura rastvornog žarenja
$\vartheta_{str}$	$^{\circ}C$	Temperatura starenja
$T_{Leidenfrost}$	$^{\circ}C$	Temperatura prijelaza iz faze parnog omotača u fazu vrenja
$T(CR_{max})$	$^{\circ}C$	Temperatura pri maksimalnoj brzini ohlađivanja
$T_{konvekcije}$	$^{\circ}C$	Temperatura prijelaza iz faze vrenja u fazu konvekcije
$t(CR_{max})$	s	Vrijeme postizanja maksimalne brzine ohlađivanja
$t_{850-600}$	s	Vrijeme ohlađivanja od 850 $^{\circ}C$ do 600 $^{\circ}C$
$t_{850-400}$	s	Vrijeme ohlađivanja od 850 $^{\circ}C$ do 400 $^{\circ}C$
$t_{850-200}$	s	Vrijeme ohlađivanja od 850 $^{\circ}C$ do 200 $^{\circ}C$
$CR_{max}$	$^{\circ}C/s$	Maksimalna brzina ohlađivanja

## SAŽETAK

U radu je opisana toplinska obrada precipitacijski očvršćivih aluminijskih legura te njezin utjecaj na mikrostrukturu i svojstva legura. S odabirom parametara toplinske obrade postižu se različite vrijednosti dobivenih parametara ispitivanja kao i dobivene mikrostrukture koje značajno utječu na kvalitetu postignutog stanja materijala. U eksperimentalnom dijelu rada određena je tvrdoća i otpornost na koroziju uzoraka aluminijske legure AlSi1MgMn koji su različito toplinski obrađivani. Toplinska obrada sastojala se od homogenizacijskog žarenja te umjetnog starenja, pri čemu su varirani parametri hlađenja te temperatura i vrijeme umjetnog starenja. Ispitivanjem tvrdoće nakon umjetnog starenja dobiven je raspon tvrdoća, pri čemu je najveća postignuta vrijednost iznosila 146 HV1, dok je najmanja bila 90 HV1. Elektrokemijska ispitivanja pokazala su da je kod svih ispitnih uzoraka došlo do značajne pojave rupičaste korozije u vodenoj otopini 3,5 % NaCl uz razaranje pasivnog filma ubrzo nakon kontakta aluminijske legure s otopinom. Analizom mikrostrukture utvrđeno je poželjno stanje legure, gdje su sitne precipitacijske čestice homogeno raspoređene u aluminijskoj matrici, a vidljiva je i prisutnost pora i mikropukotina pri povećanjima većim od 500x. Najveća otpornost na koroziju i povišena tvrdoća postignuta je nakon rastvornog žarenja, hlađenja u vodi temperature 50 °C i umjetnog starenja s parametrima 150 °C/10 h/zrak.

Ključne riječi: precipitacijsko očvršćivanje, aluminijska legura AlSi1MgMn, toplinska obrada, tvrdoća, elektrokemijska korozija, mikrostrukturna analiza



## **SUMMARY**

The paper describes the heat treatment of precipitation hardening aluminum alloys and its impact on the microstructure and properties of alloys. By choosing the heat treatment parameters, different values of the obtained test parameters, as well as the obtained microstructures are achieved, which significantly affect the quality of the achieved state of the material. In the experimental part, the hardness and corrosion resistance of aluminum alloy AlSi1MgMn samples that were differently heat treated were determined. Heat treatment consisted of homogenization annealing and artificial aging, with varying cooling parameters and also varying temperature and time of the artificial aging. Hardness testing after artificial aging gave a range of hardnesses, with the highest value of 146 HV1, while the lowest was 90 HV1. Electrochemical tests showed that on all testing specimens significant pitting corrosion in aqueous 3,5 % NaCl solution has appeared, with destruction of the passive film shortly after the aluminum alloy was in contact with the solution. By the microstructure analysis the preferred state of the alloy was determined, where small precipitation particles are homogeneously distributed in the aluminum matrix. The presence of pores and microcracks at the magnifications greater than 500x is visible. The highest corrosion resistance and increased hardness was achieved after solution annealing, cooling into water at 50 °C and with artificial aging parameters 150 °C/10 h/air.

Key words: precipitation hardening, aluminum alloy AlSi1MgMn, heat treatment, hardness, electrochemical corrosion, microstructure analysis

## 1. UVOD

Aluminij je element koji čini oko 8% Zemljine kore te je prisutan u većini stijena, glini, tlu i vegetaciji. U prirodi se nikad ne pojavljuje kao čisti metal, nego samo u spojevima s kisikom i ostalim elementima. Proizvodnja aluminija bazira se na temeljna dva procesa, Bayer procesu gdje se aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dobiva iz rude boksita te Hall/Héroult procesu pri kojem se aluminijev oksid otapa u rastopljenom kriolitu ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) pri čemu se iz otopina aluminij izlučuje elektrolizom [1].

Najvažnija svojstva po kojima je tehnički aluminij poznat jesu mala gustoća, dobra otpornost na koroziju te sposobnost poliranja do visokog sjaja, iako su jednako važna i ostala svojstva poput dobre električne i toplinske vodljivosti, dobre reflektivnosti svjetlosti te otpornosti na pojavu iskrenja. S obzirom da je čisti aluminij mekan te je samo osrednje čvrstoće, većinu primjene nalazi u legurama, u kojima se s dodatkom legirajućih elemenata povećava čvrstoća i tvrdoća. S porastom primjene aluminija u raznim industrijskim granama i njegovim prihvaćanjem kao izvrsne alternative čeliku u mnogim primjenama, postavljaju se sve veći zahtjevi na njegova specifična svojstva. Trenutno postoji više od 400 vrsta aluminijevih legura i kovanih vrsta tehnički čistog aluminija. Aluminijeve legure mogu se podijeliti u više skupina koje su utemeljene na proizvodnim postupcima prikladnim za njihovu obradu i osnovnom legirajućem elementu [2].

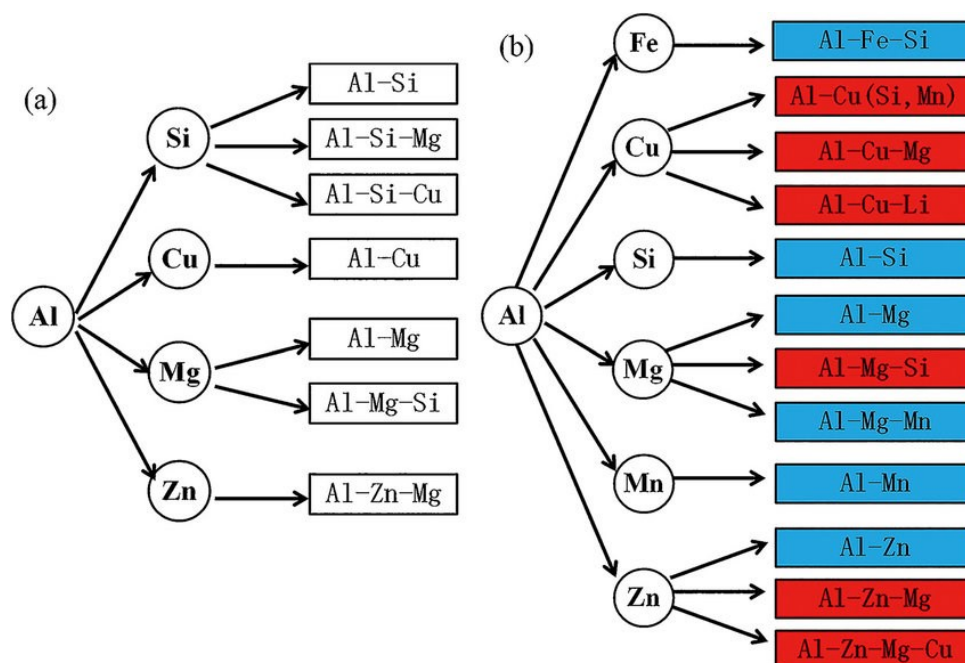
U radu se opisuje toplinska obrada precipitacijski očvršćivih kovanih aluminijevih legura (iz skupina EN-AW 20XX, EN-AW 60XX i EN-AW 70XX) te njihova specifična svojstva. Cilj rada je istražiti i pronaći optimalne parametre toplinske obrade za aluminijevu leguru  $\text{AlSi1MgMn}$ , oznake EN-AW 6082, koji će dati najbolju kombinaciju tvrdoće i korozijske postojanosti.

# **TEORIJSKI DIO**

## 2. SISTEMATIZACIJA I OČVRSNUĆE ALUMINIJEVIH LEGURA

### 2.1. Sistematizacija aluminijskih legura

Aluminijske legure su nakon željeza i čelika najviše korišteni materijal za izradu metalnih konstrukcija zbog svojstava poput male gustoće, visoke specifične čvrstoće, lake obrade, dobre korozijske otpornosti kao i izvrsne električne i toplinske vodljivosti. Primjenjuju se i razvijaju na području brodogradnje, zrakoplovstva, elektrotehnike, automobilske industrije te izrade oružja. Prema sastavu, mikrostrukturi i obradivosti, aluminijske legure mogu se podijeliti na lijevane i kovane. Udjel legirajućeg elementa u lijevanim legurama iznosi od 10 % do 12 %, dok kod kovanih legura iznosi od 1 % do 2% (iako u nekim slučajevima može biti najviše 6 % do 8 %). S obzirom na to može li legura biti precipitacijski očvrtnuta, aluminijske legure se mogu podijeliti na toplinski obradive i toplinski neobradive. Na slici 2.1 shematski je prikazana podjela aluminijskih legura (s pripadajućim legirajućim elementima), pri čemu su toplinski neobradive u plavom polju, dok su toplinski obradive u crvenom polju [3].



Slika 2.1 Podjela aluminijskih legura, (a) lijevane i (b) kovane [3]

Temeljna razlika između lijevanih i kovanih aluminijevih legura bazira se na načinu proizvodnje materijala; lijevane legure se proizvode otapanjem aluminijske legure u peći i izlivanjem u kalup, dok se kovane legure proizvode u čvrstom stanju uz pomoć specifičnih alata. Kovane i lijevane aluminijske legure namijenjene za različite industrijske primjene često sadrže jednake legirajuće elemente u različitim udjelima. Ljevano aluminijske legure sadrže veće udjele legirajućih elemenata u odnosu na kovane, dok im je vlačna čvrstoća obično manja uslijed nepravilnosti nastalih lijevanjem. U odnosu na kovane legure, njihova jedinična cijena je niža te se mogu proizvesti različiti oblici (zbog fleksibilnosti lijevanja u kalup) i dijelovi koji ne zahtijevaju značajnu dodatnu obradu. Također, neke specifične legure mogu se javljati isključivo u lijevanom stanju zbog niske duktilnosti. S druge strane, kovane aluminijske legure daju iznimna mehanička svojstva te se mogu vrlo jednostavno oblikovati u razne standardne oblike, a finalni proizvod se proizvodi valjanjem, kovanjem ili ekstrudiranjem. U odnosu na lijevane legure, kovane legure pokazuju niz prednosti poput izvrsnih mehaničkih svojstava, integriteta strukture, bolje obradivosti površine, jednostavnosti izrade (za zavarivanje ili daljnju obradu) itd. [4].

Na slici 2.2. prikazan je blok motora V8 od lijevane legure aluminijske A319 AlSiCu koja je toplinski obradiva, dok su na slici 2.3 prikazane šipke od kovane aluminijske legure 6061 T6.



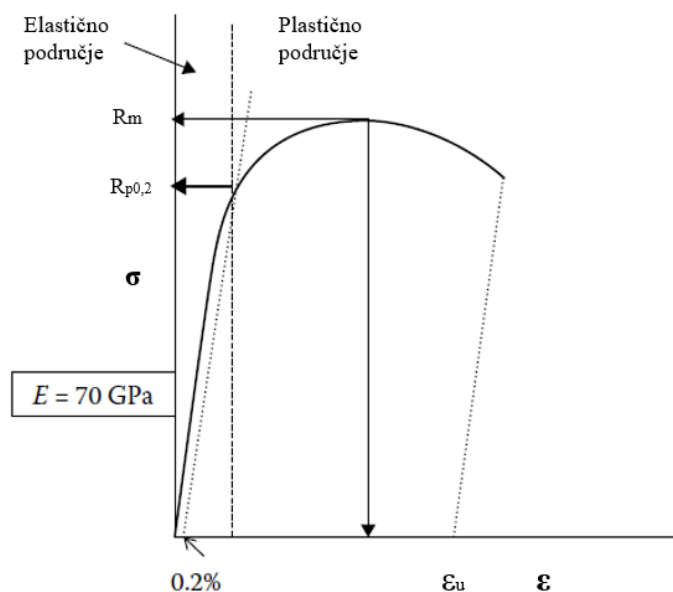
**Slika 2.2** Blok motora V8 od lijevane legure aluminijske A319 AlSiCu [5]



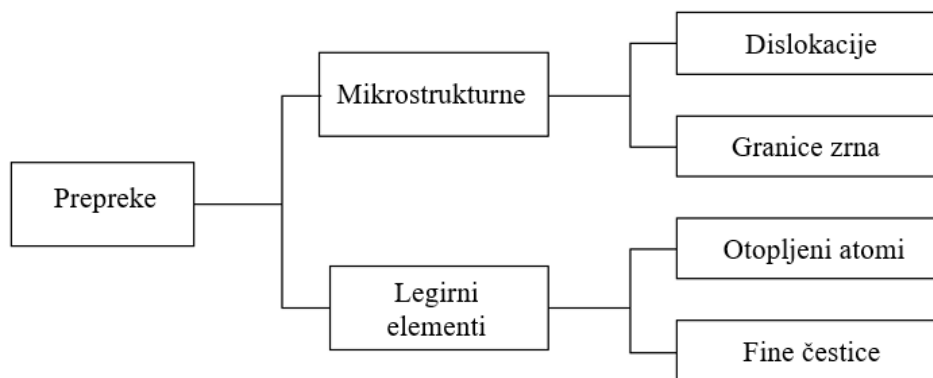
Slika 2.3 Šipke od kovane aluminijske legure 6061 T6 [6]

## 2.2. Mehanizmi očvrnuća aluminijskih legura

Na slici 2.4 prikazan je shematski dijagram naprezanje-istezanje nakon statičkog vlačnog ispitivanja aluminijske legure. Aluminij se plastično deformira iznad granice razvlačenja te je za njegovu daljnju deformaciju potrebno povećanje naprezanja. Na atomskoj razini, plastična deformacija se zbiva klizanjem dislokacija uzduž kristalografskih ravnina plošno centrirane kubične (FCC) kristalne rešetke. Naprezanje koje je potrebno za početak deformacije u teorijski savršenoj kristalnoj strukturi je zanemarivo. Granica razvlačenja tehnički čistog aluminija je posljedica postojanja atomskih i mikrostrukturnih nesavršenosti koje otežavaju gibanje dislokacija. Na slici 2.5 prikazana je shema osnovnih tipova nesavršenosti porijeklom od legirajućih elemenata i mikrostrukture [1].



Slika 2.4 Dijagram naprezanje - istezanje kod aluminijskih legura [1]



**Slika 2.5 Osnovni tipovi nesavršenosti u mikrostrukturi aluminija [1]**

Dislokacije uglavnom nastaju uslijed prethodne plastične deformacije pa je tako otpor novoj deformaciji rezultat prethodnih deformacija. Očvršnuće granicama zrna može se ostvariti usitnjavanjem zrna postupkom normalizacijskog ili rekristalizacijskog žarenja. Očvršnuće otopljenim atomima zahtijeva legiranje elementom visoke topivosti u aluminiju, dok očvršnuće česticama značajno ovisi o promjeru, rasporedu i obliku čestica, pri čemu je najmanja moguća čestica zasebni atom. Treba spomenuti kako se otpor gibanju dislokacija (kao i samo očvršnuće) smanjuje ako su u mikrostrukturi prisutne velike čestice. Tako čestice veličine nekoliko nanometara pokazuju najveću otpornost gibanju dislokacija, dok čestice veličine mikrometra ili veće pokazuju najmanju otpornost gibanju dislokacija (najmanje očvršnuće). To se zbiva zbog pojave velikih razmaka između tvrdih čestica uložene u duktilnu metalnu matricu, pri čemu ih dislokacije zaobilaze. Čestice koje očvršćuju legure obično su intermetalni spojevi aluminija i jednog ili više legirajućih elemenata. Stvaranje takvih čestica se razlikuje ovisno o tome mogu li se ili ne mogu otopiti u aluminiju na temperaturi ispod solidus linije (najniža temperatura djelomičnog taljenja legure). Netopive čestice (disperzije) pospješuju disperzijsko očvršnuće legura, dok se očvršnuće pomoću topivih čestica obično naziva precipitacijsko očvršnuće, a legure koje mogu očvršnuti na taj način nazivaju se toplinski obradive legure [1].

### 2.3. Sustav označavanja kovanih aluminijevih legura

Prema međunarodnom dogovoru (Aluminum Association, 2006) prva znamenka (Xxxx) u četveroznamenkastom sustavu označavanja kovanih aluminijevih legura označava osnovni legirajući element koji je dodan aluminijevoj leguri te se uobičajeno koristi kako bi se opisale skupine legura, npr. skupina 1000, skupina 2000, sve do skupine 8000 kako je prikazano u

tablici 2.1. Druga znamenka (xXxx), ukoliko je različita od nule, ukazuje na modifikaciju specifične legure, dok su treća i četvrta znamenka (xxXX) proizvoljni brojevi koji su dodijeljeni za prepoznavanje određene legure u skupini. Tako u leguri 5183 broj 5 ukazuje na skupinu legura s magnezijem, broj 1 ukazuje na prvu modifikaciju izvorne legure 5083, dok 83 definira leguru u skupini 5xxx. Jedina iznimka od ovog sustava označavanja nalazi se u kod skupini 1xxx u kojoj zadnje dvije znamenke označavaju najmanji maseni udjel aluminija iznad 99 %, npr. legura 1350 sadržava minimalno 99,50 % aluminija. Skupine aluminijevih legura s pripadajućim osnovnim legirajućim elementima prikazane su u tablici 2.1 [2].

**Tablica 2.1 Sustav označavanja kovanih aluminijevih legura [2]**

Skupina legura	Osnovni legirajući element
1xxx	Nijedan, minimalno 99,000 % čistog aluminija
2xxx	Bakar
3xxx	Mangan
4xxx	Silicij
5xxx	Magnezij
6xxx	Magnezij i silicij
7xxx	Cink i magnezij
8xxx	Ostali elementi



### 3. TOPLINSKA OBRADA ALUMINIJEVIH LEGURA

Toplinska obrada u najširem smislu odnosi se na sve postupke zagrijavanja i hlađenja koji se provode s ciljem promjene mehaničkih svojstava, mikrostrukture ili stanja zaostalih naprezanja u metalnom proizvodu. Kada se govori o aluminijskim legurama, toplinska obrada često je ograničena na specifične postupke koji se provode s ciljem povećanja čvrstoće i tvrdoće precipitacijski očvršćivih kovanih i lijevanih legura. Takve legure se obično nazivaju „toplinski obradive“ kako bi ih se razlikovalo od „toplinski neobradivih“, kod kojih nije moguće postići značajnije očvršćenje zagrijavanjem i hlađenjem, već im se čvrstoća povećava postupcima hladnog oblikovanja. Žarenje (rekristalizacijsko, za smanjenje zaostalih naprezanja) s ciljem smanjenja čvrstoće i povećanja duktilnosti koristi se kod toplinski obradivih i neobradivih aluminijskih legura, pri čemu se metalurške reakcije mogu razlikovati s obzirom na tip legure i traženi stupanj omekšanja [7].

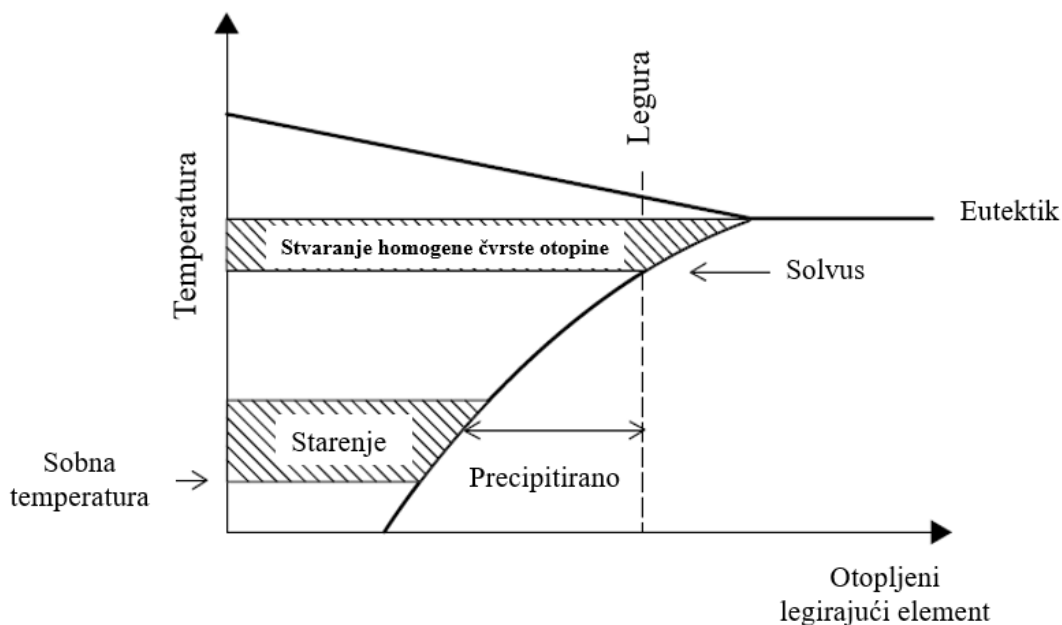
Legurama iz skupine toplinski obradivih legura povećava se čvrstoća dodavanjem legirajućih elemenata bakra, magnezija, cinka i silicija. S obzirom da ovi elementi s povećanjem temperature pokazuju povećanu topivost u krutom stanju, takve legure moguće je podvrgnuti toplinskoj obradi precipitacijskog očvršćenja [2].

Osim navedenih, važno je spomenuti i postupak homogenizacijskog žarenja koji se provodi nakon što se osnovni materijal otkuje, ekstrudira ili proizvede lijevanjem. Homogenizacijskim žarenjem se otklanjaju i eliminiraju nehomogenosti poput mikro i makro segregacija, neravnotežnih faza i mikrostrukturnih konstituenata, kao i zaostala naprezanja nastala zbog neravnotežne kristalizacije [8].

Dakle, aluminijske legure koje se toplinski obrađuju moraju sadržavati jedan ili više legirajućih elemenata u količinama koje premašuju njihovu topivost pri sobnoj temperaturi, dok se pri povišenim temperaturama legirni elementi mogu otopiti, što je prikazano shematski na slici 3.1. Toplinska obrada aluminijskih legura sastoji se od slijedeća tri koraka:

- I. Rastvornog žarenja – legura se ugrijava na temperaturu ispod eutektičke temperature pri čemu se supstitucijski legirajući elementi otapaju u čvrstom stanju u aluminijskoj matrici
- II. Gašenja – legura se brzo hladi (gasi) do sobne temperature, pri čemu zarobljeni legirajući elementi ostaju u nestabilnoj čvrstoj otopini aluminijskog kristala mješanca

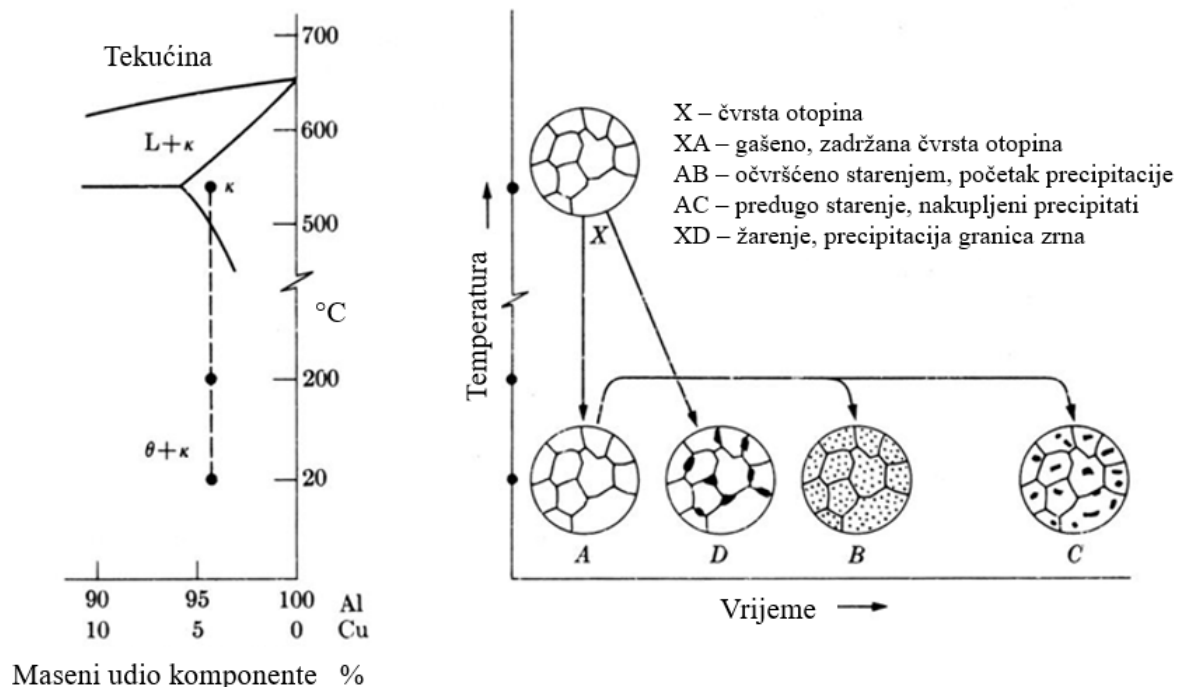
- III. Dozrijevanja – legura se ugrijava na odgovarajuću temperaturu i vrijeme, pri čemu legirajući elementi izlaze iz čvrste otopine i tvore intermetalne spojeve koji očvršćuju leguru [1]



**Slika 3.1 Shematski prikaz faznog dijagrama toplinski obradivih aluminijskih legura [1]**

U nastavku će se detaljnije objasniti svaki korak toplinske obrade aluminijskih legura. Dakle, u prvom koraku provodi se zagrijavanje, s ciljem otapanja eutektički skrućenih faza i ulaska legirajućih elemenata u čvrstu otopinu kristala mješavice aluminija. Temperature na kojima se provodi rastvorno žarenje nalaze se u intervalu od 441 °C do 527 °C, ovisno o tipu legure. Preporučuje se održavanje temperatura rastvornog žarenja unutar vrlo uskog raspona dozvoljenog odstupanja ( $\pm 10$  °C) kako bi legura poprimila specifična svojstva nakon očvršćavanja. Ukoliko je temperatura rastvornog žarenja preniska neće se postići maksimalna čvrstoća legure. Isto tako, ako je temperatura rastvornog žarenja previsoka postoji opasnost topljenja nisko topivih konstituenata (tzv. eutektičko topljenje) kod nekih aluminijskih legura, što ima za posljedicu pogoršanje svojstava. Čak i u slučaju kada ne dođe do topljenja, ukoliko su temperature rastvornog žarenja više od navedenih, može doći do promjene boje (oksidacije) površine i povećanja zaostalih naprezanja u predmetu tijekom gašenja. Cilj postupka rastvornog žarenja je postići maksimalnu koncentraciju otopljenih legirajućih elemenata unutar čvrste otopine, uključujući bakar, cink, magnezij i/ili silicij. Koncentracija i brzina otapanja ovih elemenata raste s povećanjem temperature. U slučaju legure 2024, gdje

je osnovni legirajući element bakar, pri temperaturi od 493 °C, bakar će se otopiti ili jednoliko raspršiti kroz čitavu čvrstu aluminijsku matricu. Na slici 3.2 prikazan je proces toplinske obrade Al-Cu legure s opisanim stadijima precipitacijskog očvrnuća [2].

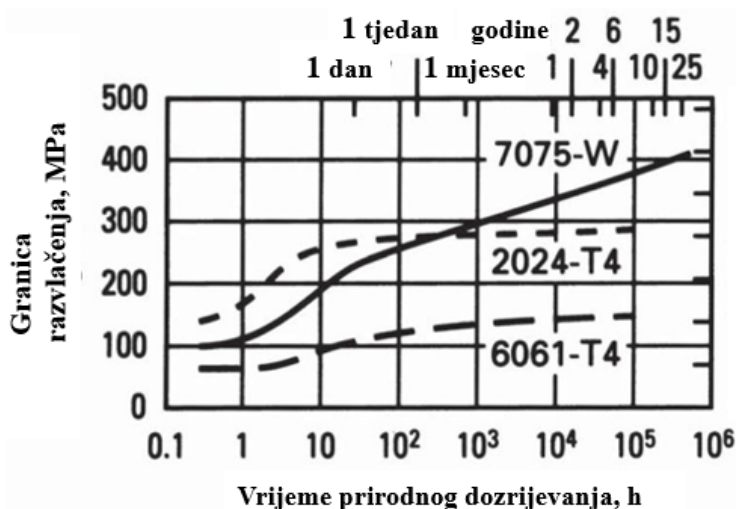


Slika 3.2 Proces toplinske obrade Al-Cu legure s opisanim stadijima [2]

Vrijeme držanja na nekoj temperaturi mjeri se od trenutka kad najhladniji dio predmeta dosegne minimalnu vrijednost zadane temperature žarenja (odnosno donju vrijednost preporučenog raspona temperature). Vrijeme držanja ovisi o tipu legure i debljini predmeta; od 10 minuta za tanke limove do oko 12 sati za teške kovane dijelove. Za teške dijelove nominalno vrijeme držanja na temperaturi homogenizacije iznosi približno 1 sat za svaka 2,5 cm debljine poprečnog presjeka. Potrebno je izabrati minimalno potrebno vrijeme držanja kako bi se postigla željena svojstva. Ukoliko je vrijeme držanja prekratko, konstituenti se neće potpuno otopiti u čvrstoj otopini, a s druge strane, predugačko vrijeme držanja povećava visokotemperaturnu oksidaciju legure [2].

Nakon rastvornog žarenja slijedi gašenje. Gašenje se uobičajeno provodi u vodi s intenzitetom dovoljnim da se otopljeni legirajući elementi zadrže u prisilnoj otopini aluminijskog kristala mješanca. Rastvorno žarena i gašena legura postaje lako obradiva odvajanjem čestica i deformacijom u hladnom stanju. Neki proizvođači zadržavaju strukturu u takvom stanju skladištenjem legura na temperaturama ispod nule do trenutka za daljnje oblikovanje.

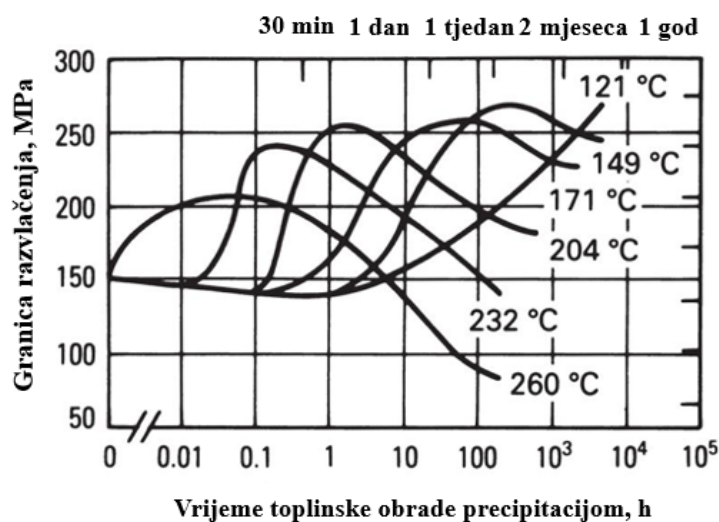
Međutim, većina rastvorno žarenih legura nije stabilna nakon gašenja pri sobnim ili povišenim temperaturama te u njima započinje precipitacija konstituenta (intermetalnih spojeva) iz prezasićene otopine. Nakon nekoliko dana na sobnoj temperaturi rastvorno žarena i gašena aluminijska legura postaje znatno čvršća, a taj proces se naziva prirodno dozrijevanje. Na slici 3.3 prikazane su krivulje prirodnog dozrijevanja triju toplinski obradivih aluminijskih legura s prikazom ovisnosti vrijednosti granice razvlačenja o vremenu dozrijevanja, pri čemu je vrijeme prikazano u logaritamskom mjerilu [2].



Slika 3.3 Krivulje prirodnog dozrijevanja triju toplinski obradivih legura [2]

Veliki broj toplinski obradivih aluminijskih legura postiže stabilno stanje pri sobnim temperaturama u kraćem vremenskom periodu (nakon nekoliko dana ili tjedana), ali neke legure, osobito one koje sadrže magnezij i silicij ili magnezij i cink nastavljaju očvršćivati dozrijevanjem na sobnoj temperaturi tijekom dužih vremenskih perioda. Kontroliranim zagrijavanjem pri blago povišenim temperaturama moguće je dodatno očvrstnuti toplinski obradive aluminijske legure te postići dugotrajnu stabilnost svojstava. Taj proces naziva se umjetno dozrijevanje ili precipitacijsko očvršćivanje. Koherentni i polukoherentni precipitati nastali umjetnim dozrijevanjem važniji su za tehničku primjenu od onih nastalih prirodnim dozrijevanjem zbog značajno boljih mehaničkih svojstava umjetno dozrijevanje aluminijske legure. Temperature na kojima se provodi precipitacijsko očvršćivanje ovise o samoj leguri te traženim svojstvima, a uobičajeno se nalaze u intervalu od 107 °C do 191 °C, pri čemu se temperatura umjetnog dozrijevanja mora precizno i točno regulirati unutar nekoliko stupnjeva ( $\pm 3$  °C) kako bi se postigli željeni rezultati. Na slici 3.4 prikazane su krivulje umjetnog dozrijevanja rastvorno žarene i gašene aluminijske legure 6061 (Al-Mg-Si) ovisne o

temperaturi i vremenu umjetnog dozrijevanja. Vrijeme držanja legure na određenoj temperaturi dozrijevanja (precipitacije) ovisi o temperaturi, traženim svojstvima i tipu legure te iznosi od 4 do 24 sata. Nakon umjetnog dozrijevanja dijelove treba polagano ohladiti na zraku do sobne temperature. Najveće očvršnuće postiže se s velikim brojem ravnomjerno izlučenih (precipitiranih) malih čestica, dok se s manjim brojem velikih čestica svojstva pogoršavaju, do čega dolazi ako je dozrijevanje bilo predugo. S odgovarajućom kombinacijom parametara toplinske obrade uz oblikovanje u hladnom stanju moguće je postići najveće vrijednosti čvrstoće toplinski obradivih aluminijskih legura. Čestice precipitata u toplinski obradivim aluminijskim legurama očvršćuju leguru na način da pridržavaju ili „zaključavaju“ gibanje praznina, dislokacija i granica zrna u mikrostrukтури legure. Način na koji metalurzi kontroliraju stvaranje precipitata određuje kakva će biti mehanička i korozivna svojstva pojedine aluminijske legure [2].



**Slika 3.4 Krivulje umjetnog dozrijevanja toplinski obrađene i gašene aluminijske legure 6061 [2]**

### 3.1. Prikaz i svojstva kovanih aluminijskih legura

Toplinski obrađene (precipitacijski očvršćive) aluminijske legure obuhvaćaju legure iz skupina 2xxx, 6xxx, 7xxx te neke legure iz skupine 8xxx. Različite kombinacije legirajućih elemenata i mehanizmi očvršćivanja koji se koriste kod obrade kovanih aluminijskih legura prikazani su u tablici 3.1, dok su u tablici 3.2 prikazane vrijednosti čvrstoće koje se mogu postići kod različitih tipova legura [9].

**Tablica 3.1 Prikaz kovanih aluminijevih legura prema mehanizmu očvršćivanja [9]**

Sastav legure	Skupina aluminijeve legure
<b>Legure očvršćive hladnim oblikovanjem</b>	
Čisti Al	1xxx
Al-Mn	3xxx
Al-Si	4xxx
Al-Mg	5xxx
Al-Fe	8xxx
Al-Fe-Ni	8xxx
<b>Precipitacijski očvršćive legure</b>	
Al-Cu	2xxx
Al-Cu	2xxx
Al-Cu-Li	2xxx
Al-Mg-Si	6xxx
Al-Zn	7xxx
Al-Zn-Mg	7xxx
Al-Zn-Mg-Cu	7xxx
Al-Li-Cu-Mg	8xxx

**Tablica 3.2 Raspon vlačnih čvrstoća raznih kovanih aluminijevih legura [9]**

Skupina aluminijeve legure	Sastav legure	Metoda očvršćivanja	Raspon vlačnih čvrstoća, MPa
1xxx	Al	Hladno oblikovanje	70-175
2xxx	Al-Cu-Mg (1-2,5% Cu)	Toplinska obrada	170-310
2xxx	Al-Cu-Mg-Si (3-6% Cu)	Toplinska obrada	380-520
3xxx	Al-Mn-Mg	Hladno oblikovanje	140-280
4xxx	Al-Si	Hladno oblikovanje	105-350
5xxx	Al-Mg (1-2,5% Mg)	Hladno oblikovanje	140-280
5xxx	Al-Mg-Mn (3-6% Mg)	Hladno oblikovanje	280-380
6xxx	Al-Mg-Si	Toplinska obrada	150-380
7xxx	Al-Zn-Mg	Toplinska obrada	380-520
8xxx	Al-Zn-Mg-Cu	Toplinska obrada	520-620
2xxx	Al-Li-Cu-Mg	Toplinska obrada	280-560

U uobičajenoj industrijskoj primjeni koristi se relativno mali broj intermetalnih spojeva koji precipitiraju u aluminijevim legurama. Popis precipitacijski izlučenih faza i skupina aluminijevih legura u kojima se javljaju naveden je u tablici 3.3 [1].

U nastavku će biti detaljnije opisana toplinska obrada aluminijevih legura iz skupina 20xx, 60xx i 70xx.

**Tablica 3.3 Faze precipitacijskog očvrnuća i skupine legura u kojima se javljaju [1]**

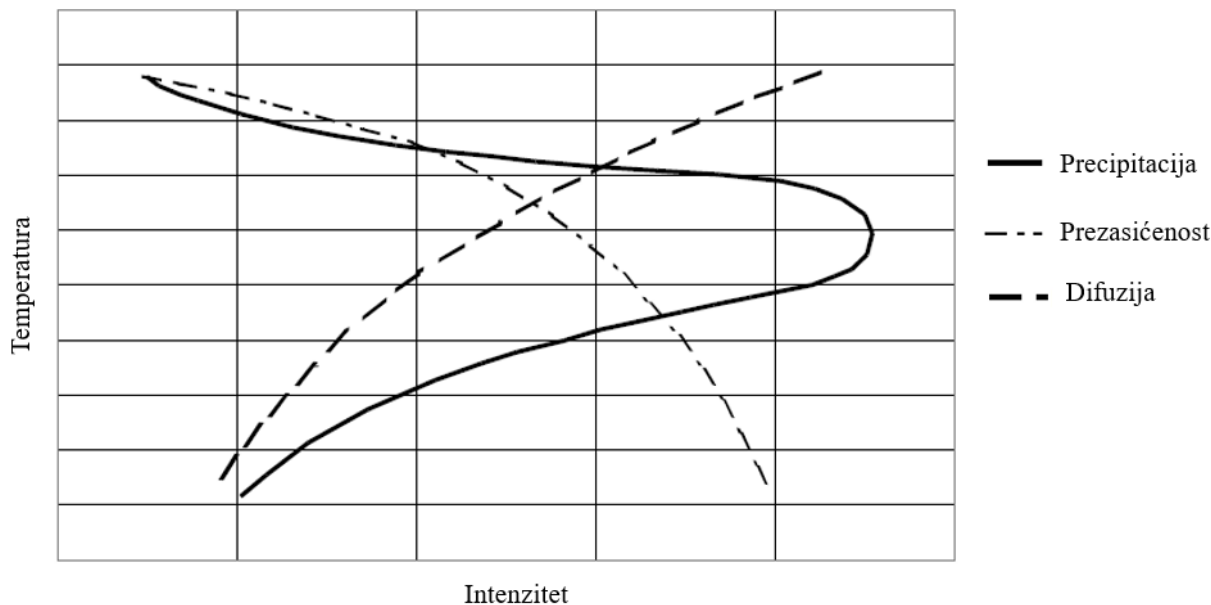
Faza	Elementi	Osnovna formula	Skupina kovane legure
$\theta'$	Al-Cu	$Al_2Cu$	2xxx
$S'$	Al-Cu-Mg	$Al_2CuMg$	2xxx
T1	Al-Cu-Li	$Al_2CuLi$	2xxx (Li)
$\beta''$	Mg-Si	$Mg_5Si_6$	6xxx
$Q''$	Al-Cu-Mg-Si	??	2xxx, 6xxx
$\eta'$	Al-(Cu)-Mg-Zn	$\sim(Al,Cu)MgZn_2$	7xxx

### 3.1.1. Utjecaj intenziteta gašenja na svojstva aluminijevih legura

Osnovni cilj gašenja je što bolje očuvati čvrstu otopinu nastalu rastvornim žarenjem, što se postiže naglim hlađenjem do sobne temperature. Tako čvrsta otopina ostaje u prezasićenom stanju te zadržava dovoljni broj praznina potrebnih za naknadno stvaranje precipitata. Ukoliko su brzine gašenja premale da zadrže otopljene elemente u čvrstoj otopini ili potrebnu koncentraciju praznina, tada će se otopljeni elementi ili njihovi spojevi istaložiti na granicama zrna ili na disperzijskim česticama. S povećanjem broja precipitacijskih čestica nastalih tijekom gašenja, smanjuje se mogućnost naknadnog očvrnuća, zbog toga što otopljene čestice koje precipitiraju iz čvrste otopine tijekom gašenja ne mogu dalje precipitirati na sobnoj temperaturi. Ova pojava rezultira nižom vlačnom čvrstoćom, granicom razvlačenja te nižom duktilnosti i lomnom žilavosti. Najveća brzina gašenja dati će najbolju kombinaciju čvrstoće i žilavosti kao i najveću otpornost na opću i napetosnu koroziju. Međutim, treba uzeti u obzir da se s povećanjem brzine gašenja javljaju veća zaostala naprezanja i izvitoperenje te stoga treba pronaći optimalnu brzinu gašenja (tzv. kritičnu brzinu gašenja) s kojom se postižu tražena svojstva [10].

Precipitacija intermetalnih spojeva tijekom gašenja može se objasniti pomoću teorije nukleacije koja je primijenjena na kemijske reakcije u čvrstoj otopini koje su određene procesima difuzije. Brzina precipitacije tijekom gašenja ovisi o stupnju prezasićenosti otopljenog elementa i njegove difuzije ovisne o temperaturi. Brzim hlađenjem rastvorno žarene aluminijeve legure javlja se sve veća prezasićenost čvrste otopine aluminijevog kristala mješanca i legiranih elemenata, dok se brzina difuzije snižava sa sniženjem temperature. Kada je niski intenzitet difuzije ili stopa prezasićenja, brzina precipitacije je također mala. Na srednjim temperaturama prezasićenje je relativno visoko isto kao i brzina difuzije, stoga je brzina precipitacije najveća upravo na srednjim temperaturama što se može vidjeti na slici 3.5

na kojoj je shematski prikazan dijagram ovisnosti intenziteta difuzije, precipitacije i prezasićenosti o temperaturi. Vrijeme koje rastvorno žarena aluminijska legura provede u ovom kritičnom temperaturnom rasponu regulirano je brzinom gašenja [11].



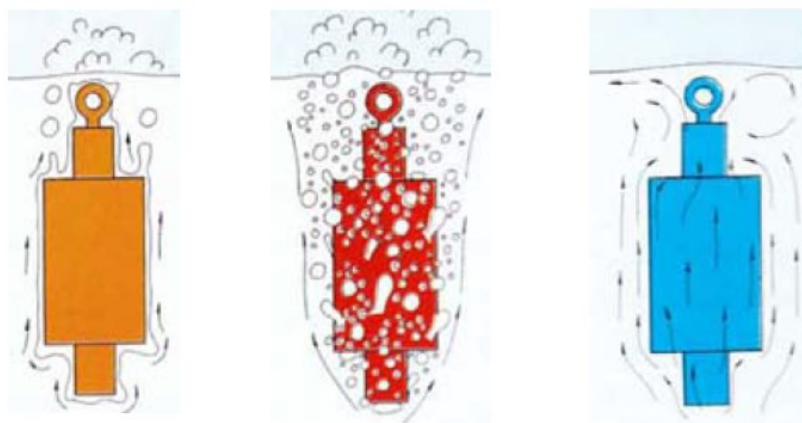
**Slika 3.5 Shematski dijagram ovisnosti temperature o intenzitetu difuzije, precipitacije i prezasićenosti [11]**

Brzina gašenja ovisi o vrsti sredstva za gašenje, brzini gibanja i temperaturi sredstva. Uobičajeno sredstvo za gašenje aluminijskih legura je čista voda ili vodena otopina polimera. Oba sredstva podliježu Leidenfrostovom efektu s pojavom tri karakteristične faze u prijelazu topline s predmeta na sredstvo za gašenje:

- I. Faza parnog omotača – prisutna na početku čim se obradak uroni u sredstvo za gašenje pri čemu se oko obratka stvara parni omotač koji sprječava odvođenje topline te je brzina ohlađivanja u ovoj fazi vrlo niska
- II. Faza vrenja – nastupa uz raskidanje parnog omotača, pri čemu dolazi do najvećeg odvođenja topline iz obratka uz pojavu maksimalne brzine gašenja
- III. Faza hlađenja konvekcijom – pojavljuje se na završetku gašenja kad se temperatura obratka snizi ispod temperature vrelišta sredstva za gašenje [12]

Shematski prikaz navedenih faza pri gašenju u vodi dan je na slici 3.6, dok su na slici 3.7 prikazani dijagrami ohlađivanja s označenim fazama gašenja.



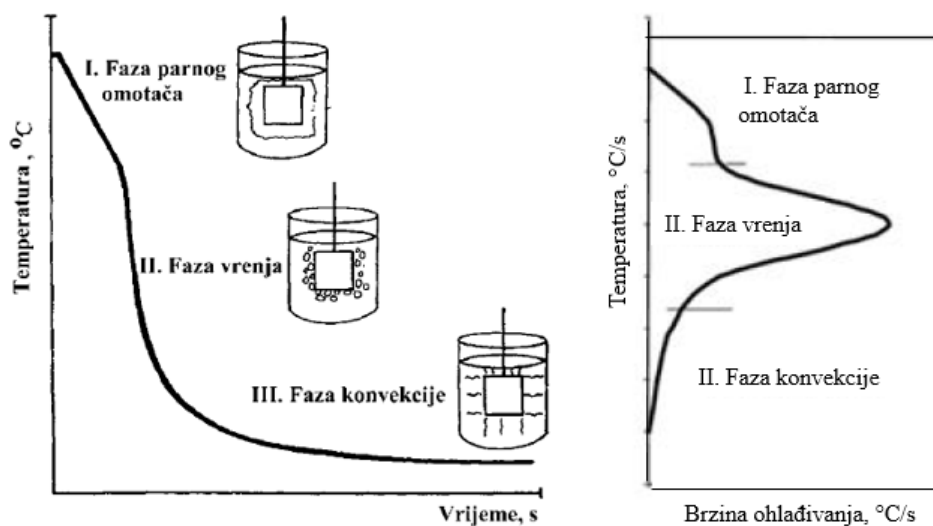


I. Faza parnog omotača

II. Faza vrenja

III. Faza hlađenja konvekcijom

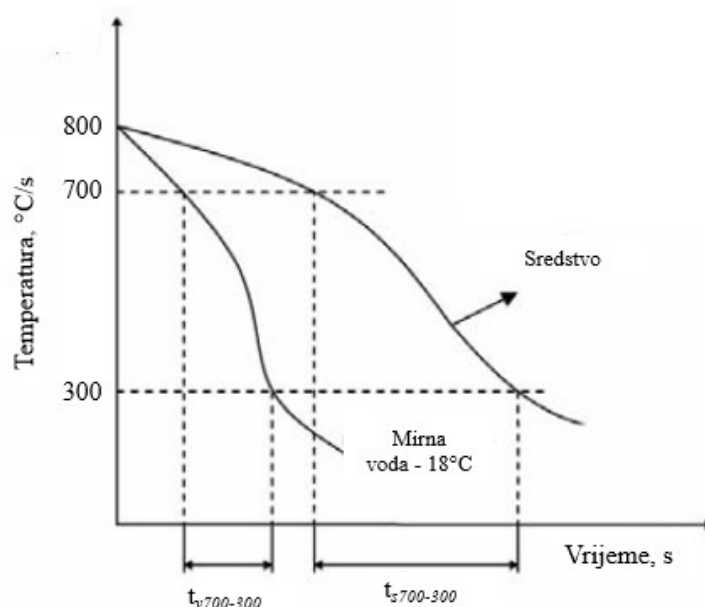
Slika 3.6 Shematski prikaz Leidenfrostovih faza gašenja [12]



Slika 3.7 Krivulje gašenja s fazama gašenja [12]

Intenzitet gašenja  $H$  daje podatak o omjeru brzine gašenja u mirnoj vodi na temperaturi od  $18^{\circ}\text{C}$  (eksperimentalno dogovoreno) u odnosu na brzinu gašenja u određenom sredstvu, a određuje se pomoću snimljenih krivulja gašenja kako je prikazano na slici 3.8. Na slici je prikazan shematski dijagram gašenja u mirnoj vodi i nekom sredstvu iz kojeg se očitavaju određeni podaci potrebni za izračun intenziteta  $H$  prema izrazu [12]:

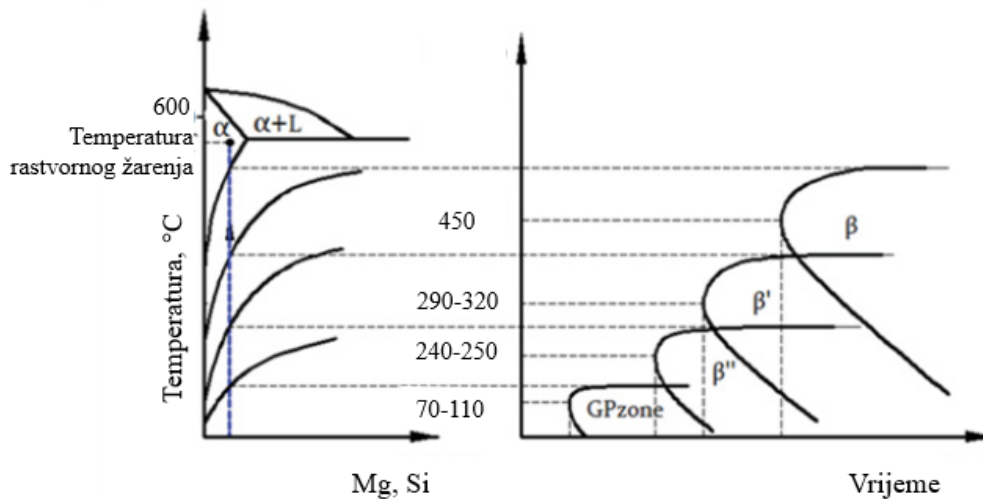
$$H_{\text{sredstva}} = \frac{\Delta t_{\text{mirnevode } 18^{\circ}\text{C}, 700^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}}}{\Delta t_{\text{sredstva } 700^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}}} \quad (4)$$



**Slika 3.8** Određivanje intenziteta gašenja nekog sredstva za gašenje [12]

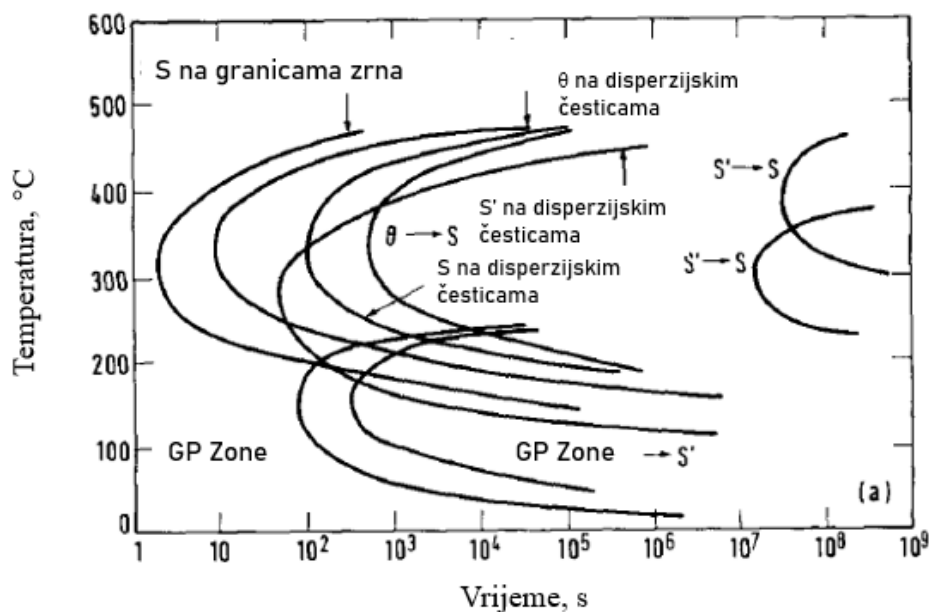
Ukoliko se precipitacijski očvrstiva aluminijska legura nakon rastvornog žarenja presporo hladi, doći će do (neželjene) precipitacije tijekom hlađenja, kao što je već bilo spomenuto. To se mora u potpunosti eliminirati kako bi se postigla najviša moguća čvrstoća umjetno starene legure. Hlađenje mora biti dovoljno brzo kako bi spriječilo precipitaciju, ali ne preintenzivno kako ne bi došlo do povećanja zaostalih naprezanja i distorzije oblika. Kako bi se ovi zahtjevi zadovoljili, hlađenje rastvorno žarene legure se mora provesti brzinom iznad kritične brzine gašenja. U slučaju aluminijskih legura kritična brzina gašenja je najmanja brzina gašenja pri kojoj još uvijek ne dolazi do precipitacije nekoherentnih precipitata. Utjecaj brzine gašenja na pojavu precipitacijske reakcije opisuje se kontinuiranim (TTP, engl. *Time Temperature Precipitation*) dijagramima hlađenja. Pomoću njih se može optimizirati faza gašenja toplinski očvrstive legure [13].

Za svaku aluminijsku leguru postoji specifičan TTP dijagram s obzirom da svaka legura ima različiti sastav i legirajuće elemente. Svrha toplinske obrade aluminijskih legura je postizanje odgovarajućih precipitata na nanometarskoj razini s obzirom da se mehanička svojstva legura mijenjaju s udjelima određenih precipitata u mikrostrukturi. Precipitacijske faze koje se javljaju u legurama su različite s obzirom na temperature toplinske obrade. Na slici 3.9 shematski je prikazan je fazni dijagram i TTP (engl. *Time Temperature Precipitation*) s krivuljama primarnih precipitata u aluminijskoj leguri 6082 [14].



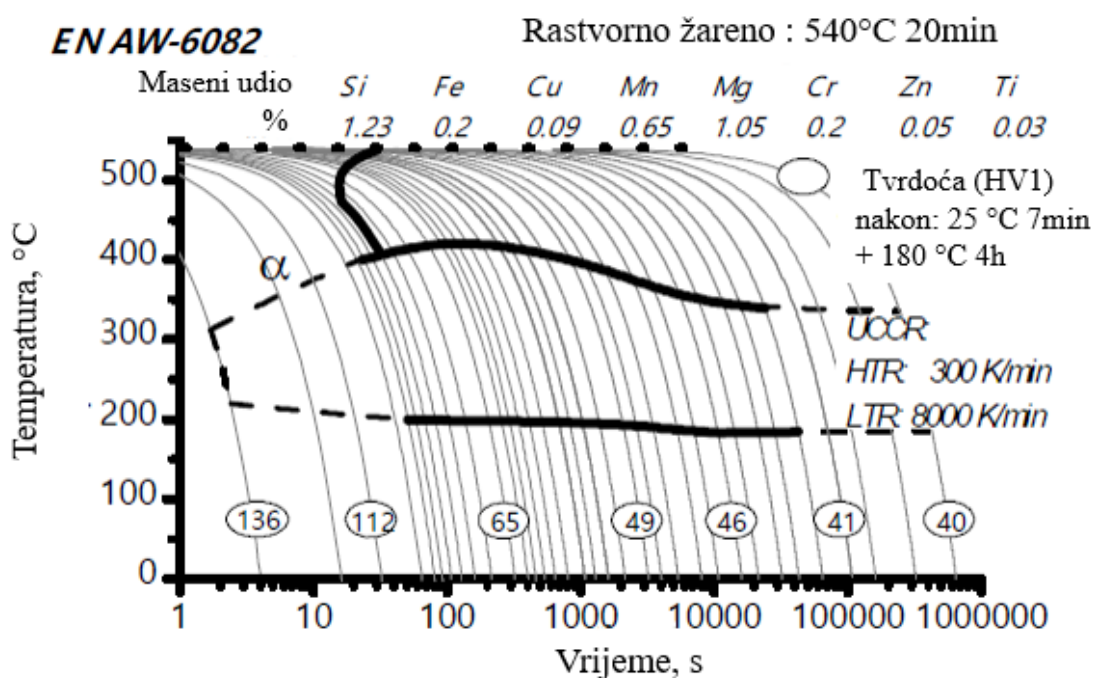
**Slika 3.9** Shematski prikaz faznog dijagrama i TTP precipitacijskih krivulja za aluminijevu leguru 6082 [14]

TTP dijagrami za aluminijeve legure analogni su TTT (engl. *Time Temperature Transformation*) dijagramima za čelike. U tipičnim komercijalnim legurama može se stvoriti mnogo različitih precipitata, a ovisno o specifičnoj fazi, mogu se stvoriti na granicama zrna ili na međufaznim granicama kako je prikazano na TTP dijagramu za aluminijevu leguru 2024 na slici 3.10. Unatoč njihovoj važnosti u razumijevanju precipitacijskih reakcija, TTP dijagrami aluminijevih legura se rijetko konstruiraju zbog dugotrajnog postupka snimanja i određivanja vrste i udjela precipitata, a isto tako ne mogu se koristiti za određivanje mehaničkih svojstava za razliku od TTT dijagrama za čelike [15].



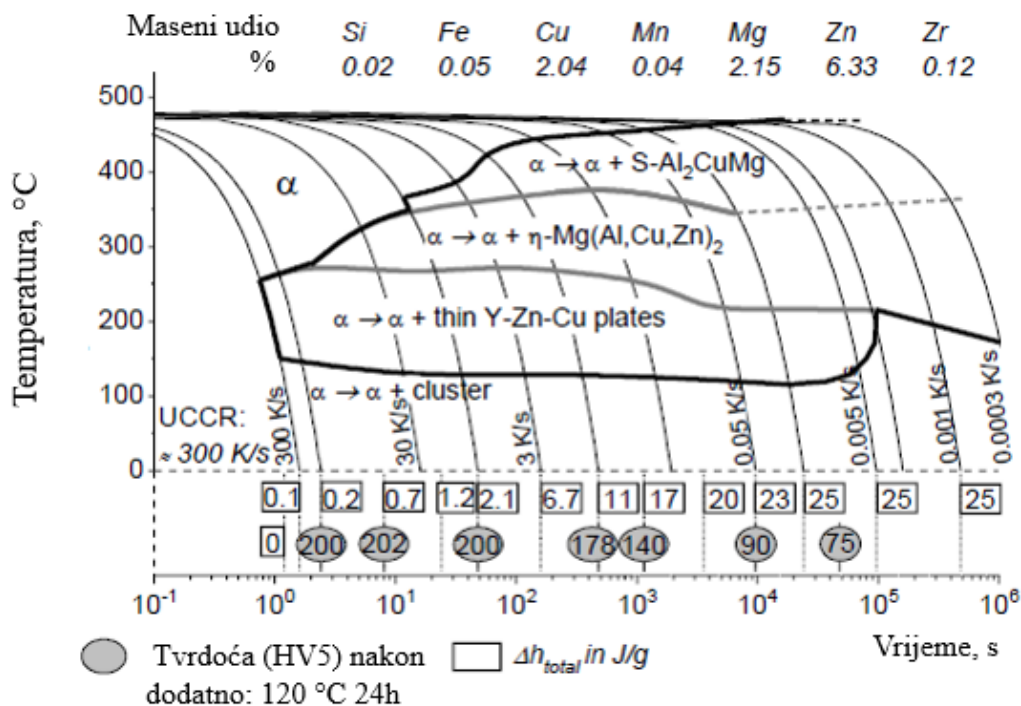
**Slika 3.10** TTP dijagram za aluminijevu leguru 2024 [15]

Kontinuirani dijagrami hlađenja (CCP, engl. Continuous Cooling Precipitation) aluminijevih precipitacijski očvršćivih legura opisuju ponašanje aluminijevih legura (i pojavu precipitata) tijekom hlađenja s temperature rastvornog žarenja u ovisnosti o temperaturi i vremenu hlađenja. Oni bi mogli potencijalno postići jednaku razinu važnosti kao i kontinuirani dijagrami hlađenja čelika, međutim vrlo je mali broj konstruiranih dijagrama za aluminijeve legure koji trenutno postoje. Takvi eksperimentalno određeni dijagrami daju mogućnost analize utjecaja različitih brzina gašenja na tvrdoću starene legure. U njima su označene početne i završne temperature precipitacije i izlučeni precipitati. Na slici 3.11 prikazan je CCP dijagram aluminijeve legure EN AW-6082 s pripadajućim sastavom nakon rastvornog žarenja u trajanju od 20min pri temperaturi 540 °C te umjetnog starenja u trajanju od 4 h pri temperaturi 180 °C [16].



Slika 3.11 CCP dijagram aluminijeve legure EN AW-6082 [16]

Na slici 3.12 prikazan je CCP dijagram za aluminijevu leguru EN AW-7150 s nekoliko krivulja gašenja i pripadajućim tvrdoćama te specifičnim precipitacijskim entalpijama [17].

**EN AW-7150** Kontinuirano hlađenje nakon rastvornog žarenja: 480 °C 60min


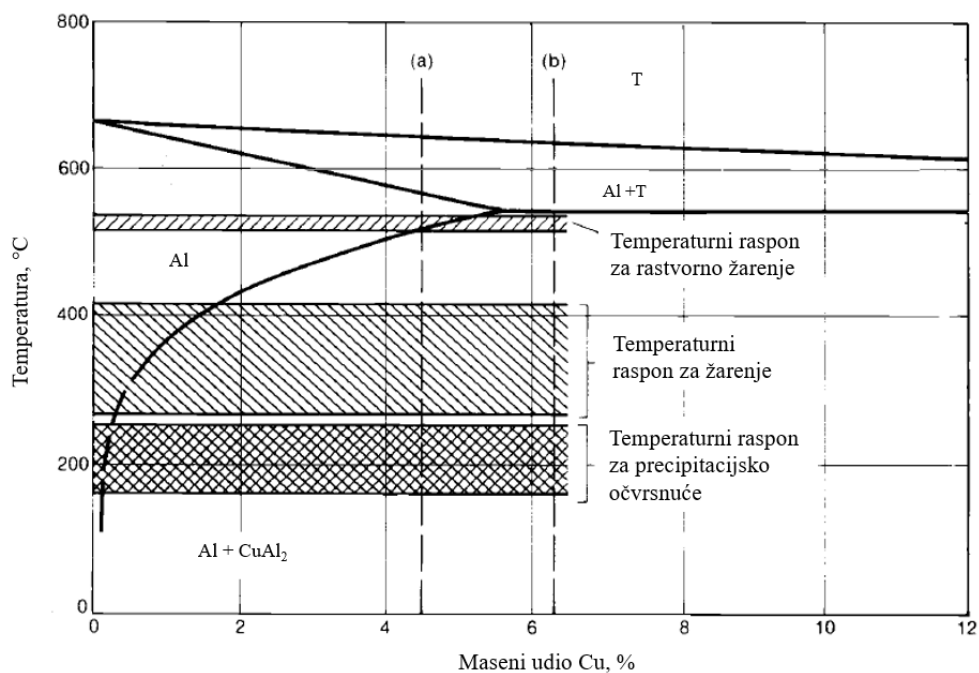
Slika 3.12 CCP dijagram aluminijske legure EN AW-7150 [17]

**3.1.2. Toplinska obrada aluminijskih legura iz skupine EN-AW-20xx**

Glavni legirajući element aluminijskih legura iz skupine 2xxx je bakar, a često je prisutan i magnezij kao sekundarni element. Ove legure zahtijevaju rastvorno žarenje za postizanje optimalnih svojstava, a u stanju nakon žarenja pokazuju slična, a ponekad i bolja mehanička svojstva u odnosu na niskougljični čelik. U nekim slučajevima se zbog dodatnog poboljšanja mehaničkih svojstava legure iz skupine 2xxx precipitacijski očvršćuju, pri čemu se povećava granica razvlačenja uz gubitak istezljivosti, dok samo povećanje vlačne čvrstoće nije značajnije izraženo. Legure iz skupine 2xxx nemaju tako dobru otpornost na koroziju kao većina drugih aluminijskih legura te u određenim uvjetima mogu biti podložne interkristalnoj koroziji. Zbog toga se limovi od legura 2xxx obično prevlače aluminijom visoke čistoće, magnezij-silicij legurama iz skupine 6xxx ili legurama koje sadrže 1 % cinka. Prevlake pružaju galvansku zaštitu jezgre materijala te značajno povećavaju otpornost na koroziju. Legure iz skupine 2xxx posebno su prikladne za dijelove i strukture koji zahtijevaju visoki omjer čvrstoće i gustoće te se često koriste za izradu kotača kamiona i zrakoplova, za komponente ovjesa kamiona, za trup i obloge krila zrakoplova, strukturne dijelove i one dijelove koji zahtijevaju dobru čvrstoću pri temperaturama do 150 °C.

U nastavku će se sažeto opisati specifična primjena nekoliko legura iz skupine EN-AW 20xx. U ovoj skupini ističe se legura 2011 koja se koristi za izradu vijaka, strojnih dijelova, raznih aparata, oružja, zatvarača te dijelova automobila, elektronike i kućišta strojeva. Legura 2014 se koristi za izradu okvira kamiona, dijelova zrakoplova, u automobilskoj industriji, za izradu klipova i cilindara te raznih dijelova strojeva. Za izradu sitnih strojnih dijelova, vijaka i ojačanja koristi se legura 2017. Legura 2024 primjenjuje se za izradu dijelova visoke čvrstoće poput kotača kamiona, dijelova zrakoplova, zupčanika, vijaka strojnih dijelova, dijelova automobila, cilindara i klipova, zatvarača, oružja, zakovica itd. [9].

Legure iz skupine EN-AW-20xx očvršćavaju precipitacijom spojeva s bakrom. Na slici 3.13 prikazan je dio binarnog Al-Cu dijagrama s temperaturnim rasponima za postupke rastvornog žarenja, rekristalizacijskog žarenja i precipitacijskog dozrijevanja. Na dijagramu se vidi da je raspon temperatura za rastvorno žarenje ispod eutektičke temperature od 548 °C. Eutektički maseni udio bakra iznosi 5,65 % Cu [7].

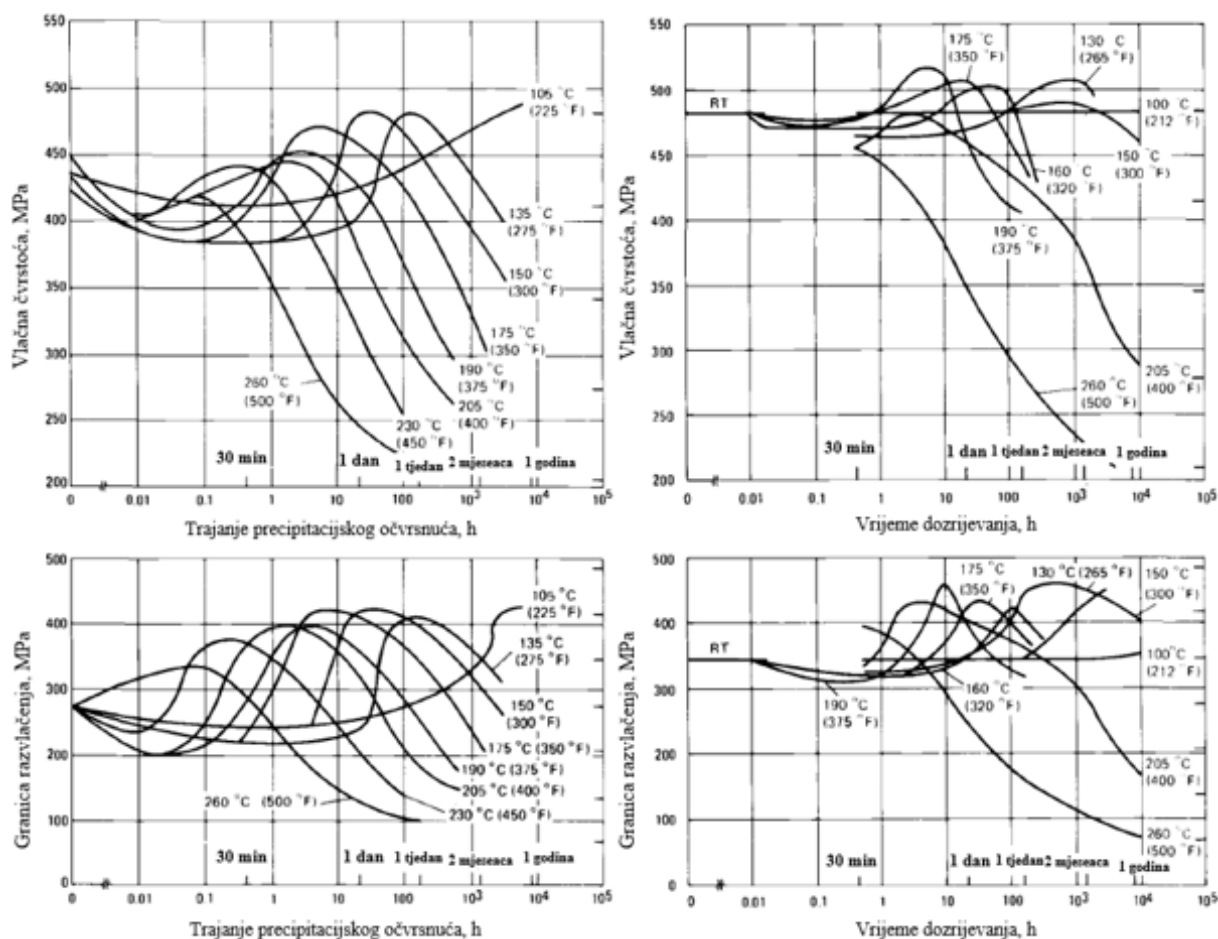


**Slika 3.13 Binarni dijagram Al-Cu s temperaturama toplinske obrade [7]**

Ravnotežna topivost bakra u čvrstoj otopini aluminija prema dijagramu sa slike 3.13 povećava se s 0,20 % na temperaturi od 250 °C do maksimalno 5,65 % na temperaturi od 548 °C (eutektička temperatura). Za Al-Cu legure koje sadrže od 0,20 % do 5,65 % Cu moguća su dva različita ravnotežna stanja čvrste otopine Al-Cu. Na temperaturama ispod donje krivulje (solvus) bakar je potpuno topiv te se uz dovoljno dugo držanje (zbog difuzije)

potpuno otapa u čvrstoj otopini alfa kristala mješanca aluminija. Na temperaturama ispod solvusa ravnotežno stanje sastoji se od dviju čvrstih faza: čvrste otopine  $\alpha$  i faze intermetalnog spoja  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ). Držanjem legure iznad solvusa legura se nalazi u potpuno čvrstoj otopini te naglim spuštanjem temperature ispod solvusa, čvrsta otopina postaje prezasićena te legura teži postizanju ravnotežnog dvofaznog stanja, pri čemu se precipitacijom iz čvrste otopine izlučuje  $\text{Al}_2\text{Cu}$  faza [7].

Mehanička svojstva i ostale karakteristike aluminijevih Al-Cu legura se neprestano mijenjaju ovisno o temperaturi i trajanju umjetnog dozrijevanja što se može vidjeti na slici 3.14 na kojoj su prikazani dijagrami ovisnosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja o vremenu precipitacijskog očvršćivanja aluminijevih legura 2014 i 2024. Za svaku leguru potrebna je specifična kombinacija svojstava te je nužno izabrati optimalne parametre toplinske obrade kako bi se postigla tražena kombinacija svojstva [7].



Slika 3.14 Dijagrami aluminijevih legura 2014 (lijevo) i 2024 (desno) ovisnosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja o vremenu dozrijevanja [7]

Aluminijeva legura 2024 ima dobru obradivost i oblikovljivost, visoku čvrstoću te lošu korozijsku postojanost i zavarljivost. U usporedbi s ostalima legurama, npr. legurom 6061 ima veću granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću, dok s druge strane legura 6061 ima bolju korozijsku postojanost, lakše je zavarljiva i obradiva. Isto tako, precipitacijski očvršćena legura 7075 ima veću čvrstoću od legure 2024 te je ona predviđena za primjenu gdje su prisutna visoka naprezanja i deformacije. S druge strane, legura 2024 se koristi za primjenu gdje je potrebna visoka otpornost na ciklički umor [18].

### **3.1.3. Toplinska obrada aluminijevih legura iz skupine EN-AW-60xx**

Aluminijeve legure iz skupine 6xxx sadrže silicij i magnezij u omjerima dovoljnim za formiranje magnezijevog silicida ( $Mg_2Si$ ), što ih čini toplinski obradivima. Iako nemaju veliku čvrstoću kao većina aluminijevih legura iz skupina 2xxx i 7xxx, imaju vrlo dobru oblikovljivost, zavarljivost, obradivost te su srednje čvrstoće uz prisutnu izvrsnu korozijsku postojanost. Toplinski obradive aluminijeve legure iz ove skupine su precipitacijski očvršćive. Ekstrudirani proizvodi iz ove skupine legura su prvi izbor za izradu dijelova arhitekture te dijelova raznih konstrukcija. Najrašireniju primjenu iz ove skupine ima legura 6061 [2, 9].

Legura 6061 nalazi primjenu u širokom području pa se koristi za izradu dijelova kamiona, zrakoplova, željezničkih vagona, za izradu cjevovoda, namještaja, kemijske opreme, žice ograde, lopatica ventilatora, oružja, dijelova strojeva, znakova na cesti, spremnika za skladištenje, medicinske opreme itd. Isto tako, primjenu nalazi i u brodogradnji, poljoprivredi, arhitekturi te električnoj i elektroničkoj industriji. Legura 6063 ima sličnu primjenu te se koristi za izradu cijevnih ograda, namještaja, dijelova automobila, znakova na cesti, cijevi, vagona, električnih i elektroničkih dijelova, za rekreacijsku i medicinsku opremu, te za izradu rekreacijskih vozila, kamiona i prikolica [9].

Kao što je već bilo prije spomenuto, legure iz skupine 6xxx sadrže silicij i magnezij, a u tablici 3.4. prikazan je kemijski sastav najčešće korištenih legura iz skupine 6000.



**Tablica 3.4 Kemijski sastav najčešće korištenih legura iz skupine 6000 [19]**

Legura	Si (%)	Mg (%)
6005	0,60 - 0,90	0,40 - 0,60
6063	0,20 - 0,60	0,45 - 0,90
6061	0,40 - 0,80	0,80 - 1,2
6106	0,30 - 0,60	0,40 - 0,80
6082	0,70 - 1,3	0,60 - 1,2

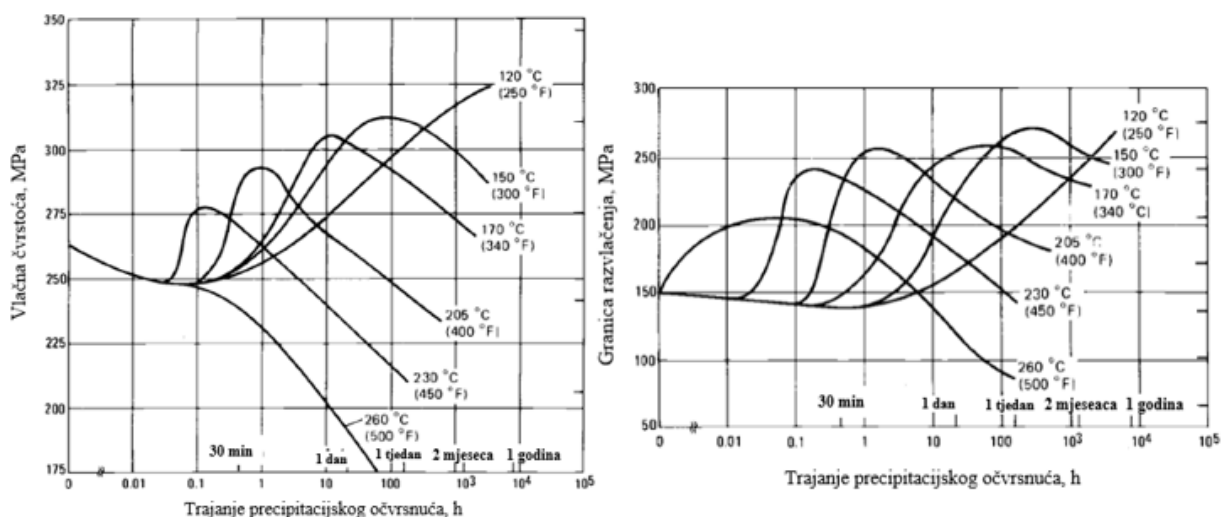
Legure iz skupine 6000 su tipične toplinski obradive aluminijske legure koje pomoću toplinske obrade očvršćuju više nego pomoću mehaničke deformacije. Glavni elementi ovih legura su magnezij i silicij, koji formiraju  $Mg_2Si$  precipitate, a ti precipitati javljaju se u oblicima koji se mogu podijeliti u slijedeće tri skupine:

- Koherentni precipitati ( $\beta''$ ,  $Mg_2Si$ ) – pojavljuju se kao najmanje  $Mg_2Si$  precipitacijske čestice štapičastog oblika, a najviše doprinose poboljšanju mehaničkih svojstava kada su gusto raspršene
- Djelomično koherentni precipitati ( $\beta'$ ,  $Mg_2Si$ ) – predstavljaju veću „verziju“ štapičasto oblikovanih precipitata koji su nastali od precipitata  $\beta''$ , a daju zanemariv doprinos poboljšanju mehaničkih svojstava
- Nekoherentni precipitati ( $\beta$ ,  $Mg_2Si$ ) – pojavljuju se kao najveće  $Mg_2Si$  precipitacijske čestice nalik kockama koje zbog svoje veličine ne doprinose poboljšanju mehaničkih svojstava

Precipitacijsko očvršnuće aluminijskih legura iz skupine 6xxx sastoji se od dva koraka, rastvornog žarenja i dozrijevanja. Rastvorno žarenje provodi se povećanjem temperature legure na 580 °C pri kojoj se legura drži približno sat vremena kako bi se otopili legirajući elementi (u ovom slučaju Mg i Si) u čvrstoj otopini aluminijskog kristala mješanca. Nakon toga slijedi gašenje u vodi s ciljem zadržavanja legirajućih elemenata kako ne bi precipitali pri hlađenju. Tako se dobiva čvrsta otopina magnezija, silicija i ostalih elemenata u aluminiju pri sobnoj temperaturi, a takvo stanje definirano je oznakom T4. Ako se legura nakon toga toplinski obrađuje pri temperaturama između 150 °C i 200 °C, legirajući elementi počinju stvarati uređeni niz atoma u aluminijskoj matrici. Takvi nizovi se zovu Guinier-Preston (GP) zone i značajno očvršćuju aluminij. Opisana toplinska obrada je dozrijevanje, a stanje legure nakon dozrijevanja definirano je oznakom T6 [19].

Svaki tip legure koristi različite parametre toplinske obrade pa stoga posjeduju različita svojstva. Dva su faktora koja značajno utječu na mehanička svojstva legura; udjel legirajućih elemenata i parametri postupka precipitacijskog očvršnuća. Tako aluminijske legure 6061 i 6063 imaju višak magnezija, a legura 6082 višak silicija, a upravo je taj višak u sastavu legure zaslužan za povećanje čvrstoće i tvrdoće te smanjenje duktilnosti i žilavosti. Prirodno dozrijevanje ima pozitivan utjecaj na precipitacijski očvršnute Al-Mg-Si legure te poboljšava mehanička svojstva. Isto tako, s porastom temperature precipitacijskog očvršnuća, u slučaju prekomjernog dozrijevanja (engl. *overaging*), snižavaju se vrijednosti vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i produljenja [19].

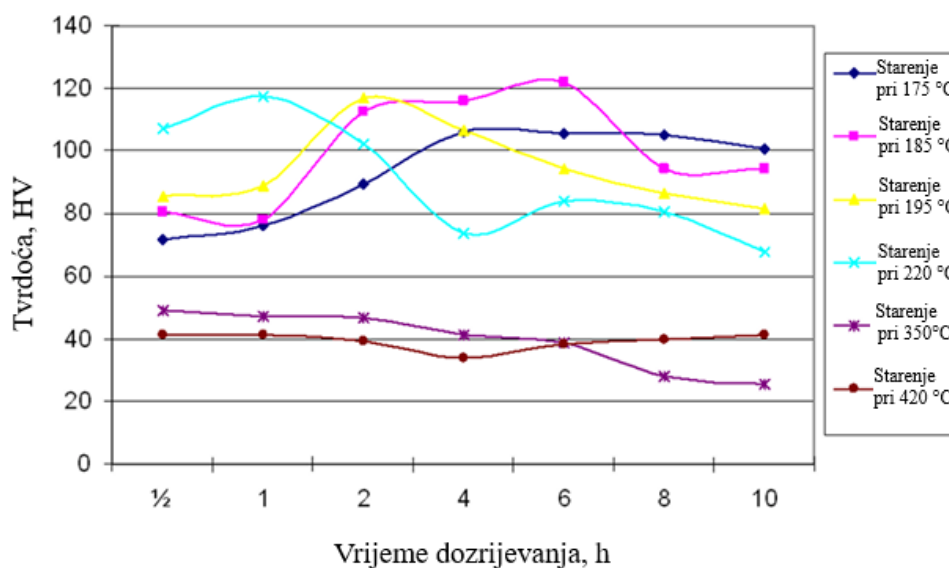
Na slici 3.15 prikazani su dijagrami aluminijske legure 6061 na kojima su prikazane krivulje ovisnosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja o temperaturi i vremenu precipitacijskog očvršćivanja [7].



**Slika 3.15** Dijagrami aluminijske legure 6061 ovisnosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja o trajanju precipitacijskog očvršnuća [7]

Što se tiče tvrdoće aluminijskih legura iz skupine 6000, kao i kod svih ostalih materijala potrebna su mnoga ispitivanja i izmjene parametara kako bi se došlo do optimalnih rezultata. Tako je na slici 3.16 prikazan dijagram ovisnosti tvrdoće i vremena dozrijevanja koji prikazuje krivulje dozrijevanja na različitim temperaturama za aluminijsku leguru 6061-T6. Uzorci su precipitacijski očvršćivani na temperaturama od 175 °C do 420 °C u vremenima od 5 minuta do nekoliko sati, a tvrdoća im je bila ispitana metodom Vickers. Na dijagramu se vidi da su optimalne vrijednosti tvrdoće postignute pri temperaturama od 175 °C do 195 °C za

vrijeme dozrijevanja od 2 do 6 sati. Isto tako, vidi se da nije prikladno dozrijevanje pri visokim temperaturama jer dolazi do mekšanja i prekomjernog dozrijevanja [20].



**Slika 3.16** Dijagram ovisnosti tvrdoće o vremenu dozrijevanja aluminijeve legure 6061-T6 pri različitim temperaturama dozrijevanja [20]

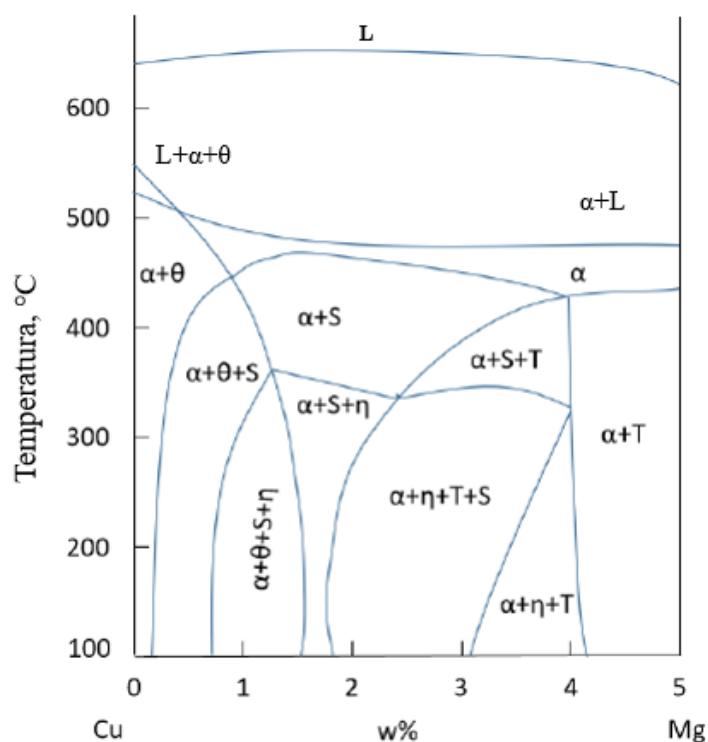
### 3.1.4. Toplinska obrada aluminijevih legura iz skupine EN-AW-70xx

Kod ove skupine aluminijevih legura osnovni legirajući element je cink koji se dodaje u legure u količinama od 1 % Zn do 8 % Zn te on u spoju s malim postotkom magnezija omogućuje dobivanje toplinski obradivih legura srednje do vrlo visoke čvrstoće. Ostali elementi poput bakra i kroma se dodaju u malim količinama. Legure iz skupine 7xxx se koriste za izradu konstrukcija aviona, visokopterećenih dijelova te za mobilnu opremu. Legure visoke čvrstoće imaju smanjenu otpornost prema napetosnoj koroziji te su zbog toga često korištene u prekomjerno dozrijevanom stanju s ciljem postizanja bolje kombinacije čvrstoće, korozijske postojanosti i lomne žilavosti [9].

Legure iz ove skupine ujedno su i najtvrđe i najčvršće od svih komercijalno upotrebljivih legura aluminija. Najpoznatije legure iz ove skupine su 7050 i 7075. Legura 7050 je visoke čvrstoće koja se koristi za izradu dijelova aviona i sličnih konstrukcija, za izradu oružja te sportsko - rekreativne opreme. Legura 7075 je iznimno visoke čvrstoće (ujedno i najveće čvrstoće od svih aluminijevih legura) čije su vrijednosti čvrstoće veće čak i od nekih vrsta srednjegljičnih čelika. Stoga se koristi za izradu dijelova aviona, oružja i dijelova strojeva te u svim slučajevima gdje su potrebne vrlo visoke čvrstoće strojnih dijelova i konstrukcija. Korozijska postojanost ove legure je dosta niska te se ne može uspoređivati s onom od

skupina 1000 ili 6000, ali ima bolju korozivsku postojanost od skupine legura 2000. Zbog toga se ove legure prevlače (Alclad 7075) te uz postojeću visoku čvrstoću tada posjeduju i iznimnu korozivsku otpornost površine od komercijalnog čistog aluminija. Također, legura 7075 je prikladna za prevlačenje prahom [9, 21].

Na slici 3.17 prikazan je fazni dijagram aluminijeve 7xxx legure, gdje je prikazano koje su faze prisutne na specifičnim temperaturama ovisno o udjelu legirajućih elemenata. Tako se s povećanjem udjela bakra promiče stvaranje  $\theta$  faze. Kada se smanji udio bakra, fazni sastav uglavnom ovisi o omjeru Zn/Mg. Kada je taj omjer relativno mali, tada je sastav legure sastavljen od  $\alpha$ +S+T faze ili  $\alpha$ +T faze bez prisustva  $\eta$  faze. Kad se omjer Zn/Mg poveća javlja se  $\eta$  faza te s postupnim povećanjem zajedno s S i T fazom [22].



**Slika 3.17 Fazni dijagram aluminijeve legure iz skupine 7xxx s prisutnim fazama pri određenim temperaturama [22]**

Kako bi se postigla željena svojstva za industrijsku primjenu ovih legura, materijal se zagrijava iznad temperature pri kojoj se precipitacijski otopine otope, a odmah nakon toga nastupa gašenje nakon čega se dobiva prezasićena čvrsta otopina. Mora se održavati kritična brzina gašenja kako bi se izbjegla nepoželjna precipitacija tijekom hlađenja. Iz prezasićene čvrste otopine, proces precipitacije odvija se u tri uzastopne faze; nukleacija, rast i

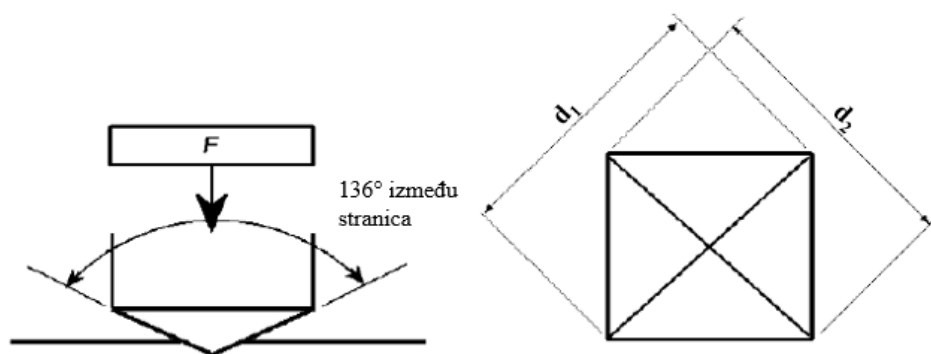
ogrubljanje. Tijekom nukleacije dolazi do spontanog stvaranja malih čestica, iz nakupina otopljenih tvari, koje mogu rasti. Daljnjom difuzijom otopljenih tvari iz čvrste otopine u postojeći precipitacijski nukleus, one rastu gotovo do maksimalno postizivog volumnog udjela. Ako se takav proces zbiva na sobnoj temperaturi on se naziva prirodno dozrijevanje, dok se pri povišenim temperaturama naziva umjetno dozrijevanje. U stadiju rasta dolazi do značajnog očvršnuća legure. Daljnjim dozrijevanjem dolazi do pogrubljanja zrna pri čemu se povećava veličina precipitata i smanjuje se gustoća što rezultira smanjenjem čvrstoće. To uglavnom nije poželjno stanje legure, a proces se naziva prekomjernim dozrijevanjem. Općeniti redoslijed precipitacije u skupini aluminijevih legura 7xxx je sljedeći: stvaranje prezasićene čvrste otopine, stvaranje Guinier-Prestonovih (GP) zona, izlučivanje metastabilnih  $\eta'$  i na kraju stabilnih  $\eta$  faza. GP zone su područja bogata topivim elementima tijekom dozrijevanja na sobnoj temperaturi i u ranim fazama umjetnog dozrijevanja te one prethode razvitku metastabilne  $\eta'$  faze koja je ujedno i glavna faza za otvrdnjavanje u Al-Zn-Mg(-Cu) legurama. Daljnjim dozrijevanjem stvaraju se stabilne faze, najčešće  $\eta$  faza ( $\text{MgZn}_2$ ) koje smanjuju čvrstoću legura [22].

## 4. METODE ISPITIVANJA

U nastavku će ukratko biti opisane metode pomoću kojih će se odrediti specifična svojstva uzoraka od aluminijske legure AlSi1MgMn, čiji će rezultati i ispitivanja biti dodatno objašnjeni u eksperimentalnom dijelu rada.

### 4.1. Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće po Vickersu opisano je normom HRN EN ISO 6507-1:2018. Metoda se zasniva na određivanju otpora materijala ispitnog uzorka prodiranjem dijamantnog penetratora. Dijamantni penetrator je izrađen u obliku četverostrane piramide s kutom između stranica od  $136^\circ$ . Penetrator prodire u materijal (obično od 10 do 15 sekundi) te stvara otisak u obliku kvadrata. Princip ispitivanja i mjerene veličine dijagonala otiska za određivanje tvrdoće prikazane su na slici 4.1.



Slika 4.1 Ispitivanje tvrdoće metodom Vickers [23]

Duljine dviju dijagonala ( $d_1$  i  $d_2$ ) otiska na površini uzorka mjere se pomoću mikroskopa te se izračunava njihova srednja vrijednost. Tvrdoća po Vickersu jednaka je omjeru opterećenja  $F$  i površine otiska, a izračunava se jednako kao i Brinellova pomoću izraza

$$HV = \frac{1}{g_n} \times \frac{2F \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \quad (2)$$

što uvrštavanjem kuta  $\alpha$  od  $136^\circ$  te ubrzanja sile teže  $g_n$  daje konačnu jednadžbu za izračunavanje tvrdoće po Vickersu

$$HV = \frac{F * 0,1891}{d^2} \quad (3)$$

gdje je:  $F$  – sila utiskivanja, N

$d$  – aritmetička sredina dviju izmjerenih dijagonala otisnuća, mm

$\alpha$  – kut između stranica penetratora od  $136^\circ$

$g_n$  – ubrzanje sile teže ( $9,80665 \text{ m/s}^2$ )

Iznosi opterećenja, tj. sile koje se primjenjuju na uzorcima obično iznose od 49 N do 980 N, ali mogu se koristiti i manja opterećenja pa se tako može mjeriti i semimikrotvrdoća (primijenjena sila od 1,96 N do 49 N) te mikrotvrdoća (sila manja od 1,96 N) pomoću koje se može mjeriti tvrdoća pojedinih faza ili kristalnih zrna. Iznos tvrdoće prikazuje se na sljedeći način: npr. 800 HV10, što označava da je izmjerena tvrdoća od 800 HV uz primijenjenu silu utiskivanja penetratora od  $10 \times 9,81 \text{ N}$ . Prednosti ispitivanja Vickersovom metodom jesu vrlo precizno očitavanje tvrdoće i primjena dijamantnog penetratora za sve vrste materijala, dok je, s druge strane, uređaj skuplji u odnosu na Brinellov i Rockwellov tvrdomjer te je potrebna bolja priprema površine za ispitivanje brušenjem i poliranjem [23, 24].

#### 4.2. Ispitivanje korozijske postojanosti Tafelovom metodom

Metoda Tafelove ekstrapolacije je potenciodinamička metoda elektrokemijskog ispitivanja procesa korozije istosmjernom strujom koja se temelji na osnovnoj (Butler-Volmerovoj) jednadžbi elektrokemijske kinetike. Pomoću te jednadžbe dan je izraz pomoću kojeg se računa ukupna struja koja prolazi kroz granicu faza na kojoj se zbivaju po jedna anodna i katodna reakcija:

$$j = j_0 \left\{ \exp \left[ \frac{(1-\alpha)zF\eta}{RT} \right] - \exp \left[ \frac{-\alpha zF\eta}{RT} \right] \right\} \quad (4)$$

Gdje su:  $j$  – gustoća struje,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

$j_0$  – gustoća struje izmjene

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

$R$  – opća plinska konstanta,  $R=8,314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$

$\eta$  – prenapon,  $\eta=E-E^\circ$ , mV

$T$  – termodinamička temperatura, K

$z$  – broj elektrona

$\alpha$  – koeficijent prijenosa, od 0 do 1

Ukoliko je vrijednost prenapona vrlo velika tada se struja redukcije može zanemariti (s povećanjem prenapona smanjuje se redukcija), a prethodno navedena jednadžba može se zapisati na sljedeći način:

$$j = j_0 \left\{ \exp \left[ \frac{(1-\alpha)zF\eta}{RT} \right] \right\} \quad (5)$$

Logaritmiranjem i sređivanjem te jednadžbe dobija se izraz Tafelove jednadžbe koji glasi:

$$\eta = a + b \cdot \log j , \quad (6)$$

pri čemu  $a$  predstavlja odsječak na osi  $x$ , dok je  $b$  nagib Tafelovog pravca u grafičkom prikazu Tafelove ekstrapolacije [25].

Tafelova ekstrapolacija može se provoditi ručno ili pomoću specijaliziranog računalnog softvera. Metoda mjerenja gustoće struje provodi se pomoću elektrokemijske ćelije koja se sastoji od radne (metal koji se ispituje), pomoćne i referentne elektrode koje su spojene na potenciostat. Prije primjene vanjske struje, potencijal uzorka ostaje jednak, a on odgovara korozijskom potencijalu ( $E_{kor}$ ) metala u pripadajućem okruženju. Anodne i katodne reakcije su pri tom potencijalu obično minimalne. Potencijal radne elektrode se mijenja unaprijed određenom brzinom u negativnom smjeru te se mjeri odgovarajuća promjena struje. Slična mjerenja se također provode i u pozitivnom smjeru. Grafički prikaz Tafelove ekstrapolacije prikazan je na slici 4.2. u dijagramu ovisnosti mjerenog potencijala  $E$  o logaritamskoj vrijednosti gustoće struje  $\log j$  s pripadajućim parametrima. Dijagram se sastoji od dvaju razilazećih logaritamskih pravaca koji predstavljaju anodnu i katodnu struju. Ekstrapolacija se provodi produživanjem linearnih dijelova anodne i katodne krivulje sve do mjesta u kojem dolazi do njihovog sjecišta. Točka u kojoj se sijeku ta dva pravca predstavlja gustoću korozijske struje  $j_{kor}$  koja se koristi za izračun brzine korozije prema dolje navedenoj jednadžbi [26].

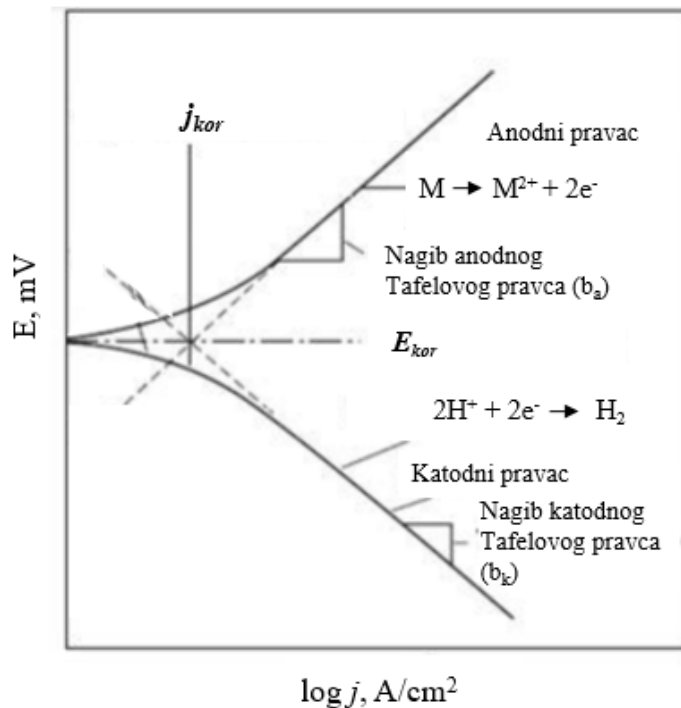
Brzina korozije  $v_{kor}$  računa se prema sljedećem izrazu, pri čemu je EW ekvivalentna masa materijala, a  $\rho$  gustoća materijala ( $\text{g/cm}^3$ ) [25]:

$$v_{kor} = \frac{3,3 \cdot 10^{-3} \cdot j_{kor} \cdot EW}{\rho} , \text{ mm/god} . \quad (7)$$

Tafelova metoda omogućuje izravno mjerenje brzine korozije i korozijskog potencijala u različitim eksploatacijskim uvjetima. Točnost Tafelove metode je jednaka ili veća u odnosu na konvencionalne gravimetrijske metode ispitivanja korozije. S obzirom da se pomoću ove



metode može na vrlo brz i jednostavan način odrediti brzina korozije, primjena Tafelovih dijagrama iznimno je korisna za procjenu djelovanja inhibitora te za usporedbu raznih legura [27].



Slika 4.2 Metoda Tafelove ekstrapolacije [26]

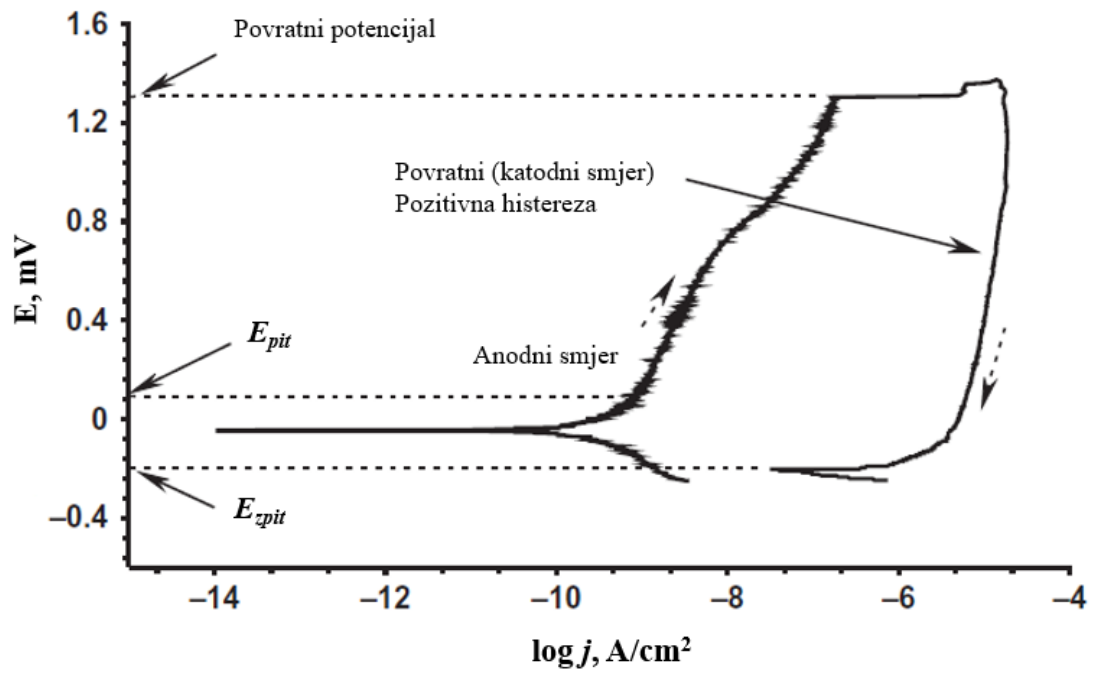
#### 4.3. Ispitivanje korozijske postojanosti cikličkom polarizacijom

Ciklička polarizacija je potenciodinamička metoda elektrokemijskog ispitivanja istosmjernom strujom pomoću koje se određuje sklonost ispitivanog materijala prema rupičastoj (engl. *pitting*) koroziji u ispitivanom (korozivnom) mediju. Postupak ispitivanja započinje pri  $E_{kor}$  ispitivanog materijala (predstavlja radnu elektrodu) koji se kreće u pozitivnom (anodnom) smjeru pri čemu u jednom trenutku dolazi do naglog povećanja jakosti struje, a ta točka definirana se kao potencijal pitinga ( $E_{pit}$ ). Potencijal se kontrolira pomoću potenciostata te se obično mjeri uz korištenje zasićene kalomel referentne elektrode (engl. SCE, *saturated calomel electrode*) te pomoćne elektrode od platine.  $E_{kor}$  se nastavlja kretati u anodnom smjeru sve do trenutka kada polarizacija ispitivanog materijala ne dosegne unaprijed definiranu maksimalnu vrijednost gustoće struje ili primijenjenog potencijala. Nakon toga se potencijal vraća u negativnom (katodnom) smjeru i snižava sve do točke kada primijenjeni potencijal poprimi početnu vrijednost ( $E_{kor}$ ) [28, 29].

Na slici 4.3 prikazan je primjer krivulje dobivene ispitivanjem cikličkom polarizacijom s označenim kritičnim točkama gdje je na ordinati potencijal  $E$ , dok je na apscisi logaritamska vrijednost gustoće struje  $\log j$  jednako kao i kod Tafelove ekstrapolacije. Vrijednosti koje se očitavaju kod cikličke polarizacije su označene na dijagramu na slici 4.3:

- povratni potencijal
- zaštitni potencijal za rupičastu koroziju ( $E_{zpit}$ ), na mjestu gdje završava krivulja u povratnom katodnom smjeru
- potencijal pitinga ( $E_{pit}$ ), koji se još naziva primarni potencijal pasivizacije, kod kojeg dolazi do značajnog rasta struje u anodnom smjeru

Na dijagramu na slici 4.3 isprekidanim strelicama su označeni katodni i anodni smjer pri ispitivanju. Isto tako, kod ovog dijagrama javlja se histereza koja može biti pozitivna ili negativna. Negativna histereza se javlja u slučaju kada je gustoća struje u povratnom (katodnom) smjeru manja od one u anodnom smjeru, dok se pozitivna histereza javlja u slučaju kada je ona veća od gustoće struje u anodnom smjeru. Petlja histereze cikličke polarizacije daje informaciju o rupičastoj koroziji te o tome kako se brzo obnavlja pasivni film (zaštitni sloj oksida) materijala. Što je površina ispod petlje veća to je značajnija tendencija pojave pitinga. Ukoliko je histereza pozitivna, tada dolazi do nastajanja rupičastih oštećenja na ispitivanoj površini materijala te se pasivni film ne obnavlja (u tom slučaju je  $E_{zpit}$  negativniji od  $E_{pit}$ ). S druge strane, negativna histereza označava slučaj u kojem ne dolazi do pojave rupičaste korozije te se pasivni film samoobnavlja. Ukoliko potencijal dosegne vrijednosti pri kojima ulazi u transpasivno područje (potencijali viši od  $E_{pit}$ ) krivulje cikličke polarizacije dolazi do oštećenja pasivnog filma te dolazi do stvaranja rupičastih oštećenja na lokaliziranim mjestima površine metala. Pomoću vrijednosti  $E_{pit}$ ,  $E_{zpit}$  te širine područja pasivnosti iz dijagrama može se vrlo dobro okarakterizirati ponašanje i procijeniti koliko dobro pasivni film štiti materijal od rupičaste korozije [28, 29].



Slika 4.3 Dijagram cikličke polarizacije s pozitivnom histerezom [29]

# **EKSPERIMENTALNI DIO**

## 5. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA

### 5.1. Plan pokusa i priprema uzoraka

Priprema uzoraka te sva ispitivanja provedena su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a u nastavku će biti opisan detaljan postupak kompletnog provođenja svih koraka eksperimenta. Svi ispitni uzorci izrađeni su od materijala oznake EN-AW 6082 koja označava kovanu aluminijevu leguru AlSi1MgMn. Kemijski sastav ispitivane legure određen je pomoću ručnog Olympus XRF (engl. *X-ray fluorescence*) analizatora prikazanog na slici 5.1. U tablici 5.1 prikazan je kemijski sastav aluminijeve legure, pri čemu rimski brojevi predstavljaju sljedeće:

I – Kemijski sastav deklariranog materijala

II – Kemijski sastav izmjeren pomoću XRF analizatora

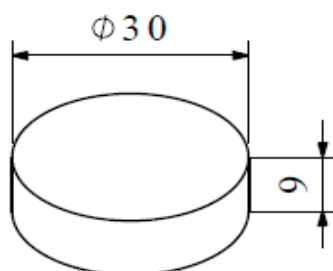
**Tablica 5.1 Kemijski sastav aluminijeve legure EN-AW 6082**

	Kemijski sastav	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostalo	Al
Maseni udio, %	I	0,7 - 1,3	max 0,50	max. 0,10	0,40 - 1,0	0,6 - 1,2	max 0,25	max 0,20	max 0,10	max 0,15	ostatak
	II	1,20	0,27	0,05	0,45	2,08	0,05	0,34	/	0,11	95,76



**Slika 5.1 Prijenosni uređaj za analizu kemijskog sastava Olympus XRF**

Iz iste šipke izrezani su uzorci u obliku valjka visine 9 mm i promjera 30 mm (slika 5.2). Na slici 5.3 prikazani su svi izrezani uzorciprije nego li su bili pripremani za ispitivanja.



**Slika 5.2 Dimenzije ispitnih uzoraka**



**Slika 5.3 Izrezani uzorci prije pripreme površina za ispitivanja**

Ravne površine izrezanih uzoraka brušene su na tračnoj brusilici *Parkside* koja je prikazana na slici 5.4. Za brušenje su korišteni brusni papiri granulacija #80 i #240. Nakon toga, uzorci su bili završno brušeni finim brusnim papirom granulacije #800.



**Slika 5.4** Tračna brusilica pomoću koje su brušene površine uzoraka

## **5.2. Označavanje i toplinska obrada uzoraka**

Svaki od 16 ispitnih uzoraka označen je različitom oznakom pomoću žiga prije nego li su podvrgnuti toplinskoj obradi kako bi ih se moglo raspoznati kod daljnjih ispitivanja. Primjer jednog označenog uzorka s oznakom B12 dan je na slici 5.5. Oznake uzoraka (koje će dalje biti korištene u radu) s pripadajućim parametrima toplinske obrade navedene su u tablici 5.2.



**Slika 5.5** Primjer žigom označenog uzorka

**Tablica 5.2 Oznake uzoraka s pripadajućim parametrima toplinske obrade**

Redni broj	Oznaka	Parametri toplinske obrade
1.	A11	560 °C/6 h/voda <sub>20 °C</sub> + 150 °C/5 h/zrak
2.	B11	560 °C/6 h/voda <sub>50 °C</sub> + 150 °C/5 h/zrak
3.	C11	560 °C/6 h/voda <sub>85 °C</sub> + 150 °C/5 h/zrak
4.	A12	560 °C/6 h/voda <sub>20 °C</sub> + 150 °C/10 h/zrak
5.	B12	560 °C/6 h/voda <sub>50 °C</sub> + 150 °C/10 h/zrak
6.	C12	560 °C/6 h/voda <sub>85 °C</sub> + 150 °C/10 h/zrak
7.	A21	560 °C/6 h/voda <sub>20 °C</sub> + 175 °C/5 h/zrak
8.	B21	560 °C/6 h/voda <sub>50 °C</sub> + 175 °C/5 h/zrak
9.	C21	560 °C/6 h/voda <sub>85 °C</sub> + 175 °C/5 h/zrak
10.	A22	560 °C/6 h/voda <sub>20 °C</sub> + 175 °C/10 h/zrak
11.	B22	560 °C/6 h/voda <sub>50 °C</sub> + 175 °C/10 h/zrak
12.	C22	560 °C/6 h/voda <sub>85 °C</sub> + 175 °C/10 h/zrak
13.	A30	560 °C/6 h/voda <sub>20 °C</sub> + 205 °C/2,5 h/zrak
14.	B30	560 °C/6 h/voda <sub>50 °C</sub> + 205 °C/2,5 h/zrak
15.	C30	560 °C/6 h/voda <sub>85 °C</sub> + 205 °C/2,5 h/zrak
16.	D	560 °C/6 h/voda <sub>50 °C</sub> + 165 °C/7,5 h/zrak

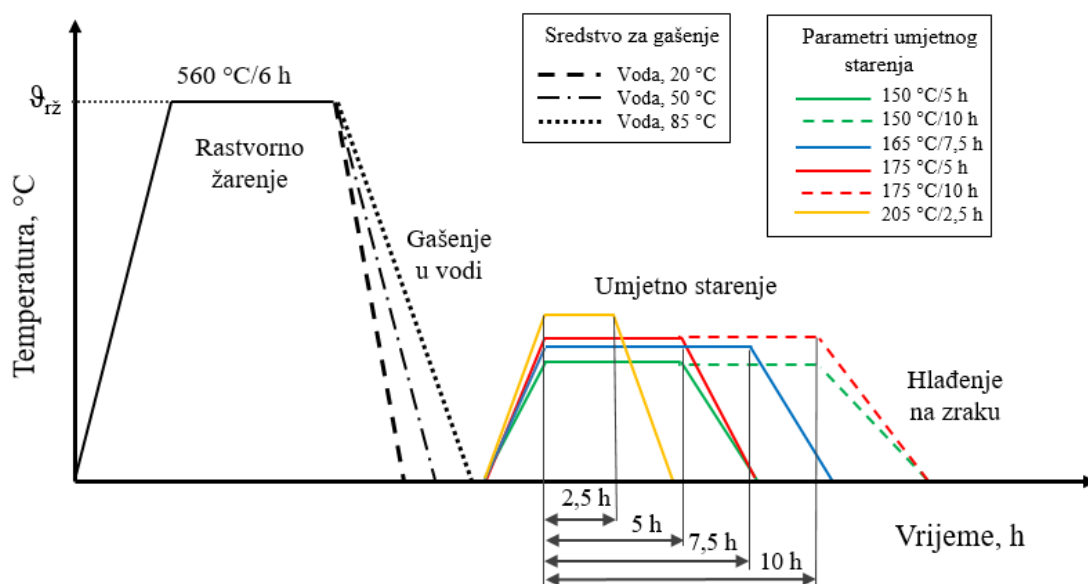
Valja spomenuti da su svi uzorci rastvorno žareni pri istoj temperaturi (560 °C) u trajanju od 6 h, nakon čega su gašeni u jednom od sredstava koja su u oznaci označena slovom A, B, C i D, s time da su za uzorak D odabrani srednji parametri toplinske obrade koji se mogu vidjeti u tablici 5.2. Kao što se može očitati iz tablice 5.2, oznaka „A“ predstavlja gašenje ispitnog uzorka u vodi temperature 20 °C, oznaka „B“ u vodi temperature 50 °C, a oznaka „C“ u vodi temperature 85 °C.

Prvi broj u oznaci predstavlja temperaturu pri kojoj se provodio postupak umjetnog starenja, pa tako broj 1 označava temperaturu od 150 °C, broj 2 temperaturu od 175 °C te broj 3 temperaturu od 205 °C, dok drugi broj označava pripadajuće vrijeme, tj. trajanje umjetnog starenja. Dakle, broj 1 označava vremenski period umjetnog starenja od 5h, broj 2 od 10 h te broj 3 od 2,5 h.

Za primjer se može objasniti uzorak s oznakom B12 koji je prikazan na slici 5.5. Ovaj uzorak najprije je bio rastvorno žaren na temperaturi 560 °C u vremenskom periodu od 6 h te gašen u vodi temperature 50 °C. Nakon toga, uzorak je bio podvrgnut umjetnom starenju na 175 °C u trajanju od 5h, nakon čega je bio hlađen na zraku.



Sam postupak toplinske obrade uzoraka shematski je prikazan na slici 5.6 u dijagramu ovisnosti temperature o vremenu, pri čemu  $\vartheta_{rz}$  predstavlja temperaturu rastvornog žarenja, dok  $\vartheta_{str}$  predstavlja temperaturu starenja. Za vodu od 20 °C gašenje je najintenzivnije (najviše strma krivulja). Dakle, kao što je već bilo rečeno, najprije su uzorci rastvorno žareni pri 560 °C u trajanju od 6 h te nakon toga gašeni u jednom od troje sredstava za gašenje. Nakon toga provodio se postupak umjetnog starenja pri spomenutim temperaturama i vremenima trajanja, poslije čega je slijedilo hlađenje na mirnom zraku.



Slika 5.6 Shematski prikaz toplinske obrade ispitivanih uzoraka

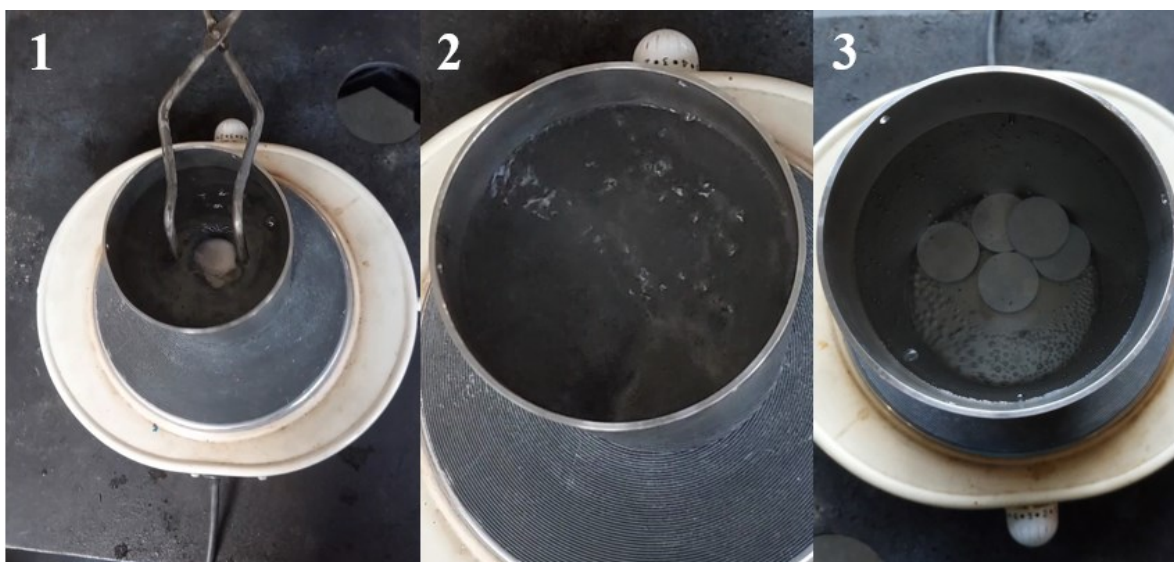
Cijelokupna toplinska obrada provedena je u Laboratoriju za toplinsku obradu u istoj električnoj peći koja je prikazana na slici 5.7.



Slika 5.7 Komorna električna peć za toplinsku obradu ispitnih uzorka

### 5.2.1. Određivanje intenziteta gašenja u ispitivanim sredstvima za gašenje

Kao što je već bilo spomenuto, uzorci su nakon rastvornog žarenja bili podvrgnuti gašenju u tri različita sredstva, mirnoj vodi od 20 °C te zagrijanim vodama od 50 °C i 85 °C. Prilikom gašenja uzoraka u vodi prisutan je Leidenfrostov fenomen te su bile vidljive sve tri faze: faza parnog omotača, faza vrenja i faza hlađenja konvekcijom. Postupak gašenja uzorka prikazan je na slici 5.8 pri čemu su vidljive prethodno opisane faze slijeva na desno. Kao što se vidi, najprije je uzorak uronjen u vodu te tada slijedi kratko vrijeme bez značajnog isparavanja (faza parnog omotača). Nakon toga vidljivo je značajno isparavanje te pojava mnogih mjehurića (faza vrenja), dok je na kraju temperatura uzorka postigla ravnotežu sa sredstvom za gašenje pri čemu su nestali mjehurići i isparavanje (faza hlađenja konvekcijom).



**Slika 5.8 Gašenje uzorka s vidljivim prisutnim fazama**

Postupak ispitivanja krivulja ohlađivanja ovisno o sredstvu gašenja proveden je u skladu s normom ISO 9950 pomoću mjernog sustava IVF Smart Quench System koji je prikazan na slici 5.9. Mjerni sustav sastoji se od certificirane standardne probe, peći, softvera i sustava za prihvatanje podataka. Standardna mjerna proba (promjera 12,5 mm i duljine 60 mm) izrađena je od legure Inconel 600 s ugrađenim termoelementom tipa K (promjera 1,5 mm) u njenom središtu [30].



Slika 5.9 Mjerni sustav IVF Smart Quench System (ISO 9950) [30]

Prvi korak pri ispitivanju je ugrijavanje mjerne probe u peći na temperaturu 850 °C. Nakon što mjerna proba postigne tu temperaturu ona se stavlja direktno u određeno ispitno sredstvo za gašenje te pritom započinje snimanje krivulje ohlađivanja. Pomoću računalnog softvera IVF SQ Integra određuju se specifični parametri hlađenja čije su oznake objašnjene u tablici 5.3.

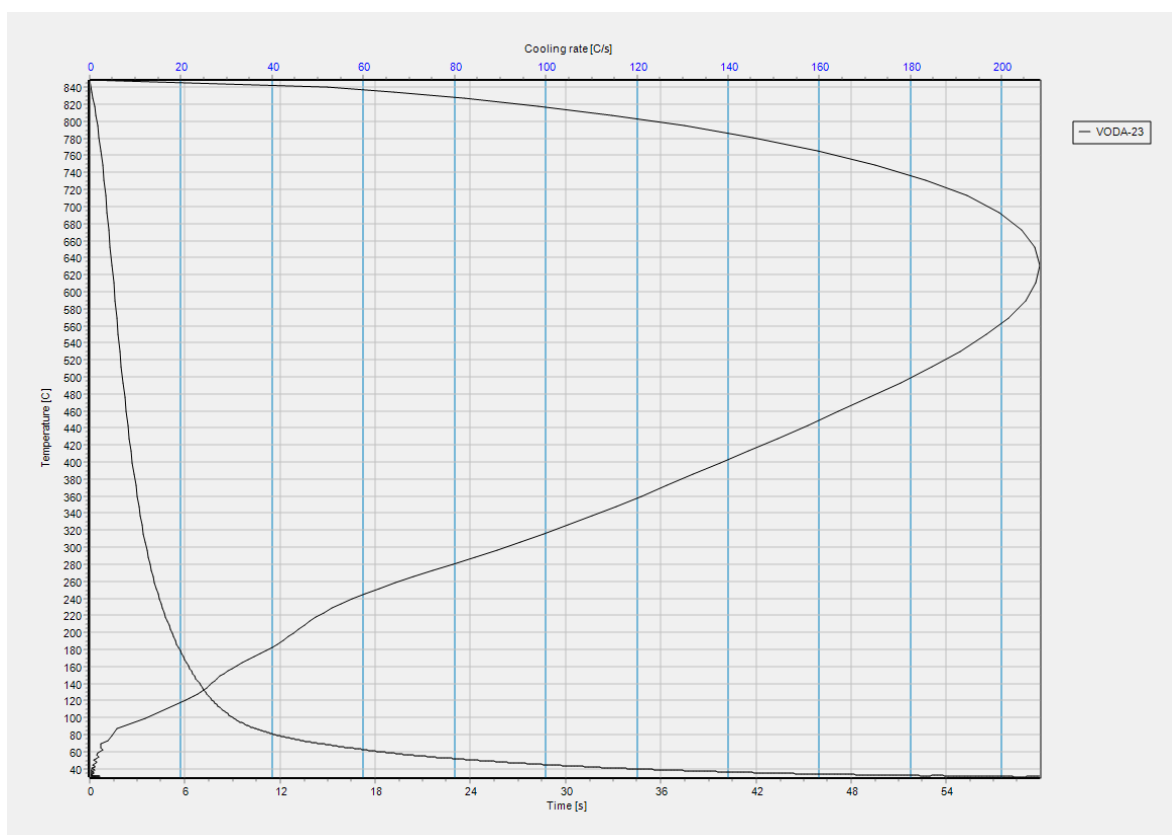
Tablica 5.3 Opisani parametri hlađenja dobiveni pri ispitivanju sredstava za gašenje

Oznaka parametra hlađenja	Opis oznake
$T_{\text{Leidenfrost}}, ^\circ\text{C}$	Temperatura prijelaza iz faze parnog omotača u fazu vrenja
$T(\text{CR}_{\text{max}}), ^\circ\text{C}$	Temperatura pri kojoj se postiže maksimalna brzina ohlađivanja
$T_{\text{konvekcije}}, ^\circ\text{C}$	Temperatura prijelaza iz faze vrenja u fazu ohlađivanja konvekcijom
$t(\text{CR}_{\text{max}}), \text{s}$	Vrijeme postizanja maksimalne brzine ohlađivanja
$t_{850-600}, \text{s}$	Vrijeme ohlađivanja od 850 °C do 600 °C
$t_{850-400}, \text{s}$	Vrijeme ohlađivanja od 850 °C do 400 °C
$t_{850-200}, \text{s}$	Vrijeme ohlađivanja od 850 °C do 200 °C
$\text{CR}_{\text{max}}, ^\circ\text{C/s}$	Maksimalna brzina ohlađivanja
H	Intenzitet gašenja

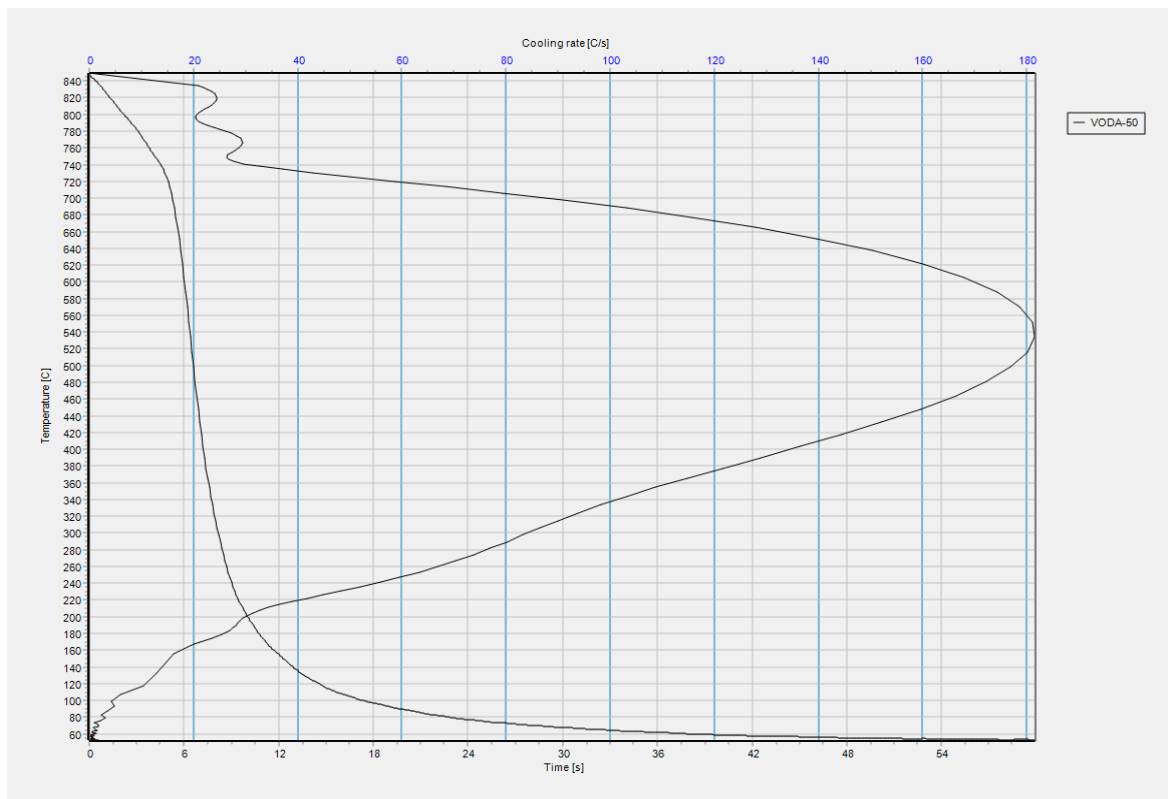
U nastavku će biti prikazane krivulje ohlađivanja snimljene pomoću mjernog sustava IVF Smart Quench System. Tako su redom na slikama 5.10, 5.11 i 5.12 prikazane krivulje ohlađivanja i krivulje brzine ohlađivanja u vodi temperature 23 °C, 50 °C i 75 °C.

Iz dijagrama se može zaključiti da se brzina ohlađivanja smanjuje s povećanjem temperature vode u kojoj se proba hladi, a isto tako vrlo se lijepo vide prijelazi faza Leidenfrostovog efekta koji su prisutni kod krivulja brzina ohlađivanja. Također, s povećanjem temperature vode za hlađenje, krivulja ohlađivanja postaje sve manje strma pa se tako primijeti znatna razlika u vremenu ohlađivanja koje je znatno kraće u vodi od 23 °C za razliku od ohlađivanja u vodi temperature 50 °C i 75 °C . Vrijednosti parametara hlađenja za svako od tih sredstava hlađenja dobivene su uz pomoć softvera IVF SQ Integra te su prikazane u tablici 5.4. Vrijednost intenziteta gašenja  $H$  za običnu vodu od 23 °C iznosi 1, dok se za vodu temperature 50 °C i 75 °C računa prema sljedećem izrazu, pri čemu se vrijeme ohlađivanja u pojedinom sredstvu koje je potrebno za spuštanje temperature probe s 700 °C do 300 °C očitava iz snimljenih krivulja ohlađivanja:

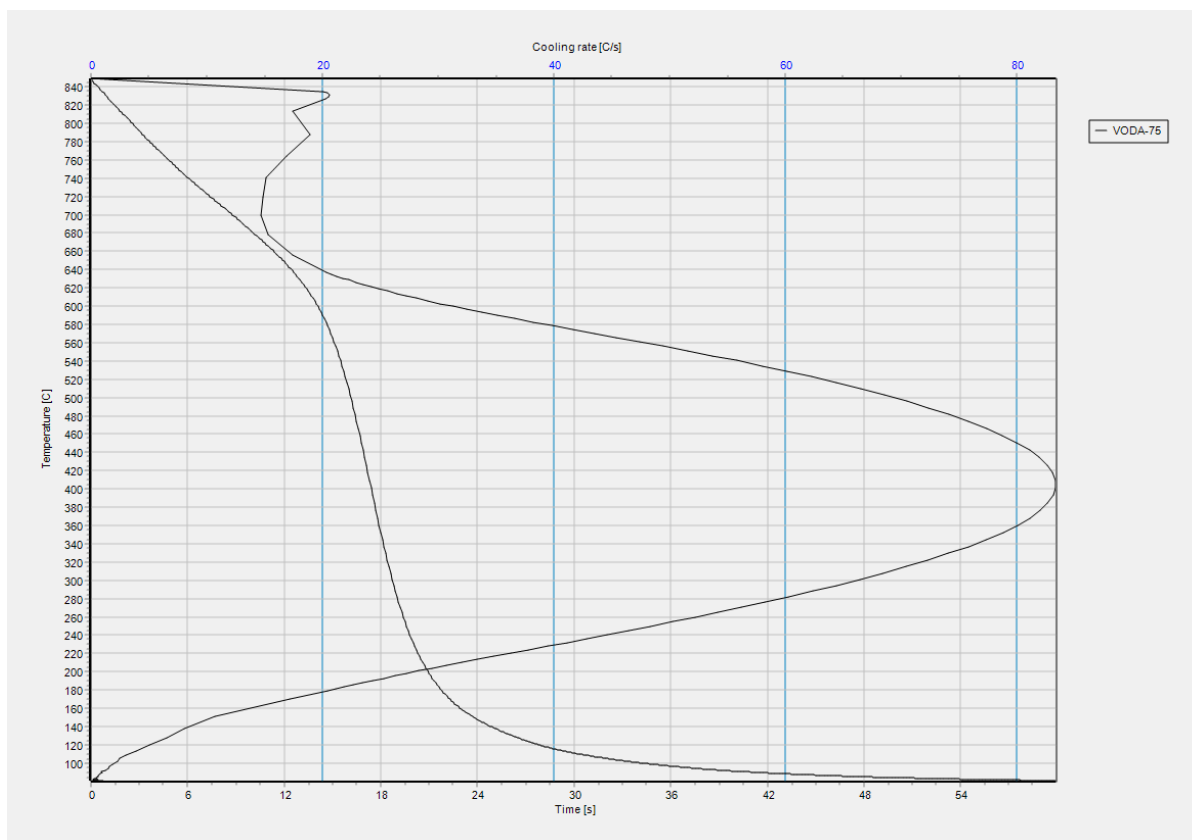
$$H_{sredstva} = \frac{\Delta t_{mirnevode 23^{\circ}\text{C}, 700^{\circ}\text{C}-300^{\circ}\text{C}}}{\Delta t_{sredstva 700^{\circ}\text{C}-300^{\circ}\text{C}}} \quad (8)$$



**Slika 5.10** Krivulja ohlađivanja i krivulja brzine ohlađivanja u vodi temperature 23 °C



Slika 5.11 Krivulja ohlađivanja i krivulja brzine ohlađivanja u vodi temperature 50 °C



Slika 5.12 Krivulja ohlađivanja i krivulja brzine ohlađivanja u vodi temperature 75 °C

**Tablica 5.4** Vrijednosti parametara gašenja mirne vode zagrijane na 23 °C, 50 °C i 75 °C

Oznaka parametra hlađenja	Sredstvo za gašenje		
	Voda, 23 °C	Voda, 50 °C	Voda, 75 °C
$T_{\text{Leidenfrost}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	849	747	675
$T(\text{CR}_{\text{max}}), \text{ } ^\circ\text{C}$	640	549	405
$T_{\text{konvekcije}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	265	205	179
$t(\text{CR}_{\text{max}}), \text{ s}$	1,36	6,32	17,35
$t_{850-600}, \text{ s}$	1,55	6,03	14,09
$t_{850-400}, \text{ s}$	2,69	7,22	17,42
$t_{850-200}, \text{ s}$	5,19	10,04	20,93
$\text{CR}_{\text{max}}, \text{ } ^\circ\text{C/s}$	208,14	181,28	83,39
H	1	0,96	0,26

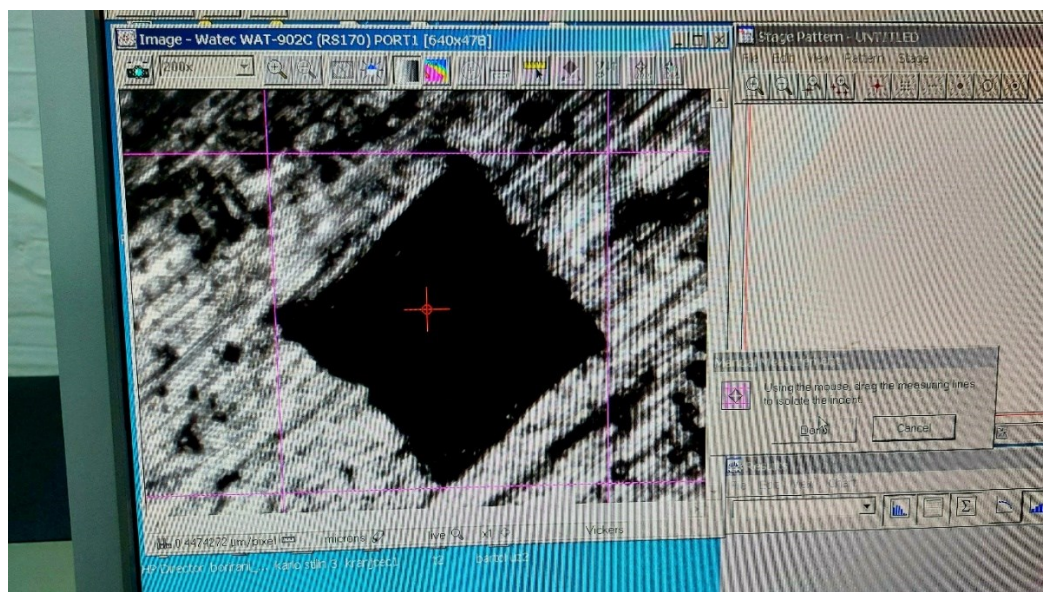
### 5.3. Ispitivanje tvrdoće uzoraka

Mjerenja površinske tvrdoće HV1 na uzorcima provedena su metodom Vickers u Laboratoriju za toplinsku obradu pomoću uređaja INSTRON Wilson-Wolpert Tukon 2100B koji je prikazan na slici 5.13 (lijevo). Sama metoda opisana je u poglavlju 4.1, a HV1 tako predstavlja silu utiskivanja od 9,81 N. Uređaj je povezan s računalom na kojem je instalirani računalni program Wilson-Wolpert Measurement System za mjerenje dijagonala otiska i određivanje vrijednosti tvrdoće. Sam postupak sastoji se od utiskivanja dijamantnog penetratora pomoću tvrdomjera nakon čega se na računalu u pripadajućem softveru ručno izmjere dimenzije otiska na uzorku pri čemu softver automatski izračunava vrijednost tvrdoće na temelju veličine otiska. Na slici 5.13 (desno) prikazan je uzorak koji je pripremljen i pozicioniran za ispitivanje tvrdoće, dok je na slici 5.14 prikazano sučelje programa na kojem su označene dimenzije otiska, tj. njegove dijagonale pomoću kojih softver izračunava vrijednost tvrdoće.





Slika 5.13 Tvrdomjer INSTRON Wilson-Wolpert Tukon 2100B (lijevo) te pripremljeni uzorak za ispitivanje tvrdoće na uređaju (desno)

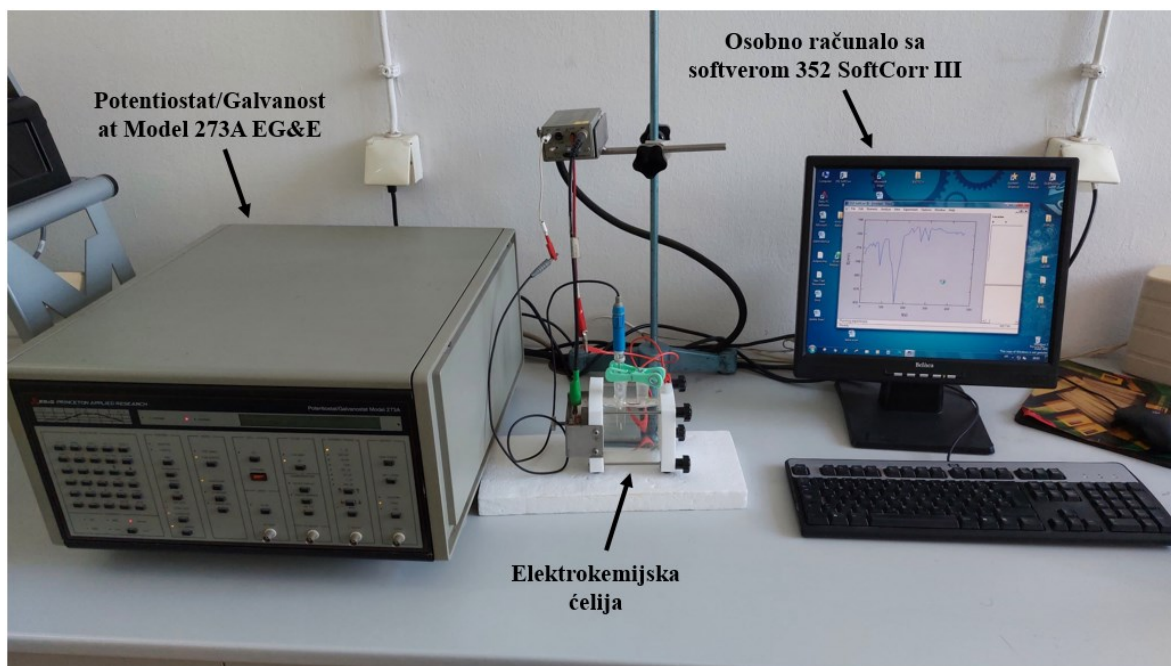


Slika 5.14 Označene dimenzije, tj. dijagonale otiska za određivanje tvrdoće u softveru

Tvrdoće uzoraka bile su mjerene nakon postupaka rastvornog žarenja te umjetnog starenja, a treba spomenuti da su prije samog ispitivanja tvrdoće površine uzoraka bile polirane što je nužno kako bi se mogle ispravno utvrditi vrijednosti tvrdoća.

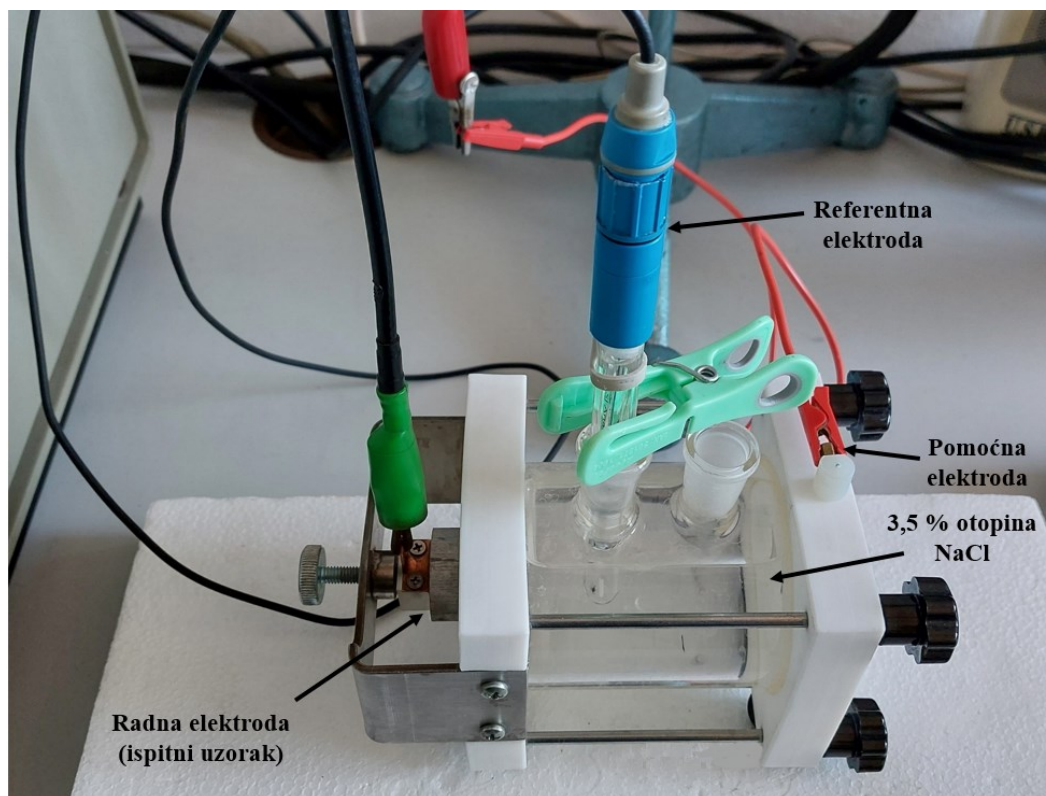
#### 5.4. Ispitivanje otpornosti na elektrokemijsku koroziju

Nakon provedenog postupka umjetnog starenja, uzorci su ponovno polirani kako bi im površina bila sjajna i glatka te spremna za daljnja ispitivanja otpornosti na koroziju, koja su bila provedena u Laboratoriju za zaštitu materijala. Metode koje su korištene za ispitivanje otpornosti na korozije bile su Tafelova ekstrapolacija i ciklička polarizacija istosmjernom strujom. Uređaj Potentiostat/Galvanostat Model 273A EG&E korišten je za potrebe ispitivanja, a sam uređaj je povezan s osobnim računalom koji ima instalirani računalni program 352 SoftCorr III pomoću kojeg su bila provedena ispitivanja te dobiveni rezultati (grafički prikazi i tablični podaci koji su korišteni za izradu dijagrama). Uz potenciostat i računalni program za provedbu ispitivanja primjenjena je standardna elektrokemijska ćelija. Ona se sastojala od pomoćne elektrode od grafita, od radne elektrode (ispitivani uzorak s površinom ispitivanja  $0,785 \text{ cm}^2$ ) te od referentne zasićene kalomel elektrode. Prikaz svih elemenata potrebnih za provođenje ispitivanja otpornosti na koroziju dan je na slici 5.15, dok je na slici 5.16 zasebno prikazana elektrokemijska ćelija s označenim dijelovima.



Slika 5.15 Ispitna aparatura za ispitivanje otpornosti na koroziju



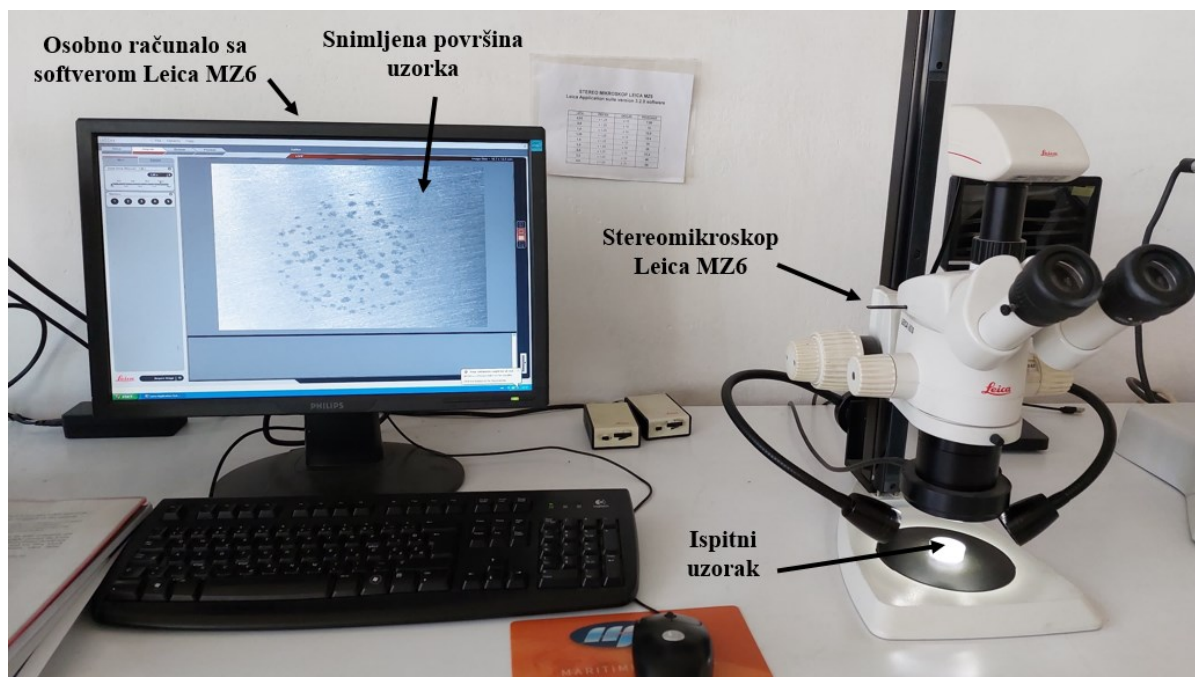


Slika 5.16 Elektrokemijska ćelija s dijelovima u trenutku ispitivanja

Korozivna ispitivanja svih uzoraka bila su provedena na sobnoj temperaturi, dok je korozivni medij predstavljala 3,5 %-tna otopina NaCl. Pomoću Tafelove ekstrapolacije određena je brzina korozije  $v_{kor}$ , dok se cikličkom polarizacijom utvrdila sklonost rupičastoj koroziji te su određeni piting ( $E_{pit}$ ) i zaštitni ( $E_{zpit}$ ) potencijal.

### 5.5. Analiza korodirane površine stereomikroskopijom

Prije i nakon provedbe elektrokemijskih ispitivanja površine uzoraka analizirane su pomoću stereomikroskopa Leica MZ6, koji je povezan s osobnim računalom. Ispitivanje jednog uzorka prikazano je na slici 5.17 sa svim označenim elementima potrebnim za snimanje korodirane površine. Najprije su pomoću stereomikroskopa snimljene površine uzoraka prije nego li su oni bili ispitani kako bi se vidjelo početno stanje površina, a nakon provedenih ispitivanja su snimljena konačna stanja.



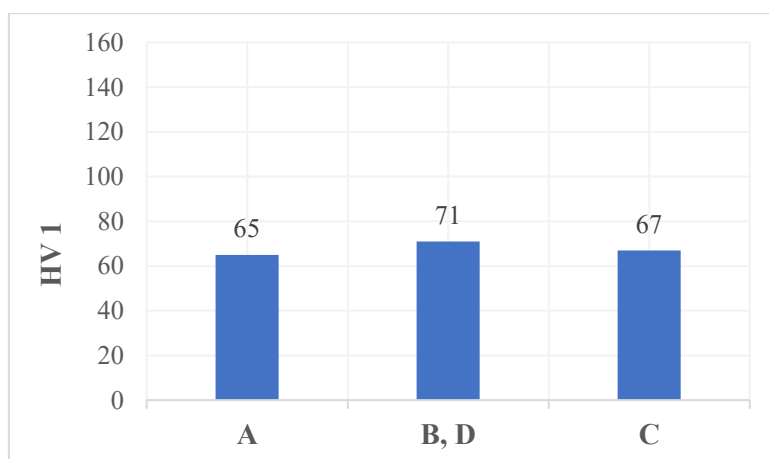
**Slika 5.17 Snimanje površine uzorka pomoću stereomikroskopa Leica MZ6**

## 6. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

U nastavku će biti prikazani rezultati provedenih ispitivanja te će biti provedena analiza na temelju dobivenih rezultata.

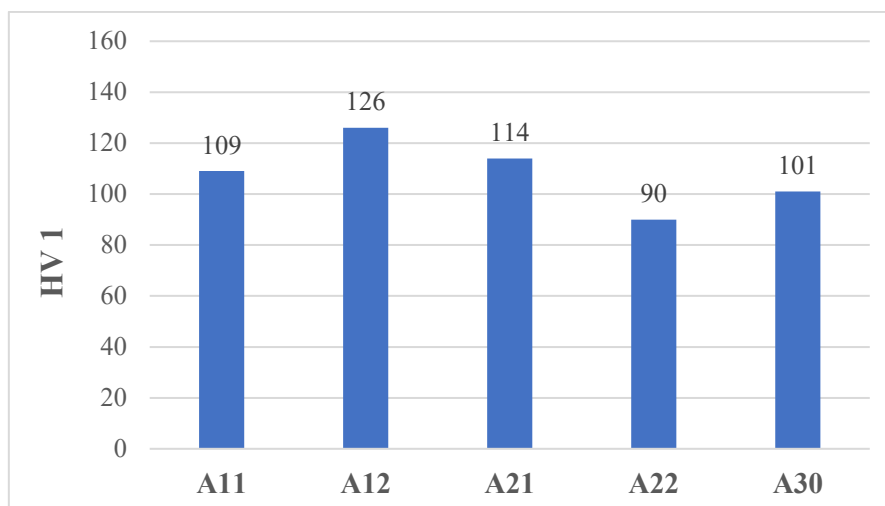
### 6.1. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Pomoću uređaja INSTRON Wilson-Wolpert Tukon 2100B ispitana je površinska tvrdoća svih uzoraka nakon rastvornog žarenja te nakon umjetnog starenja. Za potrebe ispitivanja na svakom uzorku izvršeno je pet mjerenja na temelju kojih su izračunate srednje vrijednosti tvrdoće, što je prikazano u prilogima 1-3. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća nakon rastvornog žarenja prikazane su na slici 6.1 u obliku histograma. Rastvorno žarenje svih uzoraka provedeno je na temperaturi 560 °C u trajanju od 6 h. nakon rastvornog žarenja i gašenja postignute su različite tvrdoće uzoraka serija A, B (D) i C zbog hlađenja u različitim sredstvima za gašenje. Iz histograma je vidljivo da je najveća tvrdoća (71 HV1) postignuta na uzorcima B i D koji su gašeni u vodi temperature 50 °C. Također, vidi se da nisu postignuta značajnija odstupanja u vrijednostima tvrdoće s obzirom na odabrana sredstva za gašenje.



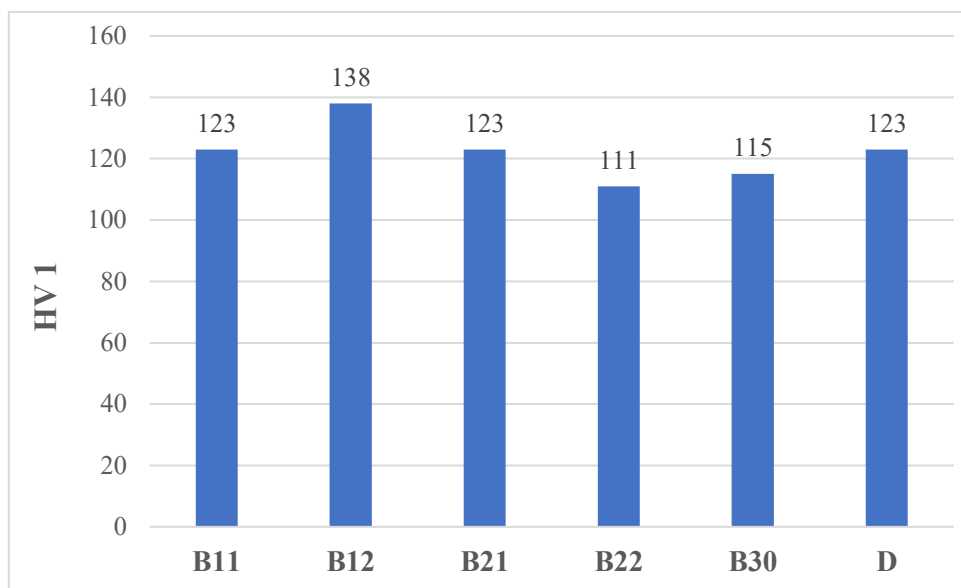
Slika 6.1 Tvrdoće ispitnih uzoraka nakon rastvornog žarenja

U nastavku će biti prikazani rezultati srednjih vrijednosti tvrdoća dobivenih nakon postupka umjetnog starenja po serijama uzoraka A, B (D) i C. Oznake uzoraka pojašnjene su u poglavlju 5.2. S obzirom na promjenu parametara (temperature i vremena) umjetnog starenja, očekivano su dobivene različite vrijednosti tvrdoće. Na slici 6.2 prikazane su srednje vrijednosti tvrdoća ispitnih uzoraka iz serije A.



**Slika 6.2 Tvrdoće uzoraka serije A nakon umjetnog starenja**

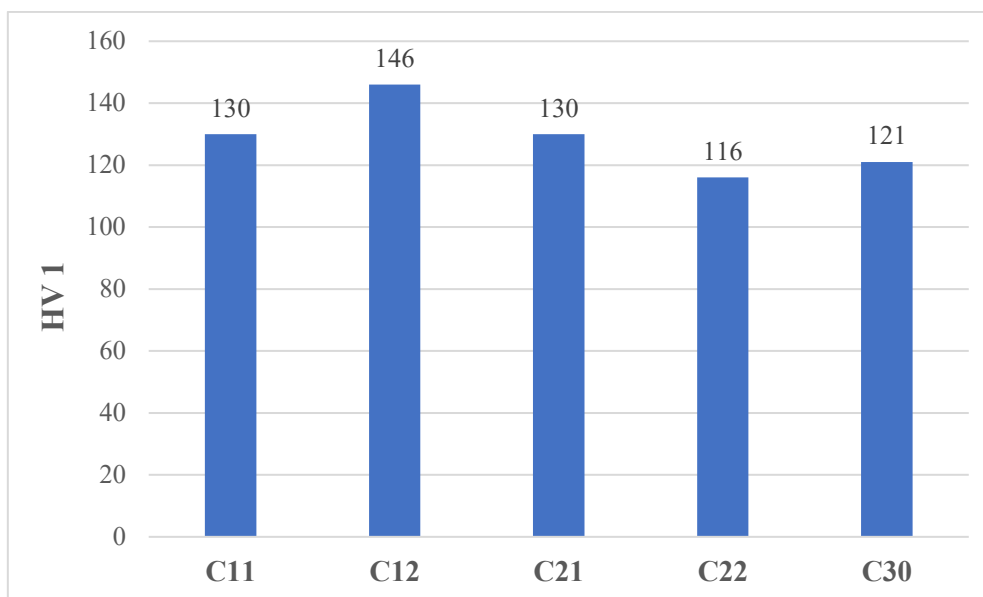
Iz histograma na slici 6.2 vidi se da se vrijednosti tvrdoće uzoraka iz A serije značajno razlikuju što je očekivano s obzirom na promjenu parametara umjetnog starenja. Najveću tvrdoću od 126 HV1 nakon provedenog umjetnog starenja pokazao je uzorak A12 te nakon njega uzorak A21, dok je najmanja tvrdoća od 90 HV1 postignuta kod uzorka A22. Dakle, najveća tvrdoća postignuta je kod uzorka koji je bio umjetno staren na temperaturi 150 °C u trajanju od 10 h, dok najmanju vrijednost tvrdoće postigao uzorak koji je bio umjetno staren na temperaturi 175 °C u trajanju od 10 h. Razlika u vrijednostima tvrdoće postignute kod uzoraka A12 i A22 iznosi 36 HV1 što je osjetna razlika. Na slici 6.3 prikazane su srednje vrijednosti tvrdoće uzoraka iz serije B i uzorka D u obliku histograma.



**Slika 6.3** Tvrdoće uzoraka serije B i uzorka D nakon umjetnog starenja

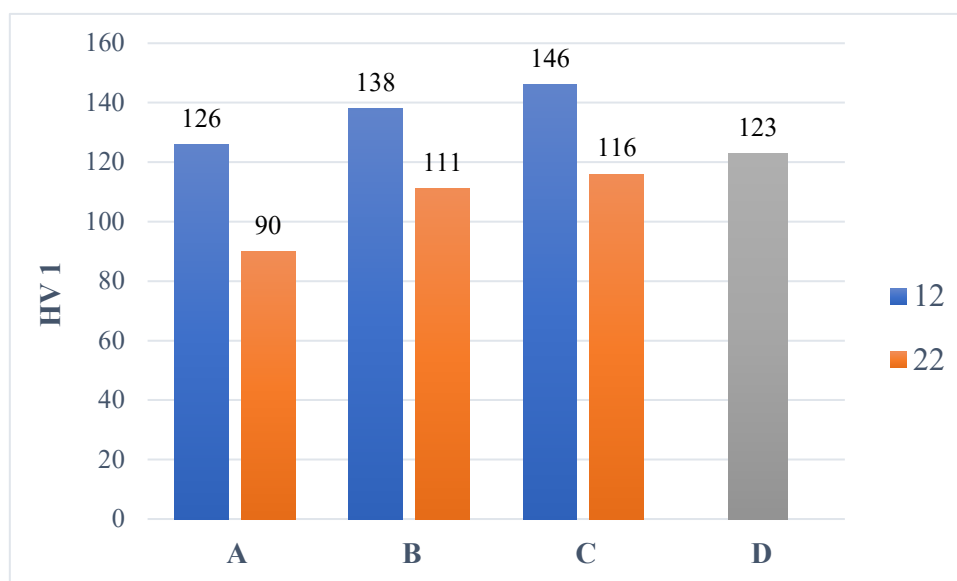
Iz slike 6.3 vidljivo je da su kod uzoraka iz serije B i uzorka D postignute značajno veće vrijednosti tvrdoća za razliku od uzoraka iz serije A prikazanih na prethodnom histogramu. Uzorak B12 posebno se ističe zbog najviše postignute tvrdoće u vrijednosti od 138 HV1, dok iza njega slijede uzorci B11, B21 i uzorak D kod kojih je postignuta jednaka prosječna vrijednost tvrdoće u iznosu od 123 HV1. Kao i u prethodnom slučaju kod uzoraka serije A, uzorak koji je bio umjetno staren na temperaturi od 150 °C u trajanju od 10 h postigao je najveću tvrdoću (A12, odnosno B12 u ovom slučaju). Najmanja tvrdoća u ovoj seriji vidljiva je kod uzorka B22, ali treba napomenuti da je i ona viša od prosjeka tvrdoća uzoraka iz A serije. Srednje vrijednosti tvrdoća uzoraka iz serije C prikazane su na slici 6.4.

Uzorci iz serije C pokazuju najviše srednje vrijednosti tvrdoća u usporedbi sa serijama A i B. Kao i u prethodnim slučajevima u serijama A i B, i ovdje je vidljivo da je najveća srednja vrijednost tvrdoće od čak 146 HV1 postignuta kod uzorka C12 koji je umjetno staren na temperaturi od 150 °C u trajanju od 10 h. Također, najmanja tvrdoća od 116 HV1 postignuta je na uzorku C22.



**Slika 6.4** Tvrdoće uzoraka serije C nakon umjetnog starenja

Na temelju prikazanih histograma (slike 6.2, 6.3 i 6.4) vidljiva je ponovljivost rezultata ispitivanja za svaki od ispitivanih uzoraka u određenoj seriji. Tako su na uzorcima A12, B12 i C12 izmjerene najveće tvrdoće, dok su, s druge strane, na uzorcima A22, B22 i C22 postignute najmanje tvrdoće nakon postupka umjetnog starenja. Usporedne vrijednosti postignutih tvrdoća navedenih uzoraka prikazane su na slici 6.5. S obzirom na izabrane različite parametre toplinske obrade očekivano su dobivene različite vrijednosti tvrdoća. Najveće srednje vrijednosti tvrdoće postignute su kod uzoraka iz serije C, dok su najmanje vrijednosti postignute kod uzoraka iz serije A, iako je nakon rastvornog žarenja najveća vrijednost tvrdoće postignuta kod uzoraka iz serije B. Isto tako, može se zaključiti da najbolje rezultate pokazuju uzorci koji su bili umjetno starenjeni na 150 °C u trajanju od 10 h, dok najmanje vrijednosti tvrdoća pokazuju uzorci umjetno starenjeni na 175 °C u trajanju od 10 h. Iz tih rezultata može se zaključiti da se najsporijim hlađenjem (voda temperature 85 °C) te naknadnim umjetnim starenjem (150 °C/10 h/zrak) postiže najveća konačna vrijednost tvrdoće.



Slika 6.5 Usporedba najveće i najmanje vrijednosti tvrdoće za ispitnih uzoraka

## 6.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na koroziju

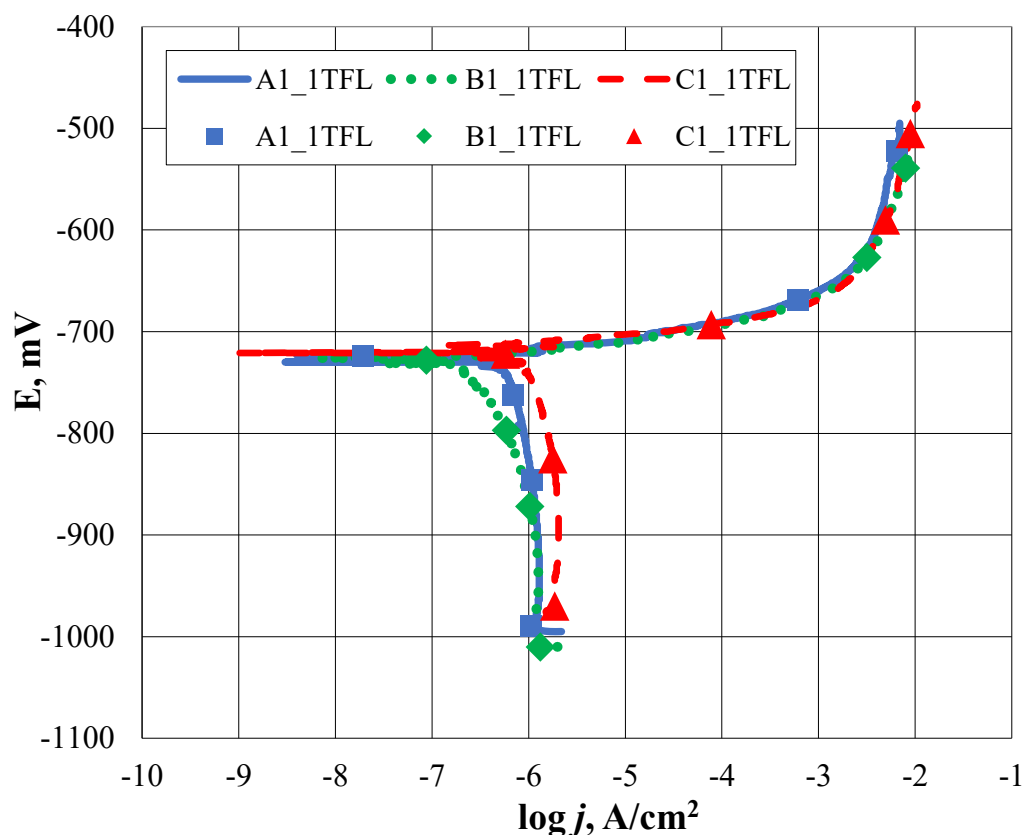
Otpornost uzoraka na koroziju bila je ispitana pomoću elektrokemijskih metoda istosmjernom strujom, primjenom metoda Tafelove ekstrapolacije i cikličke polarizacije. Ispitivanja su provedena na sobnoj temperaturi, a korozivni medij predstavljala je 3,5 %-tna otopina NaCl, pri čemu su rezultati analizirani uz pomoć softvera 352 SoftCorr III. Treba napomenuti kako je tijekom pripreme površine uzorka D za ova ispitivanja došlo do pretjeranog zagrijavanja materijala te uslijed toga i do dodatnog popuštanja pa rezultati elektrokemijskih ispitivanja za taj uzorak nisu prikazani. Shodno tome, u budućnosti bi trebalo provesti ova ispitivanja na uzorku s jednakim parametrima toplinske obrade.

### 6.2.1. Određivanje brzine korozije pomoću Tafelove ekstrapolacije

Brzina korozije i korozijski potencijal svakog ispitnog uzorka određeni su ekstrapolacijom anodnih i katodnih Tafelovih pravaca. Produživanjem tih pravaca u njihovom sjecištu određena je vrijednost korozijskog potencijala  $E_{kor}$  kao i vrijednost gustoće korozijske struje  $j_{kor}$  pomoću koje se izračunava brzina korozije  $v_{kor}$ . U nastavku će biti prikazani rezultati ispitivanja Tafelove ekstrapolacije u obliku dijagrama ovisnosti  $E$ - $\log j$ . U dijagramima će biti prikazani usporedni rezultati dobiveni na uzorcima s jednakim parametrima toplinske obrade kod umjetnog starenja, ali različitih serija (različito sredstvo za gašenje). Popis slika s dijagramima na kojima su pripadajući rezultati ispitivanih uzoraka prikazan je u tablici 6.1. Na svakom dijagramu prikazano je i šest točaka s ciljem jasnijeg prikaza rezultata.

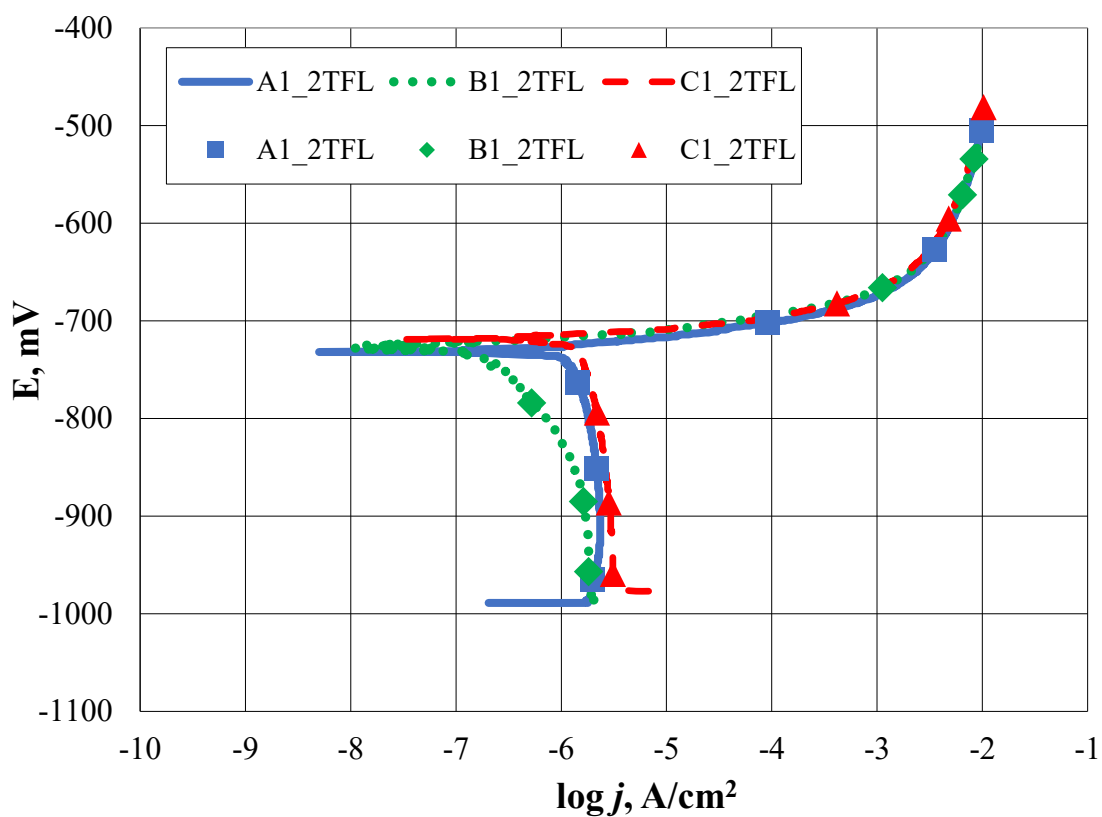
Tablica 6.1 Prikaz oznaka slika te ispitivanih uzoraka na njima (Tafelova ekstrapolacija)

Oznaka slike	Slika 6.6	Slika 6.7	Slika 6.8	Slika 6.9	Slika 6.10
Ispitivani uzorci	A11, B11, C11	A12, B12, C12	A21, B21, C21	A22, B22, C22	A30, B30, C30

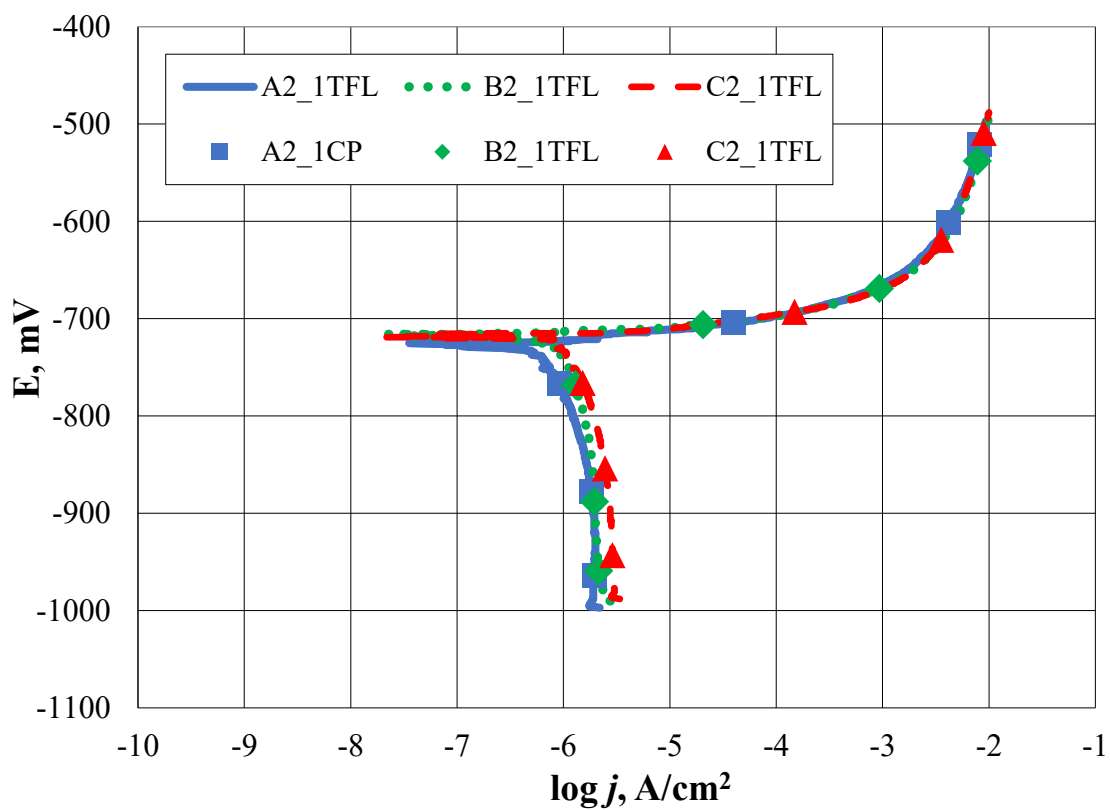


Slika 6.6 Tafelovi dijagrami za uzorke A11, B11 i C11

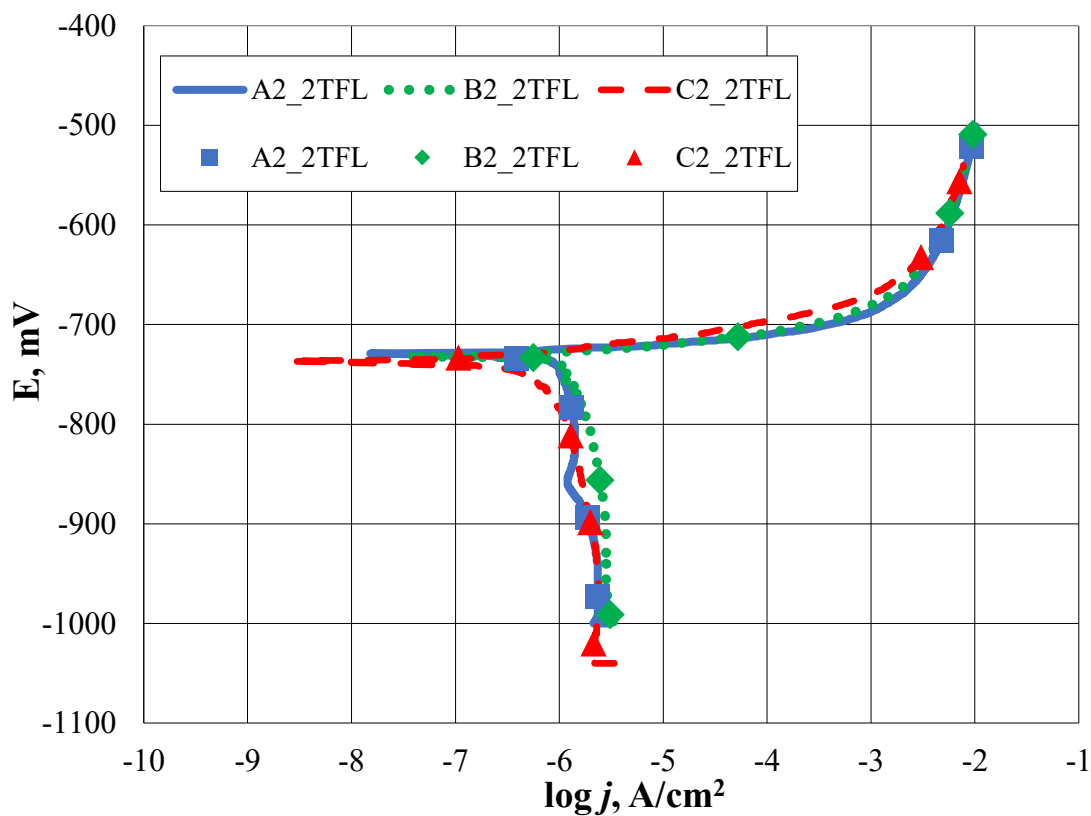




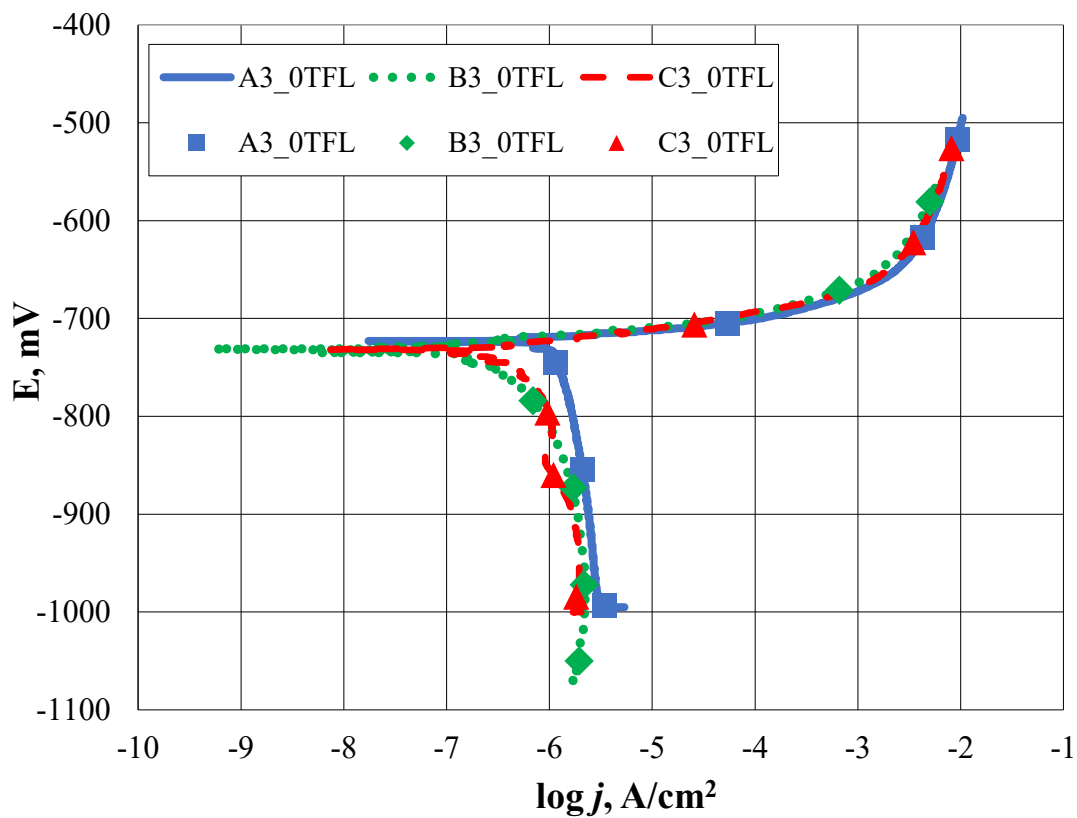
Slika 6.7 Tafelovi dijagrami za uzorke A12, B12 i C12



Slika 6.8 Tafelovi dijagrami za uzorke A21, B21 i C21



Slika 6.9 Tafelovi dijagrami za uzorke A22, B22 i C22



Slika 6.10 Tafelovi dijagrami za uzorke A30, B30 i C30

Iz prikazanih dijagrama vidljiva je ponovljivost rezultata ispitivanja što je bilo i očekivano s obzirom da se radi o istome materijalu. Vrijednosti korozijskih potencijala kod svih ispitnih uzoraka približno su jednake. Izgled katodnih i anodnih krivulja vrlo je sličan kod svih ispitnih uzoraka i vrijednosti parametara korozije neće značajno odstupati. U tablici 6.2 prikazane su vrijednosti  $E_{kor}$ ,  $j_{kor}$  i  $v_{kor}$  dobivene Tafelovom ekstrapolacijom anodnih i katodnih pravaca.

**Tablica 6.2 Vrijednosti dobivene Tafelovom ekstrapolacijom za sve ispitne uzorke**

Uzorak	Parametar elektrokemijskog ispitivanja		
	$E_{kor}$ , mV	$j_{kor}$ , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$v_{kor}$ , mm/god
A11	-724	0,65	$7,12 \times 10^{-3}$
B11	-727	0,45	$4,93 \times 10^{-3}$
C11	-720	1,25	$1,37 \times 10^{-2}$
A12	-731	1,39	$1,52 \times 10^{-2}$
B12	-727	0,44	$4,82 \times 10^{-3}$
C12	-718	1,69	$1,85 \times 10^{-2}$
A21	-726	0,85	$9,32 \times 10^{-3}$
B21	-717	1,01	$1,11 \times 10^{-2}$
C21	-718	1,34	$1,47 \times 10^{-2}$
A22	-730	1,10	$1,21 \times 10^{-2}$
B22	-731	1,41	$1,55 \times 10^{-2}$
C22	-736	0,81	$8,88 \times 10^{-3}$
A30	-723	1,42	$1,56 \times 10^{-2}$
B30	-731	0,50	$5,48 \times 10^{-3}$
C30	-731	0,71	$7,78 \times 10^{-3}$

Kod svih ispitnih uzoraka vrijednosti korozijskog potencijala su negativne te se kreću u rasponu od  $-727 \pm 10$  mV. Negativne vrijednosti ukazuju na to da će izlaganje materijala korozivnom mediju (u ovom slučaju 3,5 % NaCl) izazvati korozijska oštećenja na ispitivanim površinama uzoraka što će se i vidjeti na slikama sa stereomikroskopa u nastavku rada. Najveću vrijednost negativnog korozijskog potencijala ima uzorak C22, a najmanju uzorak B21. Gustoća korozijske struje i brzina korozije proporcionalne su veličine pa je tako ekstrapolacijom anodnog i katodnog pravca određena najmanja gustoća struje (tako i izračunata brzina korozije) kod uzorka B12, dok je najveća brzina korozije određena kod

uzorka C12. Iako se gustoće korozijske struje značajno ne razlikuju, njihov utjecaj na brzinu korozije je osjetan pa je tako razlika između najveće i najmanje određene brzine gotovo za jedan red veličine.

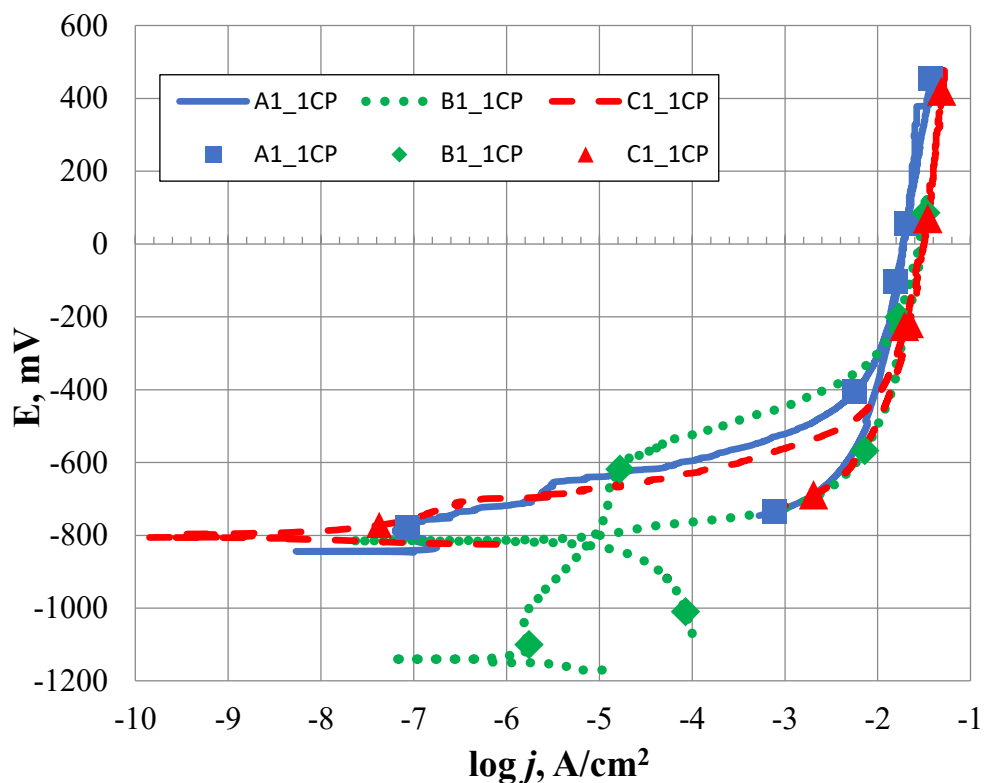
### 6.2.2. Rezultati ispitivanja cikličke polarizacije

Pomoću cikličke polarizacije određena je sklonost ispitivanih uzoraka prema rupičastoj koroziji (pitingu) u 3,5 %-tnoj otopini NaCl te su određeni potencijal pitinga  $E_{pit}$  i zaštitni potencijal  $E_{zpit}$  za svaki od uzoraka.

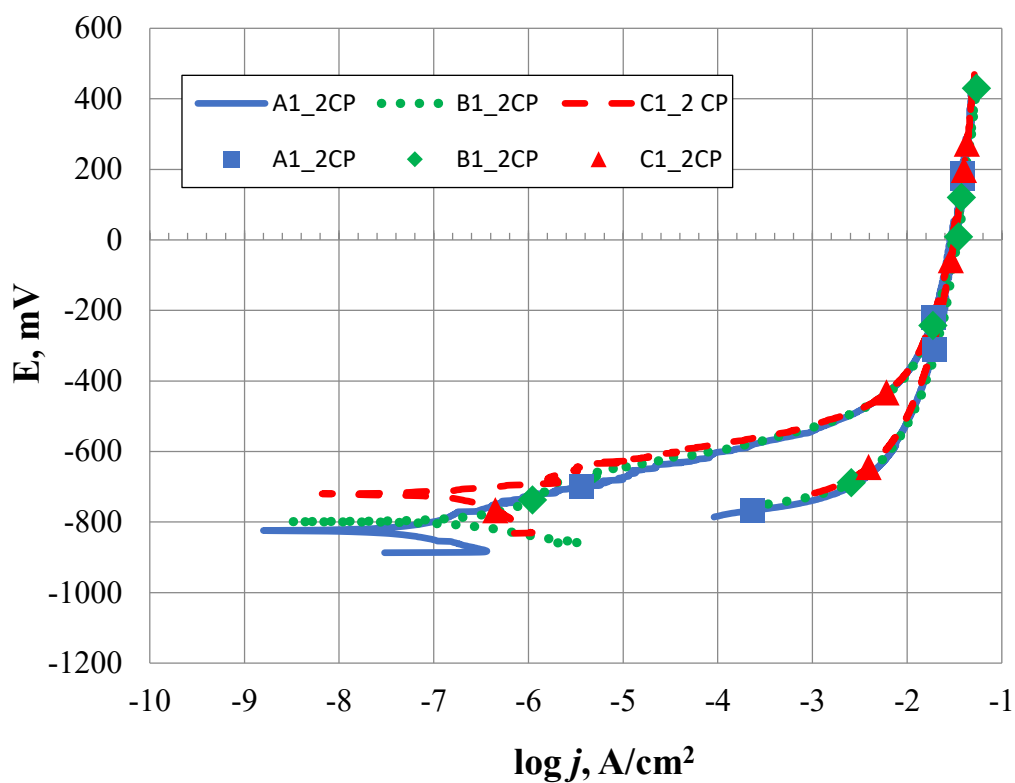
Rezultati će biti prikazani jednako kao i kod Tafelove ekstrapolacije pa je tako u tablici 6.2 prikazan popis slika na kojima se nalaze dijagrami s pripadajućim ispitivanim uzorcima. Na svakom dijagramu tako su prikazane krivulje cikličke polarizacije troje uzoraka, pri čemu je na krivuljama označeno šest točaka kako bi se jasnije vidjeli rezultati.

Tablica 6.3 Prikaz oznaka slika te ispitivanih uzoraka na njima (ciklička polarizacija)

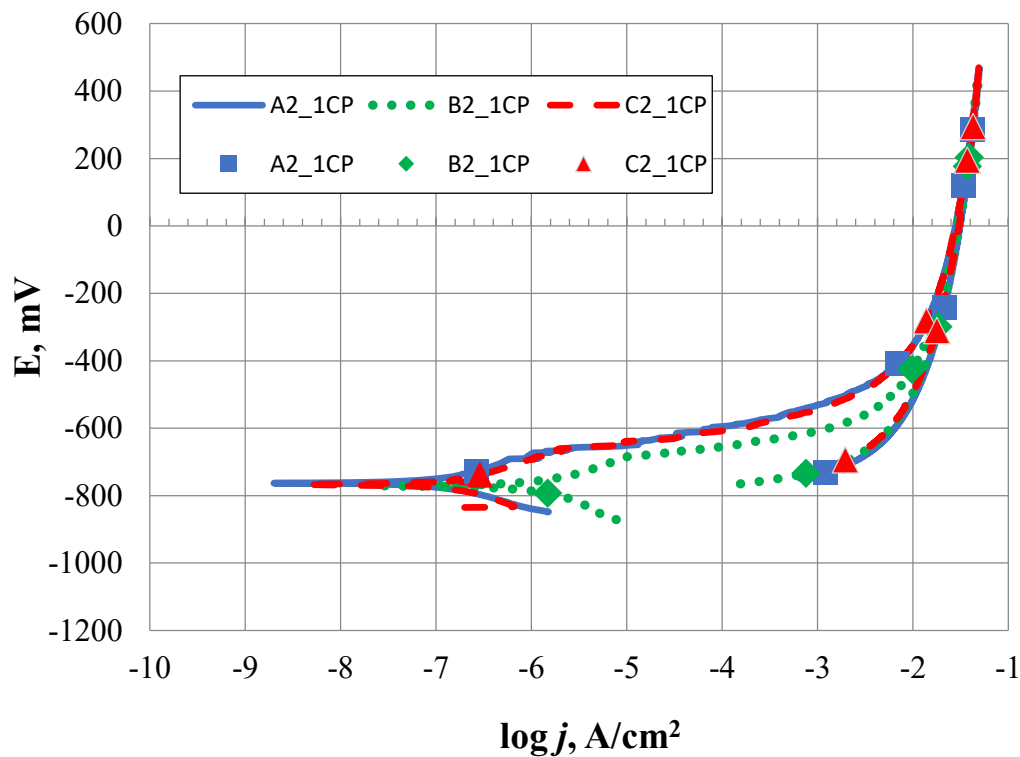
Oznaka slike	Slika 6.12	Slika 6.13	Slika 6.14	Slika 6.15	Slika 6.16
Ispitivani uzorci	A11, B11, C11	A12, B12, C12	A21, B21, C21	A22, B22, C22	A30, B30, C30



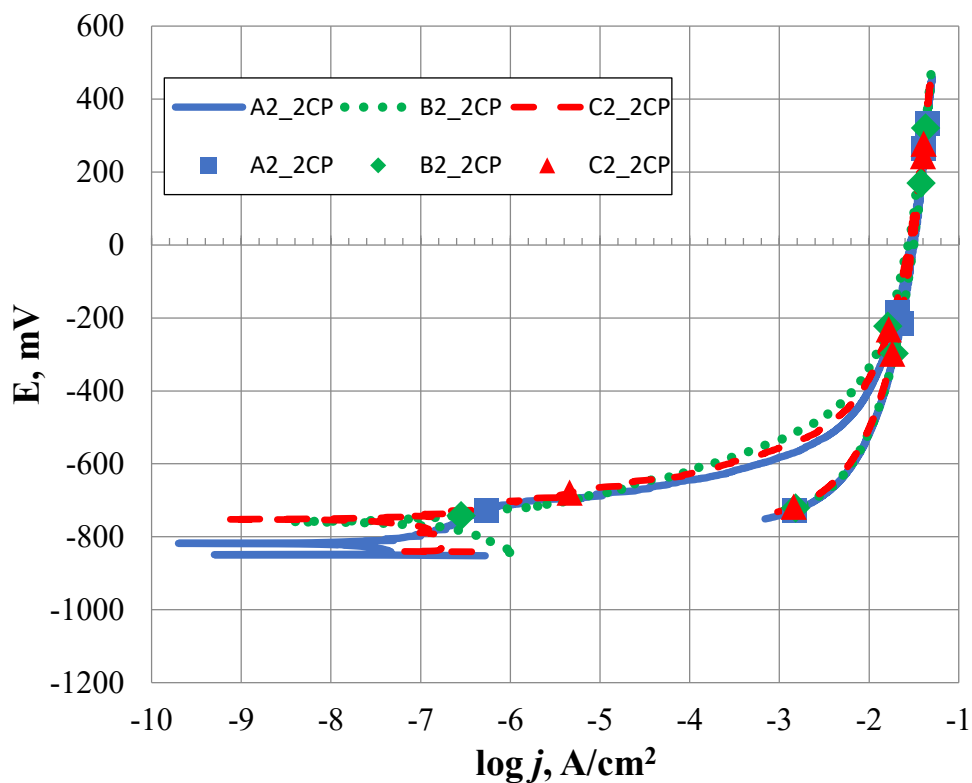
Slika 6.11 Krivulje cikličke polarizacije uzoraka A11, B11 i C11



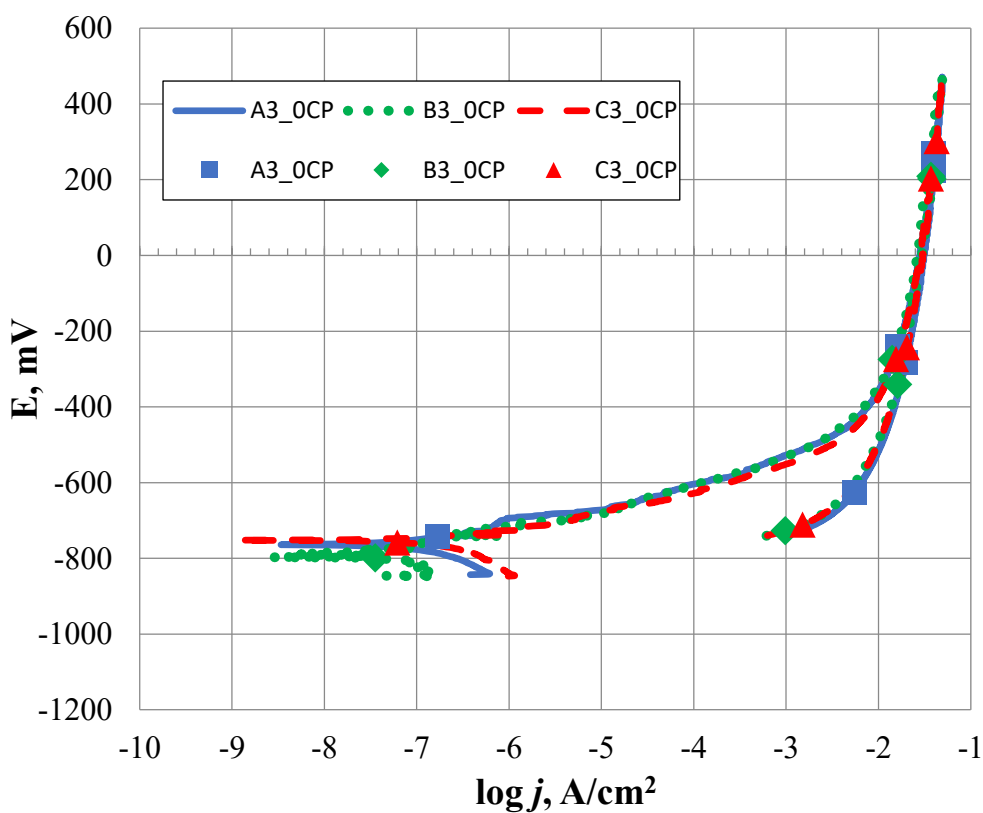
Slika 6.12 Krivulje cikličke polarizacije uzoraka A12, B12 i C12



Slika 6.13 Krivulje cikličke polarizacije uzoraka A21, B21 i C21



Slika 6.14 Krivulje cikličke polarizacije uzoraka A22, B22 i C22



Slika 6.15 Krivulje cikličke polarizacije uzoraka A30, B30 i C30

Vrijednosti potencijala pitinga i zaštitnog potencijala za rupičastu koroziju očitane su iz dobivenih dijagrama te su prikazane u tablici 6.4. Kao i kod Tafelove ekstrapolacije, vidi se da se krivulje cikličke polarizacije svih uzoraka gotovo preklapaju, pri čemu su prisutna minimalna odstupanja, pa tako i dobivene vrijednosti ne odstupaju značajno jedna od druge. Kod svih uzoraka popucao je oksidni film te je došlo do pojave rupičaste korozije.

**Tablica 6.4** Vrijednosti dobivene cikličkom polarizacijom za sve ispitne uzorke

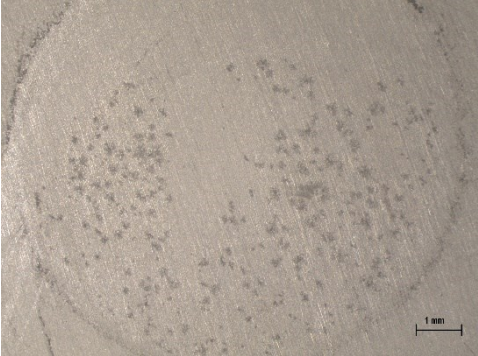

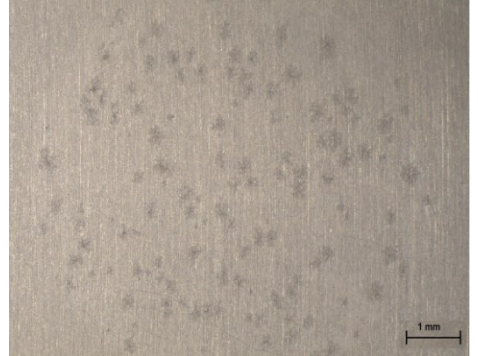

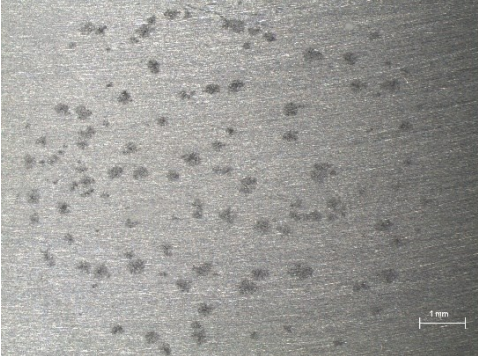

Uzorak	Parametri elektrokemijskog ispitivanja	
	$E_{pit}$ , mV	$E_{zpit}$ , mV
A11	-654	/
B11	-581	-773
C11	-703	/
A12	-767	/
B12	-678	/
C12	-637	/
A21	-657	/
B21	-683	/
C21	-665	/
A22	-699	/
B22	-725	/
C22	-688	/
A30	-690	/
B30	-706	/
C30	-726	/

Krivulja uzorka B11 jedina je čiji izgled značajno odstupa od ostalih krivulja te je kod tog uzorka određen najmanje negativni potencijal pitinga u vrijednosti od -581 mV. Isto tako, jedino kod tog uzorka određen je zaštitni potencijal što govori da svi uzorci imaju veliku tendenciju prema pojavi pitinga, iako su i kod njega prisutna korozijska oštećenja jer je vrijednost zaštitnog potencijala dosta negativnija od vrijednosti potencijala pitinga. S druge strane, najveći negativni potencijal određen je kod uzorka A12 u vrijednosti od -767 mV, što je velika razlika s obzirom da su svi uzorci izrađeni od istog materijala. Iz dijagrama se također može vidjeti da su vrijednosti pri kojima dolazi do pojave rupičaste korozije ( $E_{pit}$ ) neznatno više od vrijednosti potencijala korozije ( $E_{kor}$ ) što upućuje na početak pojave pitinga ubrzo nakon kontakta materijala s korozivnim medijem. Iz dobivenih rezultata može se vidjeti kako je ova aluminijska legura sklona lokaliziranoj rupičastoj koroziji u 3,5 % otopini natrijevog klorida što se vidi i po prikazanim slikama snimljenih površina prikazanih u nastavku.

### 6.2.3. Analiza površine uzoraka nakon provedenih ispitivanja

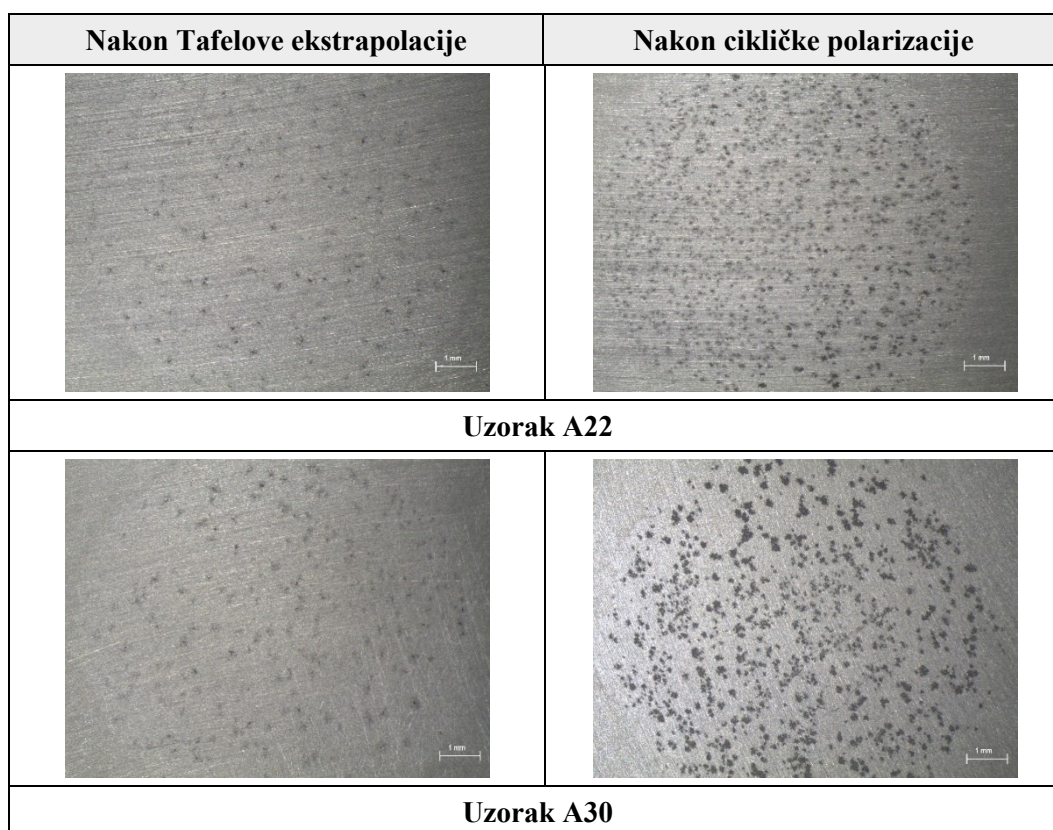
Nakon provedenih elektrokemijskih ispitivanja pomoću stereomikroskopa Leica MZ6 snimljene su površine uzoraka koje su prikazane u tablicama 6.5-6.10. Slike su snimljene pod povećanjem od 12,5x, dok mjerna skala u donjem desnom kutu kod uzoraka iznosi 1 mm. S obzirom na dobivene rezultate u dijagramima, očekivano su i snimljene površine ispitivanih uzoraka različite, pri čemu su kod nekih uzoraka uočljiva značajna korozijska oštećenja.

**Tablica 6.5 Snimke površina uzoraka A11, A12 i A21 nakon elektrokemijskih ispitivanja**

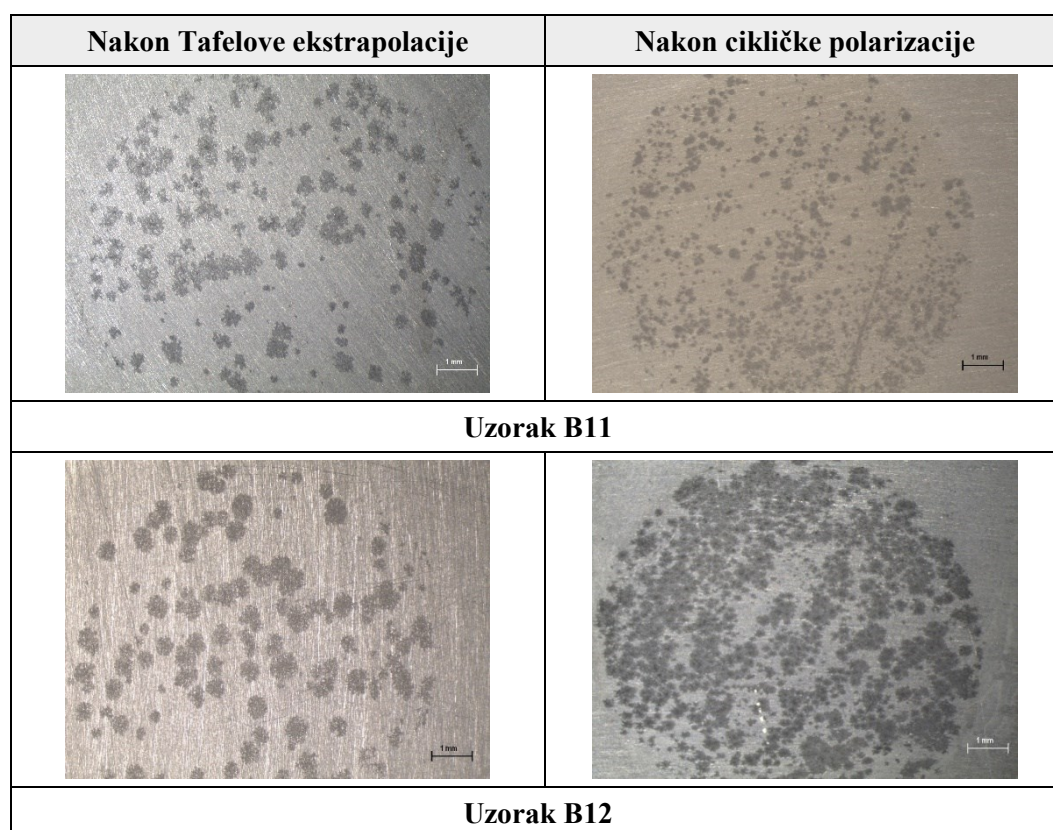
Nakon Tafelove ekstrapolacije	Nakon cikličke polarizacije
	
<b>Uzorak A11</b>	
	
<b>Uzorak A12</b>	
	
<b>Uzorak A21</b>	



Tablica 6.6 Snimke površina uzoraka A22 i A30 nakon elektrokemijskih ispitivanja

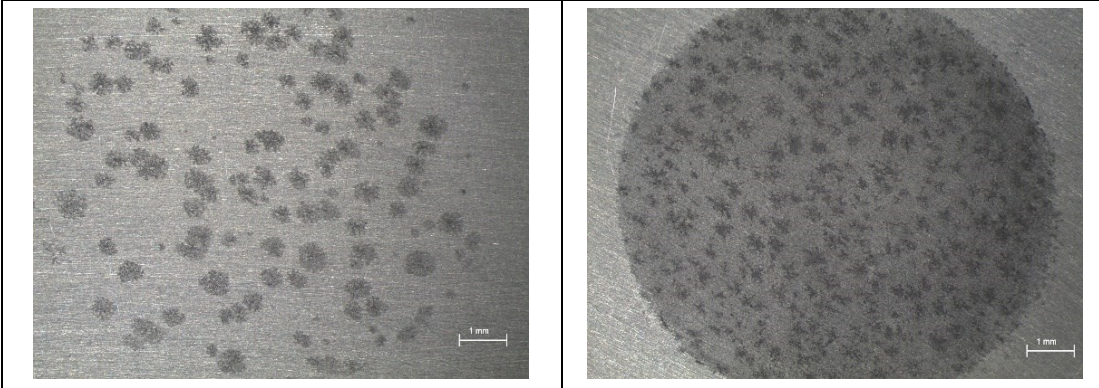
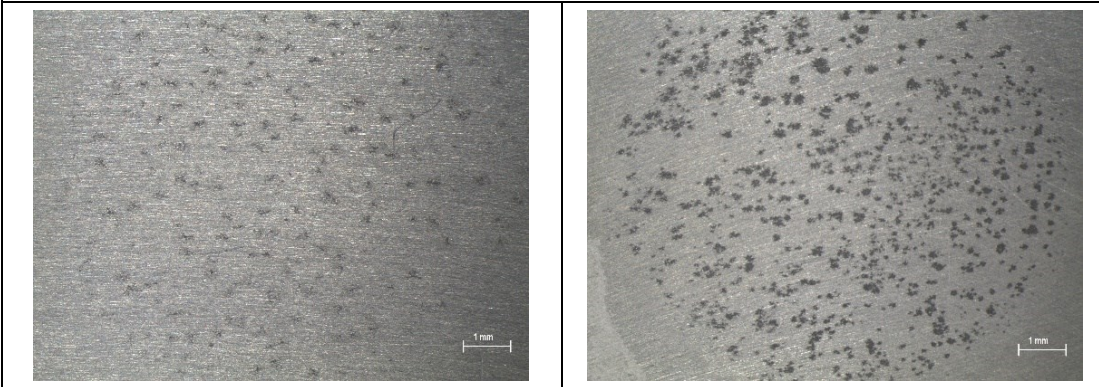
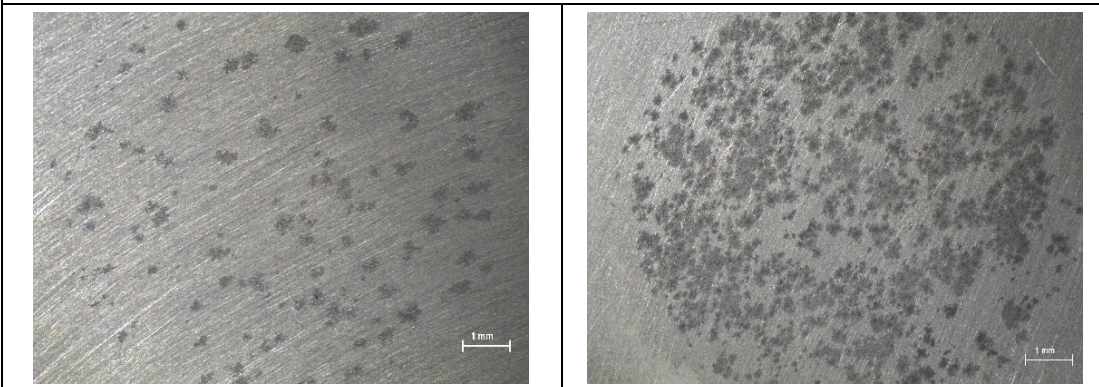


Tablica 6.7 Snimke površina uzoraka B11 i B12 nakon elektrokemijskih ispitivanja



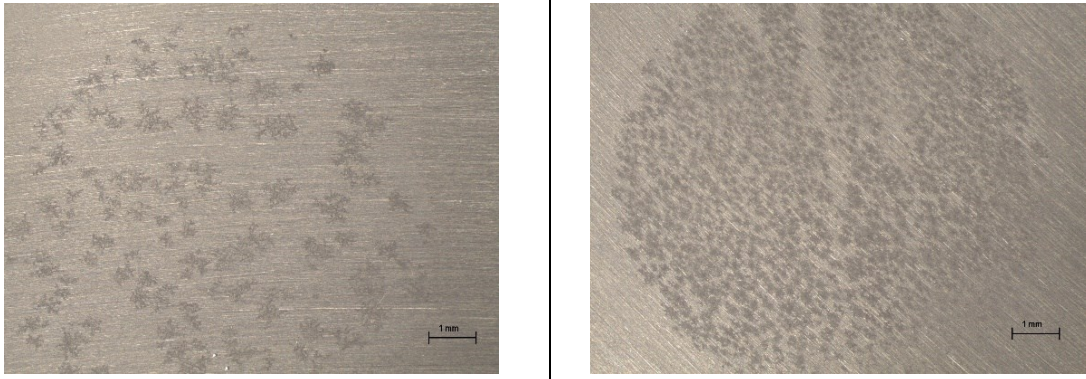
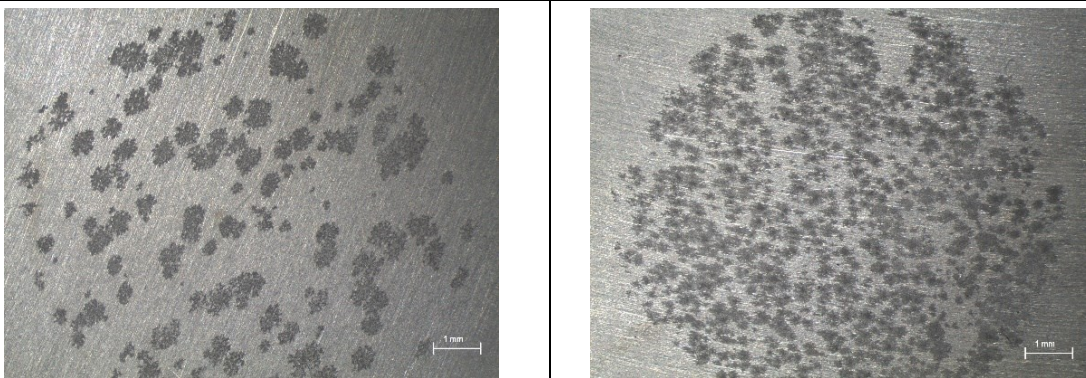
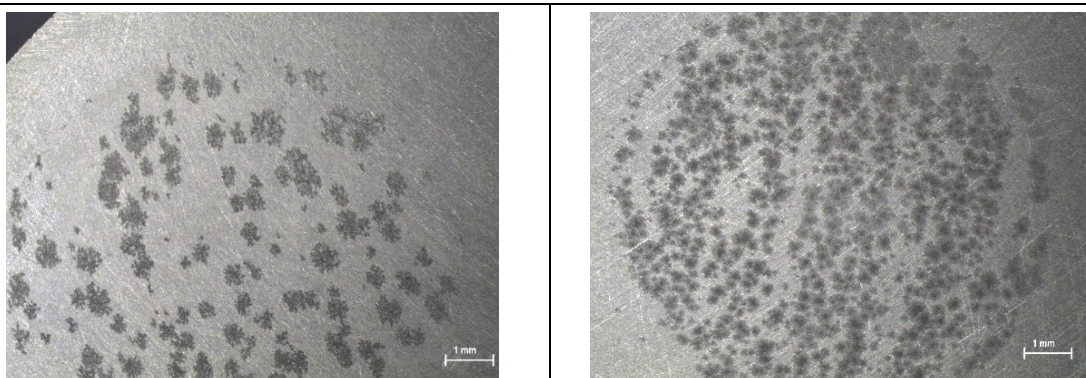

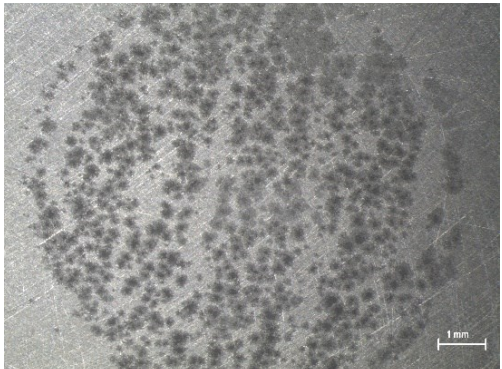


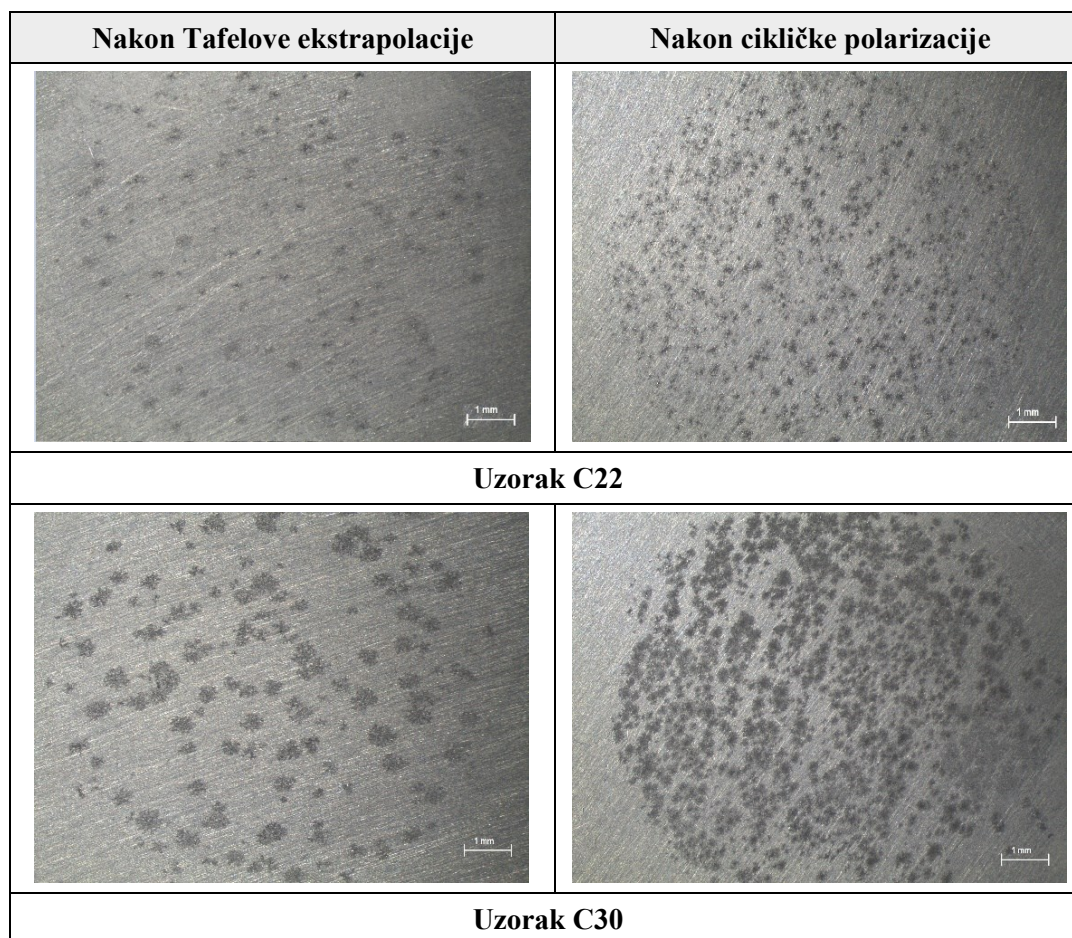
Tablica 6.8 Snimke površina uzoraka B21, B22 i B30 nakon elektrokemijskih ispitivanja

Nakon Tafelove ekstrapolacije	Nakon cikličke polarizacije
 <p>Uzorak B21</p>	
 <p>Uzorak B22</p>	
 <p>Uzorak B30</p>	



Tablica 6.9 Snimke površina uzoraka C11, C12 i C21 nakon elektrokemijskih ispitivanja

Nakon Tafelove ekstrapolacije	Nakon cikličke polarizacije
	
<b>Uzorak C11</b>	
	
<b>Uzorak C12</b>	
	
<b>Uzorak C21</b>	

**Tablica 6.10 Snimke površina uzoraka C22 i C30 nakon elektrokemijskih ispitivanja**

Analizom korodirane površine snimljene stereomikroskopom, na svim uzorcima je uočena lokalizirana rupičasta korozija, pri čemu je ona na nekim uzorcima više, a kod nekih manje izražena. Vidljivo je da je na mnogim uzorcima došlo do intenzivne korozije što je posljedica velike agresivnosti vodene otopine 3,5 % NaCl. Ona sadrži kloridne ione koji prouzrokuju pucanje pasivnog oksidnog filma na površini uzoraka.

Nakon Tafelove ekstrapolacije kod svih uzoraka nastaju rupičasta oštećenja koja su kod većine uzoraka prilično velikog promjera, a najviše su uočljiva kod uzoraka serije C. Isto tako, može se vidjeti da se najveći pitovi u svim serijama javljaju kod uzoraka oznaka „12“ i „21“. Primjetljive su različite gustoće i veličine pitova kod svih uzoraka. Najmanja veličina rupica javlja se kod uzoraka serije A, dok su najveće rupice vidljive kod uzoraka serije C.

Poslije cikličke polarizacije vidljivo je da su svi uzorci pretrpjeli velika korozijska oštećenja (znatno veća nego nakon Tafelove ekstrapolacije) te je kod svih uzoraka prisutna vrlo velika koncentracija pitova po cijeloj ispitnoj površini. To upućuje na vrlo veliku sklonost materijala



prema pitingu u otopini 3,5 % NaCl kao što se vidjelo i nakon provedene Tafelove ekstrapolacije. Najmanja gustoća pitova vidi se kod uzoraka oznaka „22“ u svim serijama. Kod nekih uzoraka, npr. kod B30 i C30, koncentracija pitova toliko je velika da dolazi čak i do preklapanja rupica što bi izazvalo brzo propadanje materijala u tom korozivnom mediju jer su rupice izuzetno opasna mjesta za inicijaciju korozije.

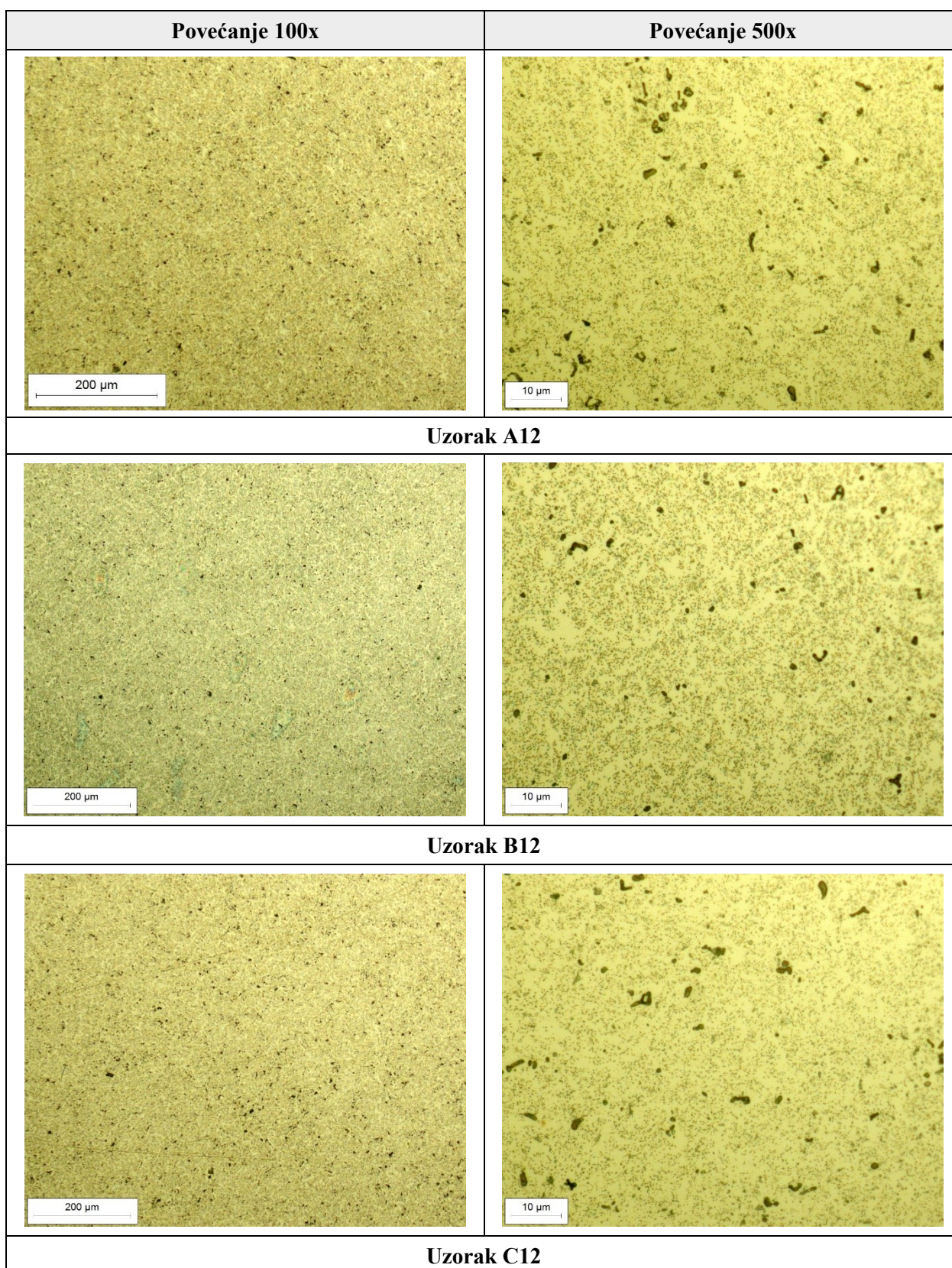
### 6.3. Analiza mikrostrukture uzoraka

Nakon provedenih ispitivanja, uz pomoć svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51 prikazanog na slici 6.17 analizirana je mikrostruktura ispitnih uzoraka. Prije samog ispitivanja, uzorci su bili metalografski pripremljeni brušenjem i poliranjem, te izlaganjem Kellerovom reagensu u trajanju od 30 s. Kellerov reagens je otopina koja se sastoji od 95 mL destilirane vode, 2,5 mL dušične kiseline, 1,5 mL klorovodične kiseline i 1 mL fluorovodične kiseline. Mikrostruktura uzoraka iz serija 12 i 22 prikazana je u tablicama 6.11 i 6.12, pri čemu su prikazane snimljene površine pri povećanjima 100x i 500x.



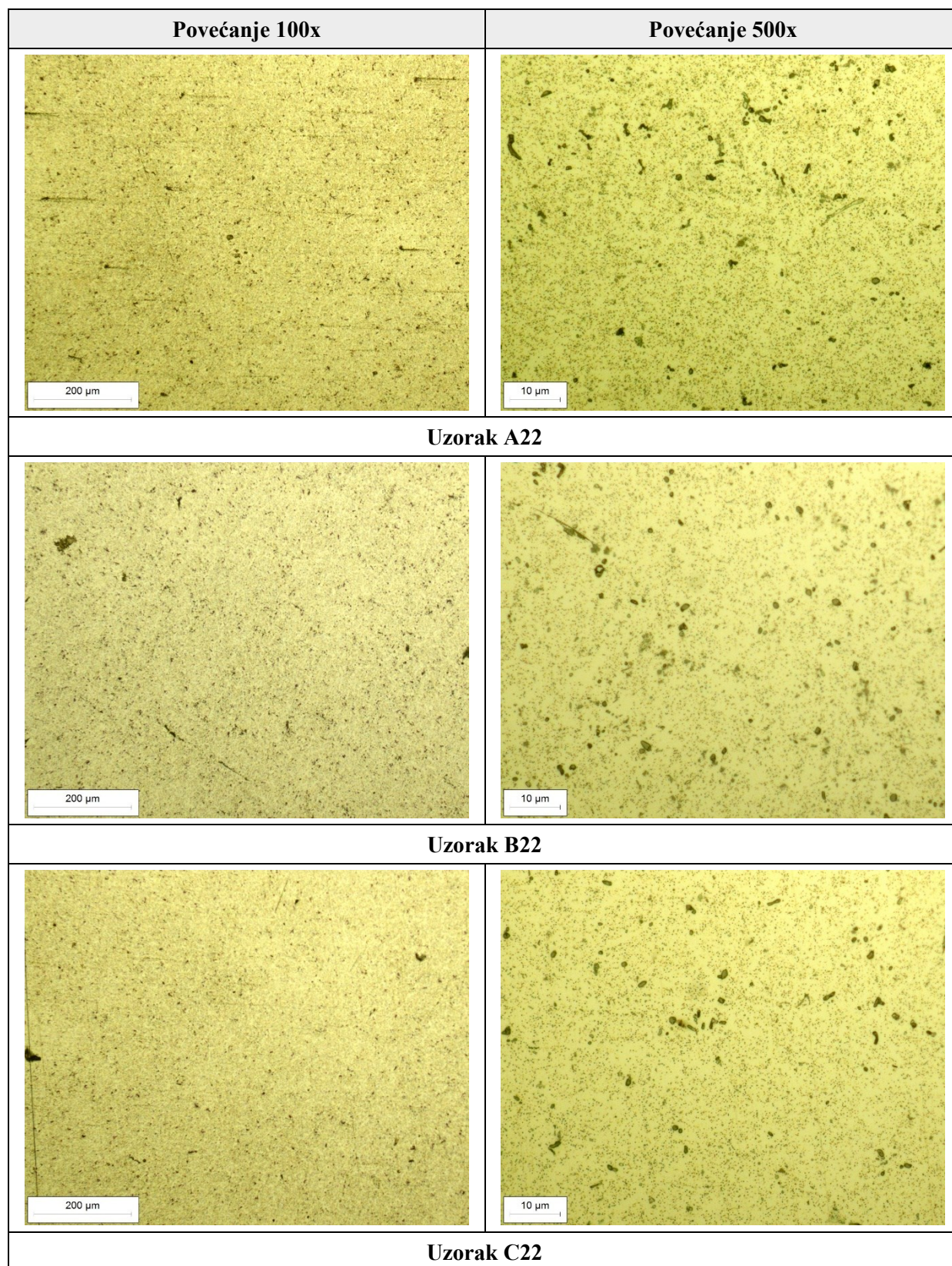
Slika 6.16 Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Tablica 6.11 Mikrostruktura uzoraka A12, B12 i C12





Tablica 6.12 Mikrostruktura uzoraka A22, B22 i C22



Iz prikazanih mikrostruktura ispitnih uzoraka pod povećanjem 100x kod svih uzoraka vidljivo je jednako stanje nagrižene površine. Uočava se da ne postoje veće pukotine ili poroznosti te da su precipitacijske čestice ravnomjerno raspoređene po površini uzorka. Kod većeg povećanja 500x, pojavljuju se i jasnije se vide pore i mikropukotine u ispitivanoj aluminijskoj leguri slučajno raspoređene po cijeloj površini uzorka. Kod ovog povećanja vrlo se lijepo vidi kako je vrlo veliki broj sitnih izlučenih precipitata koji su ravnomjerno i gusto raspršeni u matrici aluminijske, što govori da je toplinska obrada dobro provedena uz ispravno odabrane parametre.

#### **6.4. Diskusija o rezultatima ispitivanja**

Na uzorcima su provedena ispitivanja tvrdoće i elektrokemijska ispitivanja (Tafelova ekstrapolacija i ciklička polarizacija) u 3,5 %-tnoj otopini NaCl, s ciljem utvrđivanja optimalnih parametara toplinske obrade precipitacijski očvršćive aluminijske legure AlSi1MgMn oznake EN-AW-6082 koji će dati najbolju kombinaciju tvrdoće i otpornosti na koroziju. Najprije je iz ekstrudirane šipke izrezano ukupno 16 uzoraka u obliku valjka jednakih dimenzija koji su podvrgnuti toplinskoj obradi koja se sastojala od rastvornog žarenja, jednakog za sve uzorke, hlađenja, te umjetnog starenja nakon kojeg su svi uzorci hlađeni na zraku, uz to da je svaki uzorak imao različite parametre toplinske obrade. Nakon provedene toplinske obrade površine uzoraka bile su pripremljene za daljnja ispitivanja tvrdoće, elektrokemijska ispitivanja te za analizu mikrostrukture, pri čemu su nakon svakog izvršenog ispitivanja uzorci bili prikladno metalografski pripremljeni za sljedeće ispitivanje kako bi se dobili što točniji i jasniji rezultati. Tvrdoća uzoraka bila je mjerena nakon rastvornog žarenja te nakon umjetnog starenja, dok su elektrokemijska ispitivanja i analiza mikrostrukture provedena poslije umjetnog starenja.

Iz rezultata ispitivanja tvrdoće nakon provedenog homogenizacijskog žarenja pokazalo se da najveću tvrdoću postižu uzorci serije B i uzorak D koji su bili gašeni u vodi temperature 50 °C, iako vrijednosti tvrdoće uzoraka serija A i C, gašenih u vodi temperature 20 °C, odnosno 85 °C, značajno ne odstupaju te se može zaključiti kako se s odabranim različitim sredstvima za gašenje ne postižu velike razlike vrijednosti tvrdoća. Poslije provedenog umjetnog starenja ponovno je provedeno ispitivanje tvrdoće nad svakim uzorkom koje je pokazalo kako izbor parametara umjetnog starenja u velikoj mjeri utječe na konačne vrijednosti tvrdoće. Nakon izmjerenih tvrdoća, pokazalo se da najviše tvrdoće postižu uzorci



iz serije C, dok najmanje tvrdoće postižu uzorci iz serije A. Općenito, vidljiva je ponovljivost ispitivanja na uzorcima iz svake serije koji su imali jednake parametre umjetnog starenja. Tako su uzorci oznake „12“ u svakoj seriji postigli najveće vrijednosti tvrdoća, dok su s druge strane uzorci oznake „22“ postigli najmanje vrijednosti tvrdoća. Najveća vrijednost od 146 HV1 postignuta je kod uzorka C12, dok je najmanja vrijednost od 90 HV1 postignuta kod uzorka A22, što predstavlja veliku razliku u odnosu na tvrdoću aluminijskih legura. Uzorci s najvećom tvrdoćom umjetno su starenjeni na temperaturi 150 °C u trajanju od 10 h, dok su uzorci najmanje tvrdoće umjetno starenjeni na temperaturi 175 °C u trajanju od 10 h. Najveće tvrdoće uzoraka, nakon uzorka C12, postignute su kod uzoraka B12, C21, C11 te A12.

Rezultati elektrokemijskih ispitivanja pokazali su da odabir različitih parametara toplinske obrade značajno ne utječe na razliku u vrijednostima određenih parametara koji pokazuju otpornost na koroziju s obzirom da se radi o istome materijalu. Iako su razlike u dobivenim vrijednostima nakon provedenih ispitivanja male, one su vrlo značajne u svijetu strojarstva što se pogotovo odnosi na brzinu korozije.

Najprije je na svim uzorcima provedena metoda Tafelove ekstrapolacije na temelju koje su dobiveni Tafelovi dijagrami za sve ispitne uzorke. Iz dobivenih rezultata vidi se da se dijagrami kod svih uzoraka gotovo preklapaju, tako da su i određene vrijednosti na temelju dijagrama ( $E_{kor}$ ,  $j_{kor}$ ,  $v_{kor}$ ) približno jednake, tj. ne odstupaju značajno jedna od druge. Spomenute vrijednosti određene su ekstrapolacijom anodnih i katodnih Tafelovih pravaca. Dobivene vrijednosti korozijskog potencijala kod svih uzoraka su negativne te se kreću u uskom rasponu od  $-727 \pm 10$  mV, što govori da je kod svih uzoraka došlo do korozijskih oštećenja uslijed agresivnog djelovanja otopine 3,5 % NaCl na površinu uzoraka. Dobivene vrijednosti gustoće struje dobivene ekstrapolacijom također se značajno ne razlikuju, iako se njihovim uvrštavanjem u jednadžbu za izračun brzine korozije dobivaju osjetne razlike brzina korozije ispitnih uzoraka. Najmanja vrijednost gustoće struje određena je kod uzorka B12, dok je najveća prisutna kod uzorka C12. Pošto su gustoća struje i brzina korozije međusobno proporcionalne veličine, tako je i izračunata brzina korozije najmanja kod uzorka B12, a ona iznosi  $4,82 \times 10^{-3}$  mm/god, dok je najveća brzina u iznosu od  $1,85 \times 10^{-2}$  mm/god, što predstavlja veliku razliku za gotovo jedan red veličine.

Pomoću cikličke polarizacije dobivene su vrijednosti potencijala pitinga i zaštitnog potencijala koje su određene iz dijagrama na temelju dobivenih krivulja nakon provedenih ispitivanja. I u ovom se slučaju krivulje gotovo pa preklapaju te se određene negativne

vrijednosti  $E_{pit}$  kreću u rasponu od 100 mV, pri čemu krivulja uzorka B11 jedina odstupa od ostalih krivulja te se jedino kod nje javlja i zaštitni potencijal  $E_{zpit}$ , iako je on dosta negativniji od potencijala pitinga tako da je i ovaj uzorak sklon pitingu. Iz dijagrama svih uzoraka vidljivo je da je u ovom korozivnom mediju tendencija legure prema pitingu vrlo velika te da do pojave lokaliziranih rupica dolazi nešto iznad korozijskog potencijala, što govori o tome kako je ubrzo nakon kontakta otopine 3,5 % NaCl i uzoraka došlo do pucanja oksidnog pasivnog filma te do inicijacije prvotnih korozijskih oštećenja u obliku rupica.

Analizom mikrostrukture pokazalo se da je toplinskom obradom postignuto željeno stanje mikrostrukture. Dobiven je homogeni materijal s ravnomjerno raspoređenim precipitacijskim česticama u matrici aluminija, koje su vrlo sitne te je vrlo velika gustoća tih čestica u samom materijalu. S većim povećanjima vidljive su i pore i mikropukotine koje su vjerojatno posljedica proizvodnje polaznog materijala.

U tablici 6.13 prikazane su vrijednosti određenih parametara nakon svih provedenih ispitivanja na uzorcima.

**Tablica 6.13 Vrijednosti određenih parametara svih uzoraka nakon provedenih ispitivanja**

Uzorak	Parametri elektrokemijskih ispitivanja					Tvrdća, HV
	$E_{kor}$ , mV	$j_{kor}$ , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	$v_{kor}$ , mm/god	$E_{pit}$ , mV	$E_{zpit}$ , mV	
A11	-724	0,65	$7,12 \cdot 10^{-3}$	-654	/	109
B11	-727	0,45	$4,93 \cdot 10^{-3}$	-581	-773	123
C11	-720	1,25	$1,37 \cdot 10^{-2}$	-703	/	130
A12	-731	1,39	$1,52 \cdot 10^{-2}$	-767	/	126
B12	-727	0,44	$4,82 \cdot 10^{-3}$	-678	/	138
C12	-718	1,69	$1,85 \cdot 10^{-2}$	-637	/	146
A21	-726	0,85	$9,32 \cdot 10^{-3}$	-657	/	114
B21	-717	1,01	$1,11 \cdot 10^{-2}$	-683	/	123
C21	-718	1,34	$1,47 \cdot 10^{-2}$	-665	/	130
A22	-730	1,10	$1,21 \cdot 10^{-2}$	-699	/	90
B22	-731	1,41	$1,55 \cdot 10^{-2}$	-725	/	111
C22	-736	0,81	$8,88 \cdot 10^{-3}$	-688	/	116
A30	-723	1,42	$1,56 \cdot 10^{-2}$	-690	/	101
B30	-731	0,50	$5,48 \cdot 10^{-3}$	-706	/	115
C30	-731	0,71	$7,78 \cdot 10^{-3}$	-726	/	121
D	-	-	-	-	-	123

## 7. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu rada opisana je toplinska obrada precipitacijski očvršćivih kovanih aluminijskih legura te je objašnjeno na koji način odabir parametara kod toplinske obrade utječe na konačna eksploatacijska svojstva i mikrostrukturu aluminijskih legura. Prikladnim odabirom parametara toplinske obrade mogu se postići znatno bolja svojstva u odnosu na početno stanje legure. Cilj rada bio je pronaći najbolju kombinaciju tvrdoće i otpornosti na koroziju aluminijske legure AlSi1MgMn variranjem parametara toplinske obrade. Na toplinski obrađenim uzorcima provedena su ispitivanja tvrdoće te elektrokemijska ispitivanja, Tafelova ekstrapolacija i ciklička polarizacija u vodenoj otopini 3,5 % NaCl.

Nakon provedenog ispitivanja tvrdoće pokazalo se da se postignute tvrdoće uzoraka nakon provedenog homogenizacijskog žarenja i hlađenja u različitim odabranim sredstvima za gašenje značajno ne razlikuju. Poslije umjetnog starenja dobiven je široki raspon vrijednosti rezultata tvrdoće ispitnih uzoraka. Najviša tvrdoća postignuta je kod uzorka koji je bio rastvorno žaren i ohlađen u vodi temperature 85 °C te naknadnim umjetnim starenjem s parametrima 150 °C/10 h/zrak.

Tafelovom ekstrapolacijom dobivene su vrijednosti korozijskog potencijala, gustoće korozijske struje te brzina korozije. Kod svih uzoraka dobivene su negativne vrijednosti korozijskog potencijala te je tako kod svih uzoraka došlo do vidljivih korozijskih oštećenja na ispitivanim površinama. Najveću otpornost na koroziju, tj. najmanju brzinu korozije pokazao je uzorak koji je bio rastvorno žaren i ohlađen u vodi temperature 50 °C te umjetno staren s parametrima 150 °C/10 h/zrak.

Ciklička polarizacija pokazala je vrlo veliku sklonost lokalnoj rupičastoj koroziji svih uzoraka u ispitnom korozivnom mediju te su vidljiva značajna rupičasta oštećenja, u znatno većoj koncentraciji nego nakon ispitivanja Tafelovom metodom. Vrijednosti potencijala pitinga neznatno su više od korozijskih potencijala uzoraka, tako da se može zaključiti da dolazi do pucanja pasivnog filma vrlo brzo nakon što materijal stupi u kontakt s 3,5 %-tnom otopinom NaCl te započinje inicijacija rupičaste korozije. Najbolju otpornost prema rupičastoj koroziji pokazao je uzorak rastvorno žaren i ohlađen u vodi temperature 50 °C te umjetno staren s parametrima 150 °C/5 h/zrak.

Analizom mikrostrukture utvrđeno je da je s odabranim parametrima toplinske obrade postignuta poželjna sitnozrnata mikrostruktura. Vidljive su sitne precipitacijske čestice koje su vrlo gusto i ravnomjerno raspoređene u matrici osnovnog materijala. Također, vidljive su i sitne pore i mikropukotine što je vjerojatno posljedica proizvodnje polaznog materijala.

U budućim istraživanjima se preporuča provođenje ispitivanja koja će obuhvatiti i ispitivanja žilavosti, vlačne čvrstoće, granice razvlačenja te istežljivosti kako bi se dobila potpuniji uvid u svojstva legure za identične parametre toplinske obrade. Također, preporuča se provođenje dodatnih ispitivanja tvrdoće i korozijske otpornosti variranjem parametara rastvornog žarenja i starenja unutar već ispitanih raspona temperatura i vremena s ciljem optimizacije mehaničkih svojstava i otpornosti na koroziju na dijelovima za industrijsku proizvodnju.

## LITERATURA

- [1] Liscic, B., Tensi H. M., Canale, L. C.F., Totten, G. E.: Quenching Theory and Technology, 2nd Edition, CRC Press, 2010.
- [2] Genculu, S.: Aluminum Alloys and Heat Treatment, 2000.,  
<https://docplayer.net/63470186-Aluminum-alloys-and-heat-treatment.html> (5.1.2022.)
- [3] Zhang J, Song B, Wei Q, Bourell D, Shi Y. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. J Mater Sci Technol. 2019;35(2):270–84. doi: 10.1016/j.jmst.2018.09.004
- [4] Cast vs. Wrought Aluminium: Standards, Properties and Applications,  
<https://matmatch.com/learn/material/cast-wrought-aluminium> (15.2.2022.)
- [5] Torres R, Esparza J, Velasco E, García-Luna S, Colás R. Characterisation of an aluminium engine block. Int J Microstruct Mater Prop. 2006;1(2):129–38. doi: 10.1504/IJMMP.2006.010621
- [6] Navstar Steel Corporation, Aluminium 6061 T6 Round Bar,  
<https://www.navstarsteel.com/aluminium-6061-t6-round-bar.html> (15.2.2022.)
- [7] ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating ASM Handbook Committee, p 841–79.
- [8] Vončina M, Kresnik K, Volšak D, Medved J. Effects of homogenization conditions on the microstructure evolution of aluminium alloy EN AW 8006. Metals (Basel). 2020;10(3). doi: 10.3390/met10030419
- [9] Davis, J.R., Alloying: Understanding the Basics, p 351-416, ASM International, 2001.,  
<https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/173/Aluminum%20and%20Aluminum%20Alloys%20Davis.pdf>
- [10] Mackenzie DS, Ph D. Heat treatment of aluminum – Part I : Quenching basics. 2020;(September):18–9., <https://thermalprocessing.com/wp-content/uploads/2020/09/0920-HS.pdf>
- [11] MacKenzie DS. Heat treating aluminum for aerospace applications. Heat Treat Prog. 2005;5(4):36–43.
- [12] Landek, D.: Podloge za predavanja i vježbe iz kolegija: „Proizvodni postupci - toplinska obrada“, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.

- [13] Milkereit B, Kessler O, Schick C. Determination of Critical Cooling Rate for Hardening Aluminum Alloys using HyperDSC. Perkin Elmer. 2010;375:1–6.
- [14] Li N, Zheng J, Zhang C, Zheng K, Lin J, Dean TA. Investigation on fast and energy-efficient heat treatments of AA6082 in HFQ processes for automotive applications. MATEC Web Conf. 2015;21:0–6. doi: 10.1051/mateconf/20152105015
- [15] Staley JT, Tiryakioglu M. The use of TTP curves and quench factor analysis for property prediction in aluminum alloys. Adv Metall Alum Alloy. 2001;(December):6–15.
- [16] Milkereit B, Wanderka N, Schick C, Kessler O. Continuous cooling precipitation diagrams of Al-Mg-Si alloys. Mater Sci Eng A. 2012;550:87–96. doi: 10.1016/j.msea.2012.04.033
- [17] Milkereit B, Starink MJ, Rometsch PA, Schick C, Kessler O. Review of the quench sensitivity of aluminium alloys: Analysis of the kinetics and nature of quench-induced precipitation. Materials (Basel). 2019;12(24). doi: 10.3390/MA12244083
- [18] 2024 Aluminum: Get to Know its Properties and Uses, <https://www.gabrian.com/2024-aluminum-properties/> (8.1.2022.)
- [19] Krishna Pal Singh Chauhan. Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of Aluminium Alloys (6xxx Series): A Literature Review. Int J Eng Res. 2017;V6(03):386–9. doi: 10.17577/ijertv6is030301
- [20] Tan CF, Said MR. Effect of hardness test on precipitation hardening aluminium alloy 6061-t6. Chiang Mai J Sci. 2009;36(3):276–86.
- [21] 1stChoice Metals, Aluminium 7000 Series, <https://www.1stchoicemetals.co.uk/aluminium/grades-guide/7000-series/> (8.1.2022.)
- [22] Dai Y, Yan L, Hao J. Review On Progress of 7xxx Series Aluminum Alloy Materials. 2021;(November).
- [23] Riggio M, Piazza M. Hardness Test. 2010;87–97. doi: 10.1007/978-94-007-0560-9\_10
- [24] Ema Stupnišek- Lisac, Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2007.
- [25] Juraga I, Alar V., Stojanović I.: Korozija i zaštita premazima, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [26] Neeraj K, Tafel extrapolation method, Article, [https://in.linkedin.com/in/neeraj-k-namboodiri-832a7114b?trk=pulse-article\\_main-author-card](https://in.linkedin.com/in/neeraj-k-namboodiri-832a7114b?trk=pulse-article_main-author-card) (28.2.2022.)

- 
- [27] Popov, B. N.: Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems, *Basics of Corrosion Measurements*, p 181–237. Elsevier, 2015.
- [28] Tait WS. Electrochemical corrosion basics. *Handb Environ Degrad Mater* Third Ed. 2018;97–115. doi: 10.1016/B978-0-323-52472-8.00005-8
- [29] Popov, B. N.: Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems, *Pitting and Crevice Corrosion*, p 289–325, Elsevier, 2015.
- [30] Župan, J., Landek, D. & Filetin, T.: Cooling characteristics of water based nanofluids with agitation. *Materials Performance and Characterization*, 2014;3 (4), p 326-336. doi:10.1520/MPC20140019

## PRILOZI

Prilog 1. Površinske tvrdoće HV1 uzoraka gašenih u vodi od 20 °C nakon rastvornog žarenja i umjetnog starenja

Oznaka uzorka	HV1			
	Nakon rastvornog žarenja	HV <sub>sr</sub>	Nakon umjetnog starenja	HV <sub>sr</sub>
A11	65	65	109	109
	64		110	
	68		115	
	68		108	
	61		105	
A12	65	65	132	126
	64		120	
	68		120	
	68		127	
	61		129	
A21	65	65	114	114
	64		113	
	68		116	
	68		113	
	61		112	
A22	65	65	90	90
	64		86	
	68		95	
	68		88	
	61		89	
A30	65	65	99	101
	64		99	
	68		102	
	68		102	
	61		105	



**Prilog 2. Površinske tvrdoće HV1 uzoraka gašenih u vodi od 50 °C nakon rastvornog žarenja i umjetnog starenja**

Oznaka uzorka	HV1			
	Nakon rastvornog žarenja	HV <sub>sr</sub>	Nakon umjetnog starenja	HV <sub>sr</sub>
<b>B11</b>	71	71	115	123
	73		126	
	65		122	
	73		125	
	73		125	
<b>B12</b>	71	71	137	138
	73		140	
	65		139	
	73		142	
	73		132	
<b>B21</b>	71	71	124	123
	73		123	
	65		125	
	73		118	
	73		125	
<b>B22</b>	71	71	114	111
	73		115	
	65		113	
	73		108	
	73		105	
<b>B30</b>	71	71	115	115
	73		119	
	65		115	
	73		115	
	73		112	
<b>D</b>	71	71	116	123
	73		123	
	65		125	
	73		125	
	73		126	

**Prilog 3. Površinske tvrdoće HV1 uzoraka gašenih u vodi od 85 °C nakon rastvornog žarenja i umjetnog starenja**

Oznaka uzorka	HV1			
	Rastvorno žareno stanje	HV <sub>sr</sub>	Umjetno stareno stanje	HV <sub>sr</sub>
C11	68	67	128	130
	62		127	
	66		128	
	66		133	
	73		136	
C12	68	67	137	146
	62		134	
	66		152	
	66		153	
	73		153	
C21	68	67	131	130
	62		126	
	66		131	
	66		127	
	73		134	
C22	68	67	105	116
	62		125	
	66		115	
	66		114	
	73		123	
C30	68	67	123	121
	62		120	
	66		120	
	66		125	
	73		118	