

TVRDO ELOKSIRANJE ALUMINIJSKIH LEGURA

Bešlić, Ivan

Master's thesis / Specijalistički diplomska stručni

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/um:nbn:hr:128:109235>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-18**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA
PROIZVODNO STROJARSTVO

IVAN BEŠLIĆ

**TVRDO ELOKSIRANJE ALUMINIJEVIH
LEGURA**

DIPLOMSKI RAD

KARLOVAC, 2021.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA
PROIZVODNO STROJARSTVO

IVAN BEŠLIĆ

**TVRDO ELOKSIRANJE ALUMINIJEVIH
LEGURA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: dr.sc. Jasna Halambek, v.pred.

KARLOVAC, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad pod naslovom ***Tvrdo eloksiranje aluminijevih legura*** izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici dr.sc. Jasni Halambek , na pomoći i stručnim savjetima, te podršci pri pisanju ovog rada.

Zahvaljujem se tvrtki TIZ d.o.o. na mogućnosti obavljanja eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i djevojci Heleni na motivaciji i strpljenju kojima su me pratili kroz cijelo školovanje, kao i na bezrezervnoj podršci tijekom studija.

Ivan Bešlić

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ALUMINIJ	2
2.1. <i>Povijest upotrebe aluminija</i>	2
2.2. <i>Primjena aluminija i njegovih legura</i>	5
3. PODJELA I OZNAČAVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA	10
3.1. <i>Podjela aluminijevih legura</i>	10
3.2. <i>Označavanje aluminijevih legura</i>	13
3.3. <i>Toplinski obradive legure</i>	16
3.4. <i>Toplinski neobradive legure</i>	18
4. KOROZIJA	19
4.1. <i>Vrste korozija</i>	21
4.2. <i>Procesi elektrokemijske korozije</i>	23
4.3. <i>Otpornost aluminijevih legura na koroziju</i>	25
5. ELOKSIRANJE ALUMINIJA	27
5.1. <i>Svojstva eloksiranog oksidnog sloja</i>	29
5.2. <i>Postupci eloksiranja</i>	30

<i>5.2.1. Eloksiranje sumpornom kiselinom</i>	31
<i>5.2.2. Eloksiranje kromnom kiselinom.....</i>	31
<i>5.2.3. Eloksiranje oksalnom kiselinom.....</i>	32
6. EKSPERIMENTLANI DIO	34
7. Zaključak	47
Popis literature.....	48
Popis literature - slike.....	52

POPIS SLIKA

<i>Slika 1.</i> Usporedba sirovine kod proizvodnje aluminija [36].....	3
<i>Slika 2.</i> Primjena aluminija i njegovih legura u industriji u 2011. godini [37].....	6
<i>Slika 3.</i> Aluminijска fasada [38].....	7
<i>Slika 4.</i> Promjena debljine aluminijске folije za prehrambenu industriju [1]	9
<i>Slika 5.</i> Posljedice djelovanja korozije [23].....	19
<i>Slika 6.</i> Klasifikacija korozijskih proces [14].....	20
<i>Slika 7.</i> Podjela korozije prema mehanizmu djelovanja [23].....	21
<i>Slika 8.</i> Kemijska korozija na Aluminiju, nehrđajućim čelicima i titanu [39]	22
<i>Slika 9.</i> Korozija metala [40]	23
<i>Slika 10.</i> Elektrokemijska korozija metala [39].....	25
<i>Slika 11.</i> Anodizacija [31]	27
<i>Slika 12.</i> Anodizacija aluminijске površine – galvanizirani metal, metal bez prevlake, anodizirani aluminij [32]	28
<i>Slika 13.</i> Pozicija od legure EN AW 5083	35
<i>Slika 14.</i> Pozicija od legure EN AW 7075	36
<i>Slika 15.</i> Kada za odmaščivanje obradaka u alkalnom deterdžentu	37
<i>Slika 16.</i> Kad za dekapiranje u otopini NaOH	38
<i>Slika 17.</i> Kada za dekapiranje u 30% otopini HNO ₃	39
<i>Slika 18.</i> Kada za eloksiranje i postupak.....	40
<i>Slika 19.</i> Provjera postupka tvrdog eloksiranja	41
<i>Slika 20.</i> Pozicija EN AW 7072 poslije tvrdog eloksiranja	42
<i>Slika 21.</i> Pozicija EN AW 5083 poslije tvrdog eloksiranja	42

<i>Slika 22. Mjerač debljine nanosa DFT Combo</i>	43
<i>Slika 23. Provjera debljina nanosa – 1.....</i>	44
<i>Slika 24. Provjera debljina nanosa – 2.....</i>	45
<i>Slika 25. Provjera debljina nanosa – 3.....</i>	45
<i>Slika 26. Provjera debljina nanosa – 4.....</i>	46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba osnovnih fizikalnih svojstava čistog aluminija i aluminijskih legura u odnosu na čelik [12].....	5
Tablica 2. Mehanička svojstva toplinski obradivih i neobradivih legura [5]	11
Tablica 3. Parametri postupka eloksiranja sumpornom kiselinom [19]	31
Tablica 4. Parametri postupka eloksiranja kromnom kiselinom [19].....	32
Tablica 5. Parametri postupka eloksiranja oksalnom kiselinom [19].....	33
Tablica 6. Kemijski sastav aluminijeve legure EN AW 5083.....	34
Tablica 7. Kemijski sastav aluminijeve legure EN AW 7075.....	35
Tablica 8. Tehničke karakteristike uređaja DFT Combo.	43

SAŽETAK

U teorijskom dijelu radu su prikazana osnovna svojstva aluminija te podjela i označavanje aluminijevih legura. Nadalje je prikazana klasifikacija korozije te otpornost aluminijevih legura. U zadnjem poglavlju teorijskog dijela je obrađen postupak površinske zaštite eloksiranjem i vrste postupaka.

Eksperimentalnim dijelom je napravljena površinska zaštita tvrdog eloksiranja pozicija od aluminijevih legura EN AW 5083 i EN AW 7075 i prikazani koraci postupaka uz odgovarajuće parametre svake faze. Cilj eksperimentalnog dijela je bio dati uvid u korake tvrdog eloksiranja te kontroli nastale debljine nanosa i samog izgleda elokisrane pozicije. Prilikom tvrdog eloksiranja legure EN AW 7072 dobiven je nanos od 23 mikrona dok kod eloksiranje legure EN AW 5083 sloj 32 mikrona. Dobiveni slojevi su i dalje relativno malih veličina pa ne predstavljaju problem osim ako je riječ o toleriranim mjerama kod kojih je onda potrebno obratiti pozornost adekvatnom predobradom ili odgovarajućim parametrima tvrdog eloksiranja.

Ključne riječi: aluminij, debljina sloja, legure, korozija, tvrdo eloksiranje.

SUMMARY

The theoretical part of the thesis presents basic aliuminuim properties, as well as division, resistance and classification of aluminum alloys and corrosion classification. The last chapter of theoretical part brings an overview of anodising surface protection procedure. The surface protection, hard anodizing of objects made of aluminum alloys, EN AW 5083 and EN AW 7075, was made in the experimental part of the thesis. The aim of the experimental part was to give an insight into the steps of hard anodizing and to control the resulting coating thickness and the appearance of the anodized position. During the hard anodizing of the alloy EN AW 7072, a coating of 23 microns was obtained, while the anodizing of the alloy EN AW 5083 resulted in the layer of 32 microns. The resulting layers are still relatively small in size, so they do not pose a problem in production, unless there are tolerated measures, in which is then necessary to pay attention to adequate pre-treatment or appropriate hard anodizing parameters.

Keywords: aluminium, aloys, corrosion, hard anodising, layer thickness.

1. UVOD

Aluminij je treći najrasprostranjeniji metal u zemljinoj kori s 8 % udjela, skoro dva puta više nego željezo te treći kemijski element po udjelu poslije kisika i silicija. Aluminij se lako veže s drugim elementima, a čisti aluminij se ne pojavljuje u prirodi. U zemljinoj kori je većinom u obliku rude boksita koji se prerađuje u glinicu Al_2O_3 iz koje se elektrolizom dobiva aluminij. Proces dobivanja aluminija je relativno skup zbog velikog utroška električne energije (približno 16 Kwh/kg) pa se to odražava i na cijenu aluminija u konačnici. Bakar, olovo i kositar su u upotrebi već tisućama godina dok je komercijalna proizvodnja aluminija, a time i njegova upotreba prisutna tek nešto više od sto godina. Usprkos tome, danas je godišnja proizvodnja aluminija oko 45 milijuna tona što je više nego svi obojani metali zajedno i s tim iznosom je po upotrebi odmah poslije legura s bazom čelika. Razlog takve velike upotrebe aluminija leži u njegovim vrlo dobrim mehaničkim svojstvima, maloj gustoći, dobroj koroziju postojanosti, električnoj i toplinskoj vodljivosti, relativno dobroj čvrstoći te njegovoj lakoj mogućnosti oblikovanja i reciklaže [1, 2].

Aluminij je otporan prema atmosferskoj koroziji i posjeduje na površini prirodni zaštitni film oksida koji je uzrokovan visokim afinitetom aluminija prema kisiku. Nastali oksidni film daje otpornost aluminiju koroziji u otopinama sa pH vrijednosti između 4,0 i 8,5. Jako bitna karakteristika prirodnog oksidnog filma je takozvana repasivacija površine na mjestima abrazije ili neko drugo mehaničko oštećenje. Sama debljina prirodnog oksidnog filma iznosi 0,0025 do 0,01 μm što nekad nije dovoljna zaštita za koroziju pa su stoga razvijeni postupci kojima je moguće nanijeti deblji sloj zaštitnog sloja te njime poboljšati svojstva. Postupci koji se najviše koriste su kemijska i elektrokemijska oksidacija aluminija [3].

2. ALUMINIJ

Aluminiji je kemijski element atomskog broja 13, a simbola Al. Relativna mu je atomska masa 26,9815386. Sjajne je srebrnobijele boje, spada u skupnu lakih metala te je dobar vodič topline i električne energije. Po rasprostranjenosti je treći element iza kisika i silicija te najrašireniji metal na Zemlji, a u prirodi ne postoji u elementarnom obliku [4]. Riječ je o metalu koji je zbog svojih osobina vrlo rasprostranjen među tehničkim materijalima. Osobine koje su zaslužne za to su: mala specifična težina, dobra provodljivost električne energije i topline, visoka reflektivnost za svjetlost i zračenje, visoka čvrstoća njegovih legura i dobra otpornost prema atmosferi [5].

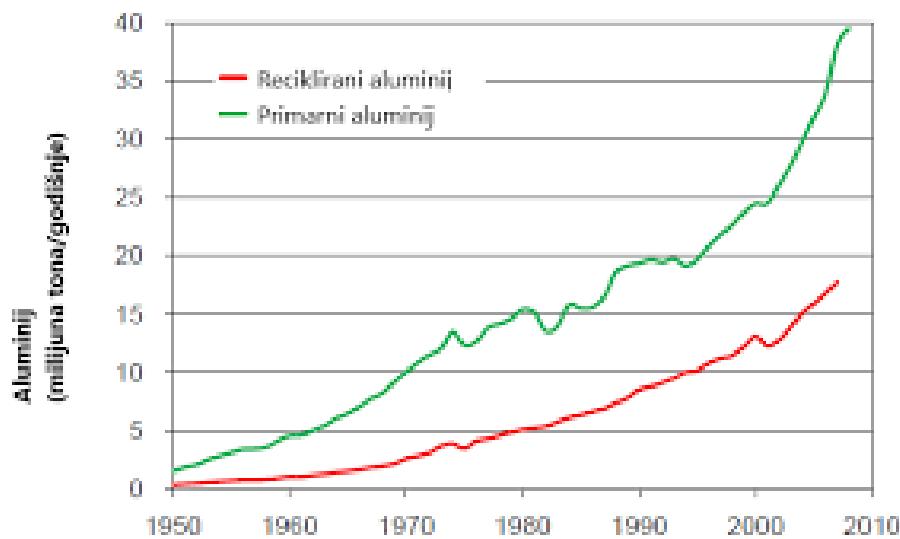
2.1. Povijest upotrebe aluminija

Postojanje aluminija prvi je utvrdio Sir Humphrey Davy početkom 19. stoljeća, no sam ga nije uspio izolirati. Prvi put je izoliran 1825., kada je Hans Christian Øersted uspješno izdvojio malo tog metala iz aluminijevog klorida. Øerstedove eksperimente nastavlja Friedrich Wöhler i 1845. izdvaja male kuglice aluminija. Veće uspjehe su zasebno postigli Henri Sint-Claire Deville i Robert Bunsen, proizvevši veće količine novootkrivenog materijala sinteriranim postupkom dobivanja aluminijevog oksida iz rude boksita. Deville čak uspijeva zainteresirati Napoleona III., koji finansijski podupire njegov rad. Na Svjetskoj izložbi 1855. aluminij, ili kako su ga tada zvali „srebro iz gline“ je predstavljeno širokoj publici. 1886. izolacija aluminija iz rude boksita postaje održivi industrijski proces. Temeljni proces ekstrakcije aluminija još je danas u primjeni, a istodobno su ga izumila dva neovisna znanstvenika, Paul Heroult u Francuskoj i Charles M. Hall u Sjedinjenim Američkim Državama. Riječ je o postupku koji se sastoji od dvije odvojene faze. U prvoj se fazi odvaja aluminijev oksid (AL_2O_3) od same rude, a u drugoj se koristi elektolitička redukcija između $950^{\circ}C$ i $1000^{\circ}C$ u kriolitu (Na_3AlF_6).

Navedenim postupkom se dobiva aluminij sa 5-10 % nečistoća (od kojih su najčešće silicij i željezo), koji se dalje čisti postupkom elektrolize ili pomoću zone-melting tehnike, kojima se dobiva metal čistoće i do 99,9%.

U dalnjim desetljećima su postupci dobivanja i prerađivanja aluminija dopunjavani, tako da svjetska proizvodnja raste od 7,3 kilotona u 1900. godini, na 4,5 megatona u 1960. godine [4].

Danas se velik dio aluminija dobiva iz recikliranog otpada. Prema mrežnim stranicama Međunarodnog instituta za aluminij u 2019. godini na svijetu proizvedeno 63 657 tona aluminija [5].



Slika 1. Usporedba sirovine kod proizvodnje aluminija [1].

Glavna ruda aluminija je boksit i se čini ga mješavina aluminijevega oksida AlO(OH) ili Al(OH)_3 , titanijevog oksida, silikata i željeznog oksida koji daje crvnekastu boju. Godine 1808. Humphry Davy je dekretirao postojanje metala u boksu te ga na početku nazvao alumium a kasnije aluminij, iako je znao da postoji aluminij nije ga uspio izolirati. Prvi koji je uspio izolirati aluminij 1825. godine je bio danski fizičar Hans Oersted koji je u svom labaratoriju zagrijao bezvodni aluminij-klorid redukcijom s kalijevim amalgamom, te dobio aluminij uklonivši živu i time potvrdio Davyevu pretpostavku. No prve konkretne rezultate je dao njemački kemičar Friedrich Wöhler nakon gotovo 20 godina istraživanja (1827. godine) koristeći kao reduksijsko sredstvo metalni kalij. Wöhler je uspio dobiti aluminij u obliku praha, puno čišćeg nego li je to

predhodno uspio napraviti Oersted. Do 1845. godine znanstvenici u tom dobu su već dovoljno aluminija proizveli da bi uočili detaljno njegova svojstva, sam Wöhler je primjetio neobičnu lakoću aluminija u usporedbi s ostalim metalima. Devet godina kasnije 1854. godine francuski kemičar i fizičar Henri Saint-Clair Deville je razvio mnogo praktičniju metodu proizvodnje aluminija kojom je omogućeno dobivanje i nekoliko kilograma čistog aluminija uz redukciju s natrijem. Ta metoda je kopirana duž cijele Europe i predstavlja ključan korak prema industrijskoj uporabi aluminija. Devillev-ov proces je 1885. godine u SAD-u unaprijedio Hamilton Y. Cassner uz godišnju proizvodnju od 15 tona.

Aluminij je metal srebrno bijele boje, sjajan, mekan i relativno krt. Fizički, kemijiski i mehanički je sličan čeliku, mesingu, bakru, cinku, olovu ili titanu. Može se topiti, lijevati, oblikovati i obrađivati na sličan način kao ovi metali, čak se i koristi ista oprema kao i za čelike. U nastavku su navedena neke od karakteristika aluminija:

- Lagan materijal - njegova gustoća od 2.7 g/cm^3 ga čini lakšim za trećinu od čelika te samim time mekšim te lakše obradljivim na strojnoj obradi i dobrim materijalom za konstrukcije [4].
- Modul elastičnosti 3 puta je niži nego kod željeza
- Otpornost na koroziju – aluminij pri izlaganju zraku i vlažnim uvjetima generira prirodni oksidni film na površini i time stvara zaštitu protiv atmosferske korozije.
- Jako dobar omjer čvrstoće i gustoće - posebno kod legura, moguće povećati čvrstoću toplinskom obradom, deformiranjem i percipitacijskim očvršćivanjem.
- Odlična mehanička svojstva pri niskim temperaturama .
- Dobra toplinska i električna vodljivost.
- Pogodan za površinska prevlačenja – metalne i nemetalne prevlake.
- Ne može se magnetizirati ili izgorjeti – prilično bitno za primjene u elektronici i brodskim konstrukcijama.
- Netoksičan je u dodiru s hranom – koristi se zbog toga za pakiranje hrane.

- Dobra mogućnost oblikovanja deformacijom – plošno centirana kristalna rešetka omogućuje odličnu toplu i hladnu deformaciju, pogodan za prešanje i duboko vučenje [27].

Fizička svojstva / Metal	Aluminij / Al legure	Čelik
Talište	660 °C	1425 – 1540 °C
Gustoća pri 20 °C	2700 kg/m ³	7850 kg/m ³
Toplinsko izduljenje	23x10 ⁻⁶ °C ⁻¹	12x10-6 °C-1
Specifična toplina	-920 J/kg°C	-440 J/kg°C
Toplinska provodljivost	-240 W/m°C	-54 W/m°C
Modul elastičnosti	70 000 N/mm ²	210 000 N/mm ²
Modul posmika	27 000 N/mm ²	81 000 N/mm ²
Poissonov koeficijent	0,3	0,3

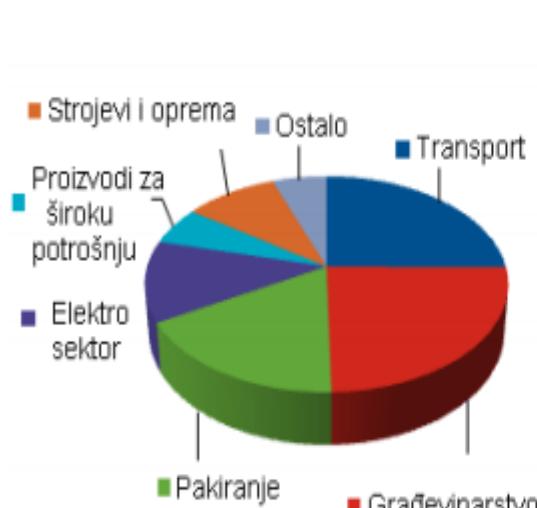
Tablica 1. Usporedba osnovnih fizikalnih svojstava čistog aluminija i aluminijskih legura u odnosu na čelik [12]

2.2. Primjena aluminija i njegovih legura

S vremenom su aluminij i njegove legure našli veću primjenu od tradicionalnih materijala usprkos velikim troškovima i cijeni. Razvoj novih tehnologija iz drugih grana industrija, uz modifikacije i prilagodbe, omogućuje raznovrsniju proizvodnju predmeta od aluminija i aluminijskih legura. Proizvodi od aluminija i aluminijskih legura su se na taj način još više probili na tržište i približili čovjekovom svakodnevnom životu [10].

Iz Slike 2. je vidljiva primjena aluminija i njegovih legura u 2011. godini slijedećim redoslijedom:

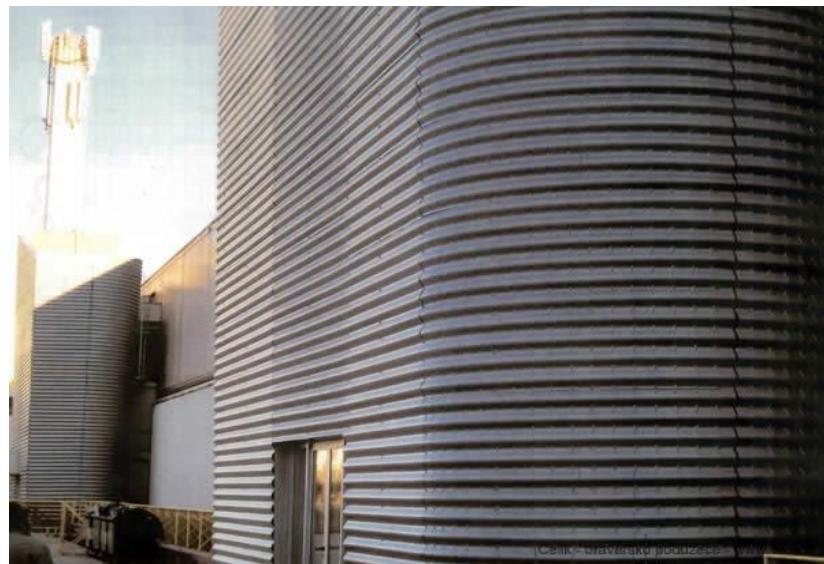
1. građevinarstvo
2. transport
3. pakiranje (ambalaža)
4. elektro sektor
5. ostale namjene



Slika 2. Primjena aluminija i njegovih legura u industriji u 2011. godini [2]

Zbog svoje gustoće i antikorozivnosti aluminij je idealan materijal za sve klimatske promjene pa mu je i najveće tržište u građevinarstvu [12]. Pri izradi u današnjim novogradnjama se aluminij korisiti u nizu elemenata kao što su aluminijska vrata, fasade (slika 3.), ograde, prozori, vrata jer ne iziskuju velika održavanja, a imaju veliki vijek trajanja. Upotreboom

eloksiiranja i anodiziranja vanjske površine omogućen je cijeli niz boja koje je moguće postići te time imitirati plemenite metale, porculan i sl. Prednost upotrebe aluminijevih legura je vidljiva u uvjetima priobalnog područja, gdje je morska sol vrlo štetna za ostale metale [10, 25, 26].



Slika 3. Aluminijska fasada [3]

Drugo najveće tržište aluminija je transport gdje je cijenjen zbog svoje male gustoće, dobrih mehaničkih svojstava, dobre obradljivosti, velikog izbora profila i nezapaljivosti.

Suvremena komercijalna zrakoplovna industrija vjerojatno ne bi uspjela bez aluminija. U zrakoplovnoj industriji se aluminij nalazi u motorima zrakoplova, okvirima, interijeru, opremi za slijetanje i to ga u tom kontekstu čini najčešće korištenim materijalom za konstrukcije zrakoplova. Aluminijske legure uspijevaju zadovoljiti izrazito visoke zahtjeve mehaničkih svojstava potrebne u izradi civilnih zrakoplova. Po nekim procjenama udio aluminija kreće se do čak 80% mase konstrukcije zrakoplova.

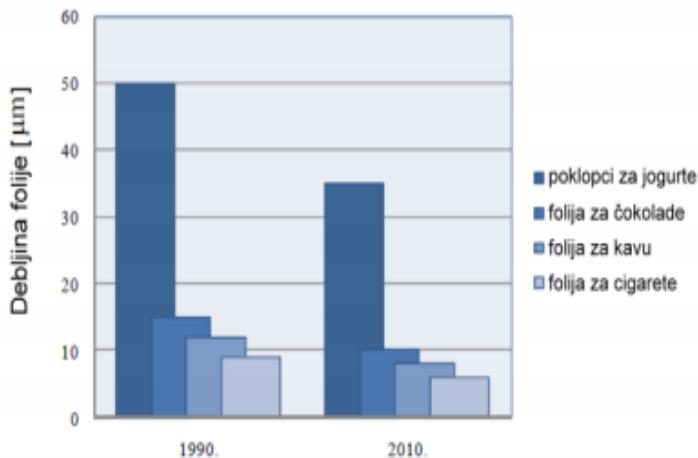
Upotreba aluminija u automobilskoj industriji je posljednjih destakak godina doživjela pravu revoluciju. Njegova upotreba se proširila na mnoge automobilske djelove kao što su aluminijske karoserije, blokovi motora, cilindri, kućišta mjenjača i drugi djelovi koji su svojom

primjenom smanjili masu automobila te istovremeno poboljšali performanse. Aluminij smanjuje buku i vibracije te apsorbira kinetičku energiju te na taj način prilikom sudara struktura automobila poprima najveći dio energije. Kod putničkih automobila zamjenom čelične karoserije aluminijskom je moguće smanjiti masu za oko 45% [10].

Aluminij se zbog svoje otpornosti na koroziju ugrađuje u trup brodova, spremnike plina na brodovima koji prenose tekući prirodni plin i palubna spremišta za brodska plovila. Moderni trajekti imaju i do 400 tona aluminija u svojoj konstrukciji.

Aluminij se u ambalažnoj industriji u obliku folije koristi prilikom pakiranja pića, hrane, lijekova, te se koristi i kao zaštita prilikom transporta i skladištenja. Aluminij omogućuje brzo hlađenje, malu gustoću, lako otvaranje i vrlo dobre reciklirajuće značajke legura aluminija. Prednosti aluminijске folije su izrazito dobra mehanička svojstva i korozionska inertnost u prehrabrenoj industriji u obliku materijala fleksibilnih pakiranja koji se sastoji od kombinacije papira, aluminija i plastičnih slojeva povezanih adhezivima.

S vremenom su se brojna istraživanja počela baviti smanjenjem debljine aluminijске folije optimiziranjem dizajna i same izvedbe ambalaže s ciljem zadržavanja istih svojstava propusnosti i krutosti folije kao zaštitne barijere. Rezultat toga je prema Europskom udruženju za aluminijsku foliju smanjenje debljine materijala za izradu aluminijске ambalaže za oko 30%. U nastavku na slici 4. dan je prikaz promjene debljine aluminijске folije tijekom 20 godina [10].



Slika 4. Promjena debljine aluminijске folije za prehrambenu industriju [4]

Aluminij se koristi u elektroindustriji za proizvodnju kabela i žica. Električna vodljivost aluminija je 65% vodljivosti bakra, ali aluminijска žica s jednakom vodljivosti je lakša od bakra. Aluminij zauzima više prostora od bakra pri istoj vodljivosti pa se ne koristi prilikom namotaja električnih strojeva ali se zato primjenjuje gdje je potrebna kritična težina vodiča (npr. instalacije u zrakoplovima). U izradi zračnih vodova aluminij zauzima prvo mjesto i za tu se svrhu koristi uže od tvrdo vučenih aluminijskih žica.

U elektrotehnici je najznačajnija legura aldrey ($AlMgSi$), osim aluminija sadrži magnezij 0,3 – 0,5% i silicij 0,4 – 0,7 %, koja se koristi za izradu električnih vodova. U odnosu na čisti aluminij ima povećanu vlačnu čvrstoću i istezljivost što je približava vrijednostima za tvrdo vučeni bakar. Osim aldrey-a se koristi i silumini, legura aluminija sa Si 9 – 13,5 % koje se koriste za izradu kaveza motora kod asinkornih motora te kućišta manjih izmjeničnih motora [10].

3. PODJELA I OZNAČAVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA

Legure se u praksi koriste više nego čisti metali. Glavni razlog je taj što su tehnički čisti metali skupi, niske čvrstoće, nepovoljnih kemijski i fizikalnih svojstava te se veoma teško dobivaju u pročišćenom stanju, većinom su premekani u odnosu na tražene konstrukcijske kriterije. Tehnički čistim metalima smatramo one koji imaju najviše 0,1% primjese. Kod većih količina primjesa, legirnih elemenata ili nečistoća riječ je o legurama. Legura nastaje pri miješanju metala s metalom ali i s drugim elementima. Sami cilj legiranja je poboljšanje mehaničkih svojstava, tvrdoće, vlačne čvrstoće, rastezljivosti, krutosti, rezljivosti a katkada žilavosti ili rastezljivosti. Svojstva mnogih legura je moguće poboljšati precipitacijskim očvrsnućem [10].

Najvažniji legirni elementi kod proizvodnje aluminijevih legura su: magnezij, silicij, mangan, cink i bakar. Kao dodaci ili nečistoće su mogući u manjoj količini željezo, krom i titan. Za posebne namjene se dodaju kobalt, nikal, litij, srebro, kadmij, vanadij, kositar, oovo i bizmunt. Moguć je i dodatak berilija, bora, natrija i stroncija, ali u vrlo malim količinama. Svi legirni elementi su potpuno topivi u rastaljenom aluminiju i njihova topljivost je ograničena u kristalima mješancima [10].

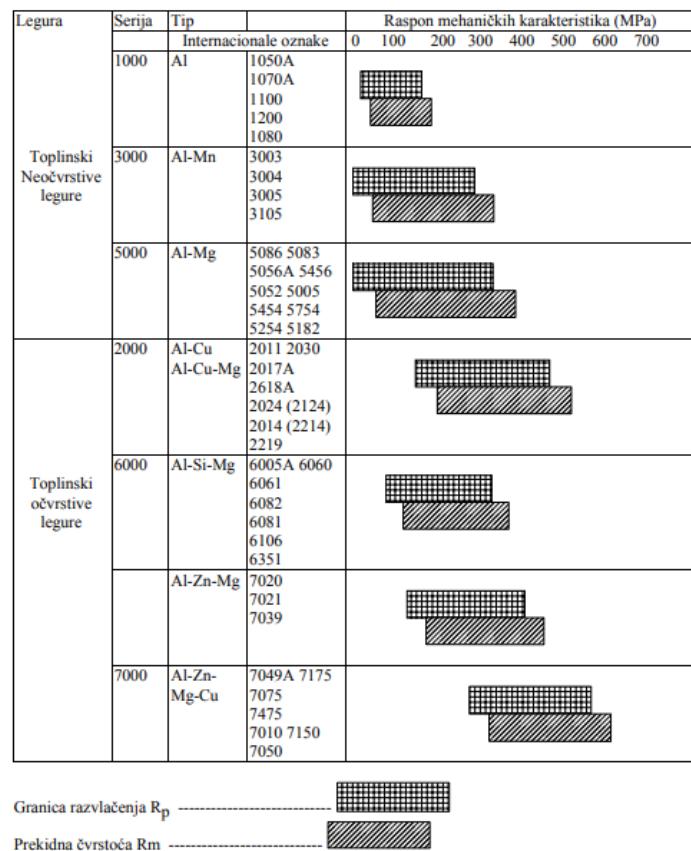
3.1. Podjela aluminijevih legura

Obično se aluminijeve legure klasificiraju s obzirom na:

- kemijski sastav
- toplinski tretman (tretirane i ne tretirane)
- postupak proizvodnje

Bakar (Cu), mangan (Mn), silicij (Si), magnezij (Mg) i cink (Zn) kao glavni legirni elementi dodani primarnom aluminiju čine osnovne skupine legura različitih kemijskih sastava.

Aluminijeve legure se s obzirom na toplinski tretman dijele na toplinski obradive i na toplinski neobradive. Pod pojmom toplinski obradive smatramo toplinsku obradu s kojom se povećavamo čvrstoću i tvrdoću legure. U Tablici 2. dan je prikaz mehaničkih svojstava toplinski obradivih i neobradivih legura aluminija.



Tablica 2. Mehanička svojstva toplinski obradivih i neobradivih legura [5]

Toplinski neočvrstive legure se za postizanje potrebnih mehaničkih svojstava legiraju manganom, magnezijom, silicijem ili željezom i plastičnom deformacijom.

Toplinski očvrstive legure daju idealan omjer gustoće i dobivene čvrstoće. Osnovni legirni elementi cink, silicij, magnezij, silicij, bakar koji rade inetermetalne spojeve s aluminijem

i međusobno. Proces se sastoji od žarenja na 450°C i 550°C i hlađenjem na sobnoj ili povišenoj temperaturi te dozrijevanjem pri kojem dolazi do sazrijevanja te očvrsnuća. Očvrsnuće precipitacijom je glavni postupak očvrščavanja predhodno gnječenih legura kojom se još povećava čvrstoća i tvrdoća jer se postižu veće vrijednosti nego pri samom hladnom oblikovanju [27].

Prema postupku proizvodnje razlikujemo:

- gnječene legure
- lijevane legure

Gnječene legure se dijele po načinu očvrsnuća i kemijskom sastavu. Načini očvrsnuća aluminijevih legura su precipitacijsko očvrsnuće i očvrsnuće hladnim oblikovanjem.

Kod legura koje se očvršćuju hladnim deformiranjem se zahtjeva velik čvrstoća i krutost u hladnom stanju te dobru korozisku postojanost. Osnovni legirni elementi su mangan i magnezij. Određenim stupnjem ugnječenja, pri hlandnom oblikovanjem, se postiže određeni stupanj potrebni mehaničkih svojstava.

Legure s povećanim udjmom magnezija imaju vrlo dobru postojanost u morskoj vodi pa se koriste u brodskoj industriji dok legure s povećanim udjelom mangana daju odličnu obradljivost pa se koristi u strojnoj obradi pri izradi automata. Nedostatak legura koje se deformiraju u hladnom stanju jest taj što su mehanička svojstva legure u konačnim dimenzijama i ne mogu se mijenjati osim naknadnim žarenjem. [27]

Kod lijevanih legura se gotov proizvod dobiva lijevanjem u pijesku, tlačno ili kokilu. Lijevane legure se mogu svrstati u tri osnovne skupine: Al-Si, Al-Mg, Al-Cu. Kombinacijom triju osnovnih skupina je moguće dobiti legure s poboljšanim osnovnim karakteristikama. [27]

Zahtjevi za ove legure su prije sveg dobra livljivost, dobra toplinska vodljivost, vrlo dobra mehanička svojstva pri povišenim temperaturama, mala masa, mala toplinska rastezljivost te otpornost na trošenje.

3.2. Označavanje aluminijevih legura

Postoje dvije metode sustava identificiranja aluminijevih legura prema europskom odboru za normiranje (CEN). Jedna se temelji na numeričkim oznakama koja je usvojena od strane ISO-a (EN 573) a druga na temelju kemijskog sastava. [33]

Prefiksi kod oznaka imaju slijedeće značanje:

- AW – gnječeni materijal
- AC – lijevani materijal
- AM – predlegure za lijevanje
- AB – ingoti

Kod gnječenih legura poslije prefiksa slijedi četveroznamenkasti broj koja opisuje leguru i prvi broj označava glavni legirni element:

- AW 1XXX – nelegirani čisti aluminij
- AW 2XXX – legura aluminij-bakar
- AW 3XXX – legura aluminij-mangan
- AW 4XXX – legura aluminij-silicij
- AW 5XXX – legura aluminij-magnezij

- AW 6XXX – legura aluminij-magnezij-silicij
- AW 7XXX – legura aluminij-magnezij-cink
- AW 8XXX – ostali elementi; npr. litij, željezo
- AW 9XXX – nije definirana grupa

Drugi broj označava modifikaciju osnovne legure a treća i četvrta znamenka identificira određenu leguru. Kod nelegiranog čistog aluminija zadnje dvije znamenke označavaju minimum udjela aluminija kao npr. AW-1090 - 99,90% aluminij. Postoje 36 zasebnih lijevačkih legura od kojih je 29 bazirano na legurama sa slijnjem. Lijevane legure su podijeljene na 11 grupa:

- AC 2 1 XXX – Al Cu.
- AC 4 1 XXX – Al SiMgTi.
- AC 4 2 XXX – Al Si7Mg.
- AC 4 3 XXX – Al Si10Mg.
- AC 4 4 XXX – Al Si.
- AC 4 5 XXX – Al Si5Cu.
- AC 4 6 XXX – Al Si9Cu.
- AC 4 7 XXX – Al Si(Cu).
- AC 4 8 XXX – Al SiCuNiMg.
- AC 5 1 XXX – Al Mg.
- AC 7 1 XXX – Al ZnMg

Kao i kod gnječenih legura treća i četvrta znamenka su proizvoljne i označavaju određenu leguru u skupini.

Mehanička svojstva pojedinih legura nisu definirana samo kemijskim sastavom nego i prema njihovom stanju kao što je npr. odžareno, percipitacijski očvršćeno, hladno deformirano. Kako bi se točno znalo o kakvom je stanju riječ prilikom označavanja koristi se pet slova i eventualno još broj ili dva koji pobliže označavaju stanje dobivene legure.

Osnovne oznake stanja su slijedeće:

- F – kao što je i proizvedeno, primjenjuje se na prozvodne postupke u kojima nije potrebna posebna kontrola toplinskog ili deformacijskog kaljenja
- O – žareno, primjenjuje se kod proizvoda kojima se zagriju kako bi se dobila najniža čvrstoća radi poboljšanja duktilnosti i dimenzijske stabilnosti
- H – hladno deformirano, odnosi se na proizvode ojačane hladnom deformacijom te može biti popraćeno dodatnom termičkom obradom što rezultira određenim smanjenjem čvrstoće, broj poslije slova označava pobliže osnovnu operaciju:
 - H1 – hladno deformirano
 - H2 – hladno deformirao i djelomično žareno
 - H3 – hladno deformirano i stabilizirano
 - H4 – deformirao i lakirano ili obojano
- W – homogenizacijsko žareno, vrlo nestabilno stanje i koristi se kod legura koje očvršćuju na sobnim temperaturama
- T – toplinski obrađeno, dobivanje proizvoda stabilnog stanja različitog od stanja F, O ili H. Slijedi broj koji označava toplinsku obradu:

- T1 – prirodno dozrijevano nakon postupka oblikovanja na povišenoj temperaturi
- T2 – hladno deformirano nakon postupka hladnog oblikovanja na povišenoj temperaturi, a zatim prirodno dozrijevanje
- T3 - homogenizirano, hladno deformirano i prirodno dozrijevano
- T4 – homogenizirano i prirodno dozrijevano
- T5 – hlađeno s povišene temperature oblikovanja i umjetno dozrijevanje
- T6 – homogenizirano i umjetno dozrijevano
- T7 – homogenizirano i stabilizirano
- T8 – homogenizirano, hladno deformirano i umjetno dozrijevano
- T9 – homogenizirano, umjetno dozrijevano i hladno deformirano
- T10 – hladno oblikovano nakon hlađenja s povišene temperature oblikovanja i zatim umjetno odležano

3.3. Toplinski obradive legure

Aluminij – bakar legure (2xxx)

Legure s dodatkom bakra (0,7 do 6,8%) visoke čvrstoće i odličnih mehaničkih svojstava pa stoga imaju svoju primjenu u zrakoplovnoj industriji. U seriji 2xxx bakar se koristi kao glavni legirni element i može se značajno ojačati toplinskom obradom. Legure iz ove serije posjeduju visoku čvrstoću i žilovost ali nemaju razinu otpornosti na koroziju kao ostale aluminijске legure pa su onda većinom ove legure obojane, obložene legurom visoke čvrstoće ili legurom serije

6xxx. Ova serija nalazi svoju primjenu u zrakoplovnoj industriji među kojima je najpoznatija EN AW 2024.

Aluminij – magnezij – silicij legure (6xxx)

Legurama se dodaje magnezij i silicij (oko 1%) te nastaje magnezij silicid koji ovom materijalu daje sposobnost da postane toplinski obrađena otopina s ciljem poboljšanje čvrstoće. To su legure umjerene čvrstoće, zavarljive te visoku otporne na koroziju. Legura 6061 je najčešće korištena u ovoj seriji i ima primjenu u automobilskoj industriji. Legura je pogodna za eloksiranje.

Aluminij – cink – magnezij legure (7xxx)

Legure s dodatkom cinka (0,8 do 12%) i dodatkom magnezija u manjoj količini se dobiva legura visoke čvrstoće. Moguće dodavanja kromca i bakra u malim količinama. Odlična korozijska otpornost i moguće eloksiranje. Te se legure često koriste u aplikacijama visokih performansi kao što su zrakoplovi i natjecateljska sportska oprema. Najčešće poznate legure su 7050 i 7075, koje se široko koriste u zrakoplovnoj industriji.

Ostale legure (8xxx)

Većinom su to legure s dodatkom litija (2-3%) a malim dodacima bakra i magnezija. Ovo je relativno nova grupa legura aluminija s kojom je moguće smanjenje težine za još dodatnih 15% te još većim modulom elastičnosti u usporedbi s ostalim toplinskim obradivim legurama. Glavni razlog boljih mehaničkih svojstava jest sam litij koji je vrlo lak metal jer ima najmanju gustoću među svim čvrstim elementima (534 kg/m^3). Dodavanjem litija se poboljšava između ostalog i otpornost na izvlačenje, tvrdoću pa svoju primjenu nalazi u avionskoj i svemirskoj tehnici.

3.4. Toplinski neobradive legure

Tehnički čisti aluminij (1xxx)

Glavne nečistoće u „čistom aluminiju“ su ostaci silicija i željeza preostali iz procesa topanja te su mogući u malim tragovima i bakar mangan i cink. Oznaka aluminija označava razinu čistoće kao naprimjer EN AW 1098 koji sadrži maksimalni sadržaj nečistoće u iznosu od 0,02%. Ova grupa aluminija ima izvrsnu otpornost na koroziju, obradivost, toplinsku i električnu vodljivost. Zbog navedenih svojstava svoju primjenu nalazi u izradi kemijskih spremnika i električnim vodovima. [29]

Aluminij – mangan legure (3xxx)

Legure s dodatkom mangana (0,05 do 1,8%) su umjerene čvrstoće sa dobrom otpornost na koroziju, vrlo dobra sposobnost oblikovanja i otpornost na koroziju. Ove legure su pogodne za rad na visokim temperaturama pa se primjenjuju u izmjenjivačima topline, u vozilima i elektranama. Legure EN AW 3004 i njezine modifikacije se koriste u tijelima aluminijskih limenki za piće. [28, 29]

Aluminij – silicij legure (4xxx)

Legure s dodatkom silicija (0,6 do 21,5%) kojim se postiže smanjenje temperature taljenja aluminija i poboljšava fluidnost bez pojave krhkosti pa se zbog toga koristi izradu žica za zavarivanje kod kojih je potrebno nisko talište – legura 4043. Dodavanjem bakra, nikla i magnezija leguri se poboljšava otpornost na toplinu i otpornost na habanje. [29, 30]

Aluminij – magnezij legure (5xxx)

Legure s dodatkom magnezija (0,2 do 6,2%) imaju najveću čvrstoću od legura koje se mogu toplinski tretirati. Ovu leguru karakterizira visoka čvrstoća, dobra zavarljivost, otpornost na koroziju u morskom okolišu i pogodna je za površinsku zaštitu. Ova grupa legura se primjenjuje u građevinarstvu, automobilskoj industriji, medicini i brodogradnji. [28,30]

4. KOROZIJA

Korozija je nenamjerno razaranje konstrukcijskih materijala uzrokovano fizikalnim, kemijskim i biološkim djelovanjem. Korozija dolazi od latinske riječi „corrodere“ što znači nagrasti. Korozija je danas jedan od važnih čimbenika materijala i uzrokuje gubitke u gospodarstvu svake zemlje. Od konstrukcijskih materijala se tako očekuje da uz što nižu cijenu imaju izvrsna mehanička svojstva i dobru obradljivost uz istovremenu koroziju postojasnost [14,15,16].



Slika 5. Posljedice djelovanja korozije [6]

Korozijske procese možemo podijeliti po [23]:

1) Vrsti mehanizma i medija u kojem se odvija korozija

- Kemijska korozija
- Elektrokemijska korozija

2) Geometrijskom obliku razaranja korozija može biti:

- Lokalna korozija
- Opća korozija
- Selektivna korozija
- Interkristalna korozija

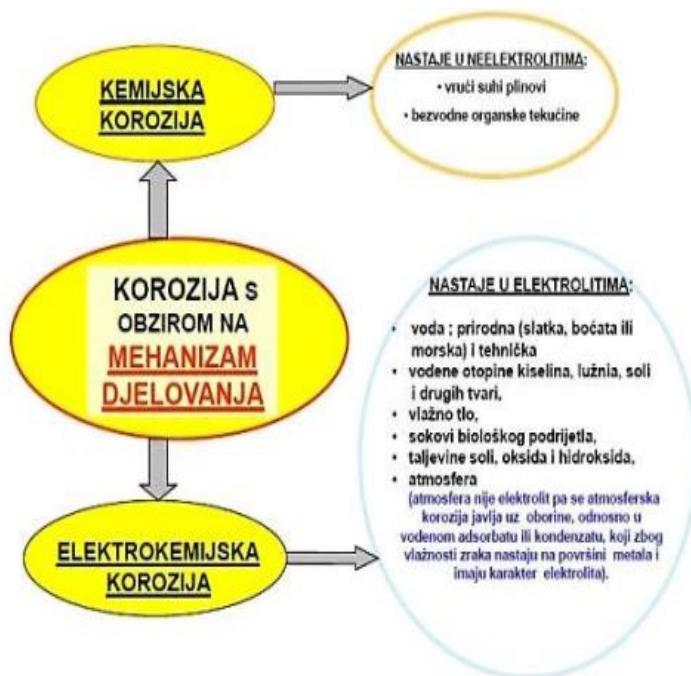


Slika 6. Klasifikacija korozijskih proces [7]

4.1. Vrste korozija

S obzirom na mehanizam procesa razlikujemo dvije vrste korozije:

- Kemijska korozija
- Elektrokemijska korozija



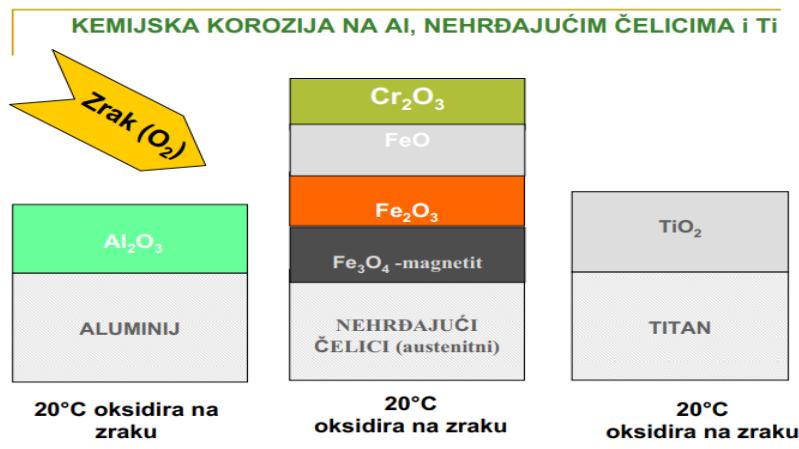
Slika 7. Podjela korozije prema mehanizmu djelovanja [6]

Kemijska korozija se odvija u neelektrolitima, tj. medijima koji ne provode struju. Kemijskoj koroziji su podložni metali i vodljivi nemetali (npr. grafit) te nevodljivi materijali (npr. beton, keramika, staklo, kamen, drvo, polimerni materijali). Najčešće je riječ o oksidaciji metala spajanjem s kisikom pri izlaganju suhim plinovima koji sadrže kisik ili njegove spojeve u

vrućem zraku ili u plinovima izgaranja. Prozivod kemijske korozije je oksid koji tvori sloj na metalu ili se od njega odvaja [14,16].

Brzina i tok kemijske korozije ovisi o [14]:

- metalu koji korodira (struktura, sastav i tekstura)
- sastavu okoline (sastav i koncentracije okoline)
- fizikalnim uvijetima (temperatura, naprezanja, hrapavosti površine)
- brzini gibanja okoline
- korozijskim produktima (fizikalna i kemijska svojstva produkata korozije).



Slika 8. Kemijska korozija na Aluminiju, nehrđajućim čelicima i titanu [7]

Elektrokemijska korozija se pojavljuje na metalima i legurama u dodiru s elektrolitima kao što su voda i vodene otopine kiselina, lužina i soli pri čemu se odvijaju procesi oksidacije i redukcije. Elektrokemijska korozija metala je kemijsko-oksidacijski proces u sustavu metal-elektrolit. Oksidacija je definirana kao reakcija kojom neka tvar ili skupina tvari oslobađa elektrone, pri čemu nastaje druga tvar ili skupina tvari. Redukcija je definirana kao reakcija kojom neka tvar ili skupina tvari veže elektrone, pri čemu nastaje druga tvar ili skupina tvari [14,18].

Prilikom procesa neplemenitiji dijelovi površine metala su anode, gdje se troši metal ionizacijom otapanjem u elektrolitu uz istodobno oslobođanje viška elektrona koji putuju kroz metal prema plemenitijim dijelovima površine, katodama gdje se vežu oksidansima iz okoline. Osim tih reakcija obično se javlja i sekundarna reakcija koja uglavnom daje čvrste produkte među kojima je najpoznatija hrđa, smjesa hidratiziranih željeznih oksida.

Elektrokemijska korozija je vrlo raširena jer postoji veliki broj metalnih konstrukcija i postrojenja izložena vodi ili otopinama, vlažnom tlu ili vlažnoj atmosferi. Jedna od vrsti elektrokemijske korozije je atmosferska korozija koja usred oborina, odnosno u kondenzatu koji zbog vlažnosti zraka pojavljuju na površini metala imaju svojstvo elektrolita [17].



Slika 9. Korozija metala [8]

4.2. Procesi elektrokemijske korozije

Elektrokemijsku koroziju prate dva procesa:

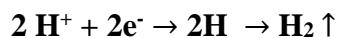
- anodni proces
- katodni proces

Anodni proces (oksidacija ili ionizacija metala) je otapanje, ioniziranje metala uslijed kojeg dolazi do otapanja metala i isovremeni do otpuštanja elektrona:

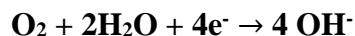


Katodni proces je trošenje elektrona nastalih anodnim procesom. Moguća su dva načina trošenja elektrona:

- a) Vodikova depolarizacija ili redukcija H^+

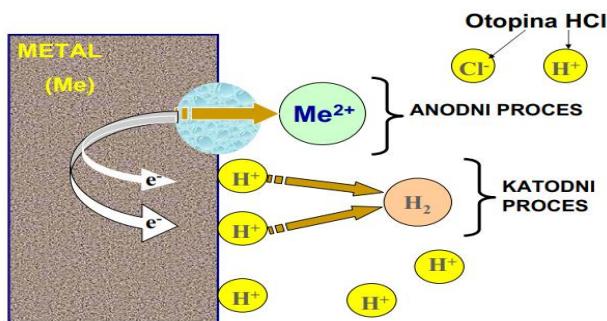


- b) Kisikova depolarizacija ili redukcija O_2



Dva metala u električnom kontaktu tvore galvanski par. Jedan od metala postaje u cijelosti ili djelomično anoda i korodira brzinom većom nego da nisu spojeni u galvanski par pa time drugi metal postaje u cijelosti ili djelomično katoda i korodira manjom brzinom nego da nije spojen u galvanski par [17].

Elektrokemijska korozija je redoks reakcija koja se sastoji od metala izloženog elektrolitu kao davalac elektrona i neke tvari koja ima ulogu primitka elektrona (depolarizator). Proces se sastoji od međusobno paralelnih reakcija oksidacije i redukcije. Metalni atom oksidira u slobodni kation u elektrolitu pri čemu nastaje višak slobodnih elektrona. Na taj višak elektrona se reducira depolarizator koji može biti kation ili anion otopljen u elektrolitu, molekula prisutne čvrste tvari ili tvari otopljene u elektrolitu, odnosno nekoliko kation, aniona ili molukela. Proces elektrokemijske korozije se sastoji od ionizacije metala i depolarizacije (redukcije depolarizatora) [20].



Slika 10. Elektrokemijska korozija metala [7]

4.3. Otpornost aluminijevih legura na koroziju

Aluminij i aluminijeve legure su otporne prema atmosferskoj koroziji jer zbog svog elektrodnog potencijala reagira sa zrakom pri kojem nastaje oksidni sloj debljine 20 do 100 μm . Otpornost aluminijevih legura je ovisna o otpornosti zaštitnog sloja te se prilikom razaranja aluminijevog oksida odmah stvara novi. Mana nastalog oksidnog sloja je velika poroznost koja se smanjuje kuhanjem u vodi ili takozvanim siliranjem pri kojem dolazi do bubrenja oksida koji zatvara pore i pomiče potencijal aluminija prema pozitivnijim vrijednostima [20].

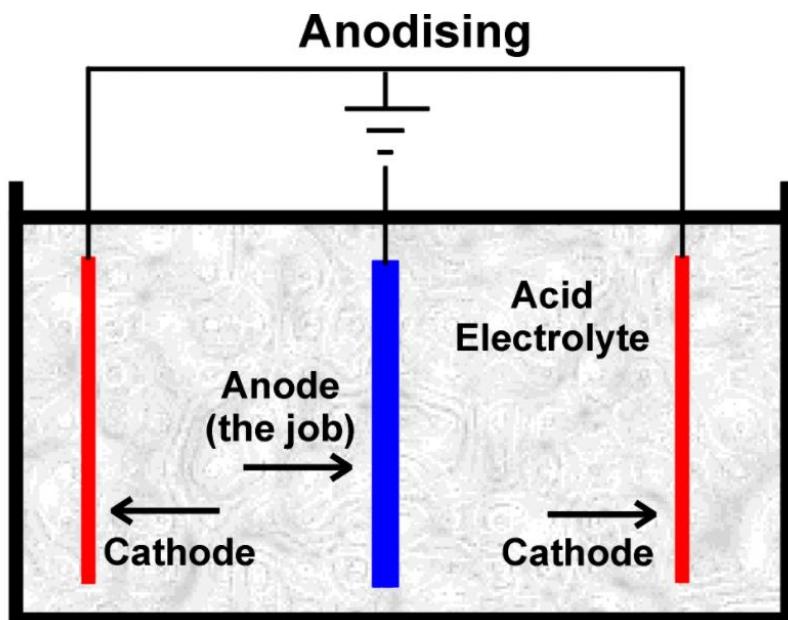
Ako se aluminijive legure površinski legiraju s živom i urone u elektrolit nastaje intenzivna korozija. Aluminijiske legure korodiraju pitingom u elektrolitima koji sadrže Cl^- ione pogotovo ako je tekućina ustajala pa doalzi do formiranja članka diferencijalne aeracije koja je svojstvena za podzemne kablove ali brzina korozije je poprilično spora. Tragovi Cu^{2+} i Fe^{3+} u vodi smanjuju pasivnost aluminija zbog taloženja bakra i željeza pa se zbog toga aluminij ne može upotrebljavati za cjevovode pitke vode ali je pogodan za destiliranu vodu. Pri visokim i niskim pH vrijednostima te povećanjem temperature aluminiju se smanjuje korozionska postojanost ali se legiriranjem s niklom smanjuje korozija pri visokim temperaturama [20].

Kod prisustva kloridnih iona (Cl^-) aluminij ubrzano korodira i može se inhibirati ketonima, kinonima, aminima itd. Najближи potencijal ima kadmij pa se njime platinirani vijci i matice mogu upotrebljavati u izravnom kontaktu s aluminijem. Kontakt aluminija s čelikom u kontinentalnim

uvjetima ne uzrokuje koroziju za razliku od uvjeta morske vode pri kojima dolazi do jake korozije aluminija. Aluminij je uvijek vezan s manjom količinom silicija ili željeza pri kojem udio silicija neznatno smanjuje otpornost koroziji dok udijelom željeza otpornost drastično pada zbog FeAl_3 koji se izlučuje na granicama zrna uzrokovajući interkristalnu koroziju. Posebno dobru koroziju otpornost pokazuje čisti aluminij iz grupe 1xxx s čistoćom od 99.99%. Legiranjem aluminija s magnezijem i silicijem nastaju jednofazne legure i mogu se upotrebavati čak i u moru. I ovdje vrijedi pravilo da su višefazne legure korozivno nestabilnije od monofaznih [20].

5. ELOKSIRANJE ALUMINIJA

Eloksiranje (anodizacija) je najčešće korištena površinska zaštita aluminija. Završna obrada aluminija koja se koristi kada su potrebna dobra mehanička svojstva ili specijalni estetski dobar izgled u raznim spektrima boja. Aluminij ima svoj prirodni tanki sloj oksida, a eloksiranjem se formira isti zaštitni sloj ali je on barem tisuću puta deblji. Pod pojmom eloksiranje se smatra elektrokemijski postupak koji pretvara vanjsku površinu metalnih dijelova otpornu na ogrebotine i koroziju, u kojem je predmet koji obrađujemo anoda [21].



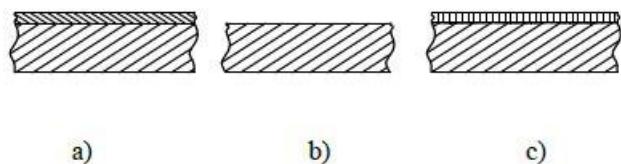
Slika 11. Anodizacija [9]

Svrha eloksiranja nije samo antikorozivna zaštita nego i poboljšanje estetskog izgleda površine te niz drugih površinskih svojstava kao što su tvrdoća i električna izolacija. Pravilnim

eloksirom je moguće postići antikorozivnu zaštitu koja će trajati desetljećima, a površina je otpornija na abraziju od početnog aluminija.

Budući da formirani sloj više nije ni metal nego praktički keramika, eloksirani predmeti ne vode struju. U slučaju potrebe da neki dijelovi predmeta zadrže električnu vodljivost, oni se prethodno zamaskiraju. Eloksoirani sloj raste tako da trećina izlazi van iz početnih gabarita dok ostatak ulazi u materijal te je moguće stoga postići zadovoljavajuću zaštitu i prije prekoračenja zadanih tolerancija, uz uvjet da mjere prilikom izrade nisu na granici.

Prilikom eloksirovanja nastaje oksidni sloj znatno veće debljine nego prirodno nastali. Iako je postupak elektrokemijski kao i galvanizacija, razlikuje ga to što se prilikom eloksirovanja površinski zaštitni sloj pretvara u oksid dok se kod galvanizacije metal taloži na drugi metal. Rezultat toga je nešto tanji aluminij na račun nastalog oksida kao što je prikazano slikom 12.



Slika 12. Anodizacija aluminijuske površine – galvanizirani metal, metal bez prevlake, anodizirani aluminij [10]

Prilikom postupka eloksirovanja rast sloja se odvija prema unutra jer sloj nastaje od metala podloge. Usporedno nastajanju sloja odvija se i proces otapanja u elektrolitu kod kojeg je uvjet povećanja sloja da je brzina oksidacije veća od brzine otapanja oksida. Nakon određenog vremena se uspostavlja ravnoteža tih dviju brzina i oksidni sloj dobiva svoj konačan iznos debljine te se daljnja oksidacija vrši na račun dimenzija predmeta.

Stvaranje aluminijskog oksida na aluminijskoj elektrodi elektrokemijski procesom je ireverzibilan, pa pri promjeni smjera struje ne dolazi do razlaganja nastalog oksidnog sloja pa se zbog toga eloksiranje može izvoditi i s izmjeničnom strujom stavljujući na obje elektrode predmet. Eloksiranje se onda vrši samo u onom periodu kad je ta elektroda pozitivna te je rast sloja zbog toga mnogo sporiji nego kod rada s istosmjernom strujom.

5.1. Svojstva eloksiranog oksidnog sloja

Nastali eloksirani oksidni sloj povećava otpornost aluminija prema atmosferi, a i prema drugim kemikalijama i prirodnim supstratima. S kristalografskog stajališta slojevi su amorfni dok kuhanjem u vodi prelaze u monohidrat bemitne strukture. U eloksiranim slojevima ima i primjesa iz elektrolita te legirajućih komponenti legura. Pošto je aluminijev oksid vrlo stabilan spoj tako je i eloksirani sloj vrlo kemijski postojani u području pH od 6-9. Eloksirani oksidni slojevi su vrlo porozni, pore se razvijaju pravocrtno od vanjske strane sloja prema unutrašnjosti okomito na površinu aluminija. Sami broj i veličina pora ovisi o strujnim parametrima i primjenjivanom elektrolitu [31].

Optički izgled eloksiranih slojeva ovisi o sastavu i strukturi aluminija, vrsti elektrolita i o parametrima anodizacije. Potpuno prozirni i bezbojni slojevi se dobivaju eloksiranjem u sumpornoj kiselini na čistom aluminiju. Mali udio količina nečistoća i legirajućih primjesa nema utjecaja na obojenje slojeva pa se mogu izraditi bezbojni slojevi na legurama Al-Mn do 1%, Al-Mg do 5%, Al-Mg-Si do 1.5% magnezija i 1.5% silicija. Dodavanjem drugih primjesa kao Al-Cu-Mg s većom količinom magnezija dolazi do obojanje u sivkaste oksidne slojeve. Veće količine mangana uzrokuju smeđe bojanje oksidnih slojeva, dok silicij daje slojevima sivi skoro crni ton.

Slojevi obično iznose od 2 do 20 μm i njihova temperatura taljenja je vrlo visoka 2100 °C. Eloksirani slojevi su vrlo dobri električni izolatori te im napon probojnosti ovisi o uvjetima pripreme a obično se kreće između 20 i 40 volta po μm debljine.

Mehanička svojstva eloksiranog sloja su bolja nego kod samog aluminija. Prema Mohsovoj skali se tvrdoća kreće od 7 do 8 i ovisna je o izvedbi samog postupka, leguri i elektrolitu. Vrlo tvrdi slojevi se dobivaju sumpornom kiselinom kao elektrolitom s istosmjernom strujom, a mekši slojevi se dobivaju okalnom kiselinom kao elektrolitom s izmjeničnom strujom. Nastali oksidni sloj je vrlo otporan na habanje, ali su vrlo krhki i pucaju samo okomito na smjer površine metala [32].

5.2. Postupci eloksiranja

Postoji nekoliko postupaka eloksiranja od kojih se za industrijsku primjenu najviše koriste tri postupka s obzirom na vrstu elektrolita – sumporna, oksalna i kromna kiselina. Od ova tri postupka najčešće se koristi i najbolje rezultate daje eloksiranje u sumpornoj kiselini i biti će obrađeno u eksperimentalnom dijelu rada. Eloksiranje u oksalnoj kiselini se koristi kad se želi iskoristiti prirodna žuta boja koja je vrlo postojana. Postupak s kromnom kiselinom kao elektrolitom daje vrlo loše estetske rezultate jer su slojevi neprozirni i primjenjuje se u antikorozivne svrhe u avionskoj industriji na onim dijelovima gdje postoje velike udubine iz kojih nije moguće isprati elektrolit, jer ostaci kromne kiseline ne uzrokuju koroziju u odnosu na sumpornu i oksalnu kiselinu koje mogu uzrokovati koroziju neispranih dijelova. Postupak s kromnom kiselinom je vrlo komplikiran zbog specifičnih parametara promjene napona tokom eloksiranja pa je potreban poseban oprez pri takvom tipu eloksiranja kako bi se dobilo željeni rezultati [24].

5.2.1. Eloksiranje sumpornom kiselinom

Sumporna kiselina je najupotrebljiviji elektrolit u postupcima eloksiranja. Pri ovom postupku nastaje prozirni, srebrni sloj i osnovni je elektrolit za posebne procese kao što su svjetlo eloksiranje (zaštitni sloj na svjetloj površini), tvrdo eloksiranje (tvrdi sloj nastao na niskim temperaturama) te kod izrade poroznog sloja koji može biti obojan. Običan postupak se radi s parametrima 100 A/m^2 i 20°C pri kojem nastaje sloj debljine $12 \mu\text{m}$ od kojeg otprilike polovica otopljeno elektrolitom.

Sastav elektrolita		15-25% sumporne kiseline H_2SO_4
Vrsta struje		istosmjerna ili izmjenična
Temeperatura		0°C
Gustoća struje		$0.5-2.5 \text{ A/dm}^2$
Napon		8-20V
Trajanje		10 – 16 minuta

Tablica 3. Parametri postupka eloksiranja sumpornom kiselinom [19]

5.2.2. Eloksiranje kromnom kiselinom

Koristi se za povećanje korozijske postojanosti aluminija i njegovih legura, a posebno Al-Cu legure koje je teško anodizirati konvencionalnim postupcima. Velika prednost je što ne izaziva koroziju ako kiselina ostane, što je pogotovo korisno kod velikih udubljenja. Proces sa

kromnom kiselinom se odvija pri temperaturi od 40 °C i naponu od 50 V. U prvih 10 minuta postupka napon varira od 0-40 V pa se potom povisi na 40 V i drži 40 minuta te na kraju raspon podiže na 40-50 V za posljednih 10 minuta procesa. Gustoća struje ovog postupka iznosi 300 – 400 A/m². Dobivena boja je neprozirna te uz visokin napon sloj je polupropusni i duktilan. Ova vrsta eloksiranja ima široku primjenu u UK i SAD-u.

Sastav elektrolita		30 g/l kromne kiseline CrO₃
Vrsta struje		Istosmjerna ili izmjenična
Temeperatura		40 °C
Gustoća struje		0.5 – 1 A/dm ²
Napon		0-5 minimalni porast napona 0-20 V 5-15 minimalni porast napona 20-40V 15-50 minimalni konstatni napon 40V 50-55 minimalni porast napona 40-50V 55-60 minalni konstatni napon 50 V
Trajanje		10 – 16 minuta

Tablica 4. Parametri postupka eloksiranja kromnom kiselinom [19]

5.2.3. Eloksiranje oksalnom kiselinom

Eloksiranje oksalnom kiselinom je razvijeno u Japanu 1923. godine te je i danas u širokoj upotrebi. Obično se koristi 3% kiseline na 1000 A/m² i daje žučkasti sloj debljine 14 µm. Potreban je početni napon od 20 V i podiže se do 60 V. Kao i kod kromne kiseline postupno povećanje napona znači i nastajenje polupropusnog sloja. U Europi se oksalna kiselina koristi kao dodatak sumornoj kiselini da bi se poboljšalo stvaranje sloja, jer sumporna kiselina ima

svojstva da zadrži prozirnost. Gustoća struje je ista kao i kod postupka sumpornom kiselinom $0.5\text{--}2.5 \text{ A/dm}^2$. Najbolje je koristiti izmjeničnu struju ili pulsirajuću struju kako bi se usmjerili oksalni ioni na sloj.

Sastav elektrolita		30-50 g/l oksalne kiseline $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$
Vrsta struje		istosmjerna ili izmjenična
Temeperatura		15-60 °C
Gustoća struje		$0.5\text{--}2.5 \text{ A/dm}^2$
Napon		40-80V
Trajanje		10 – 16 minuta

Tablica 5. Parametri postupka eloksiranja oksalnom kiselinom [19]

6. EKSPERIMENTLANI DIO

U eksperimentalno dijelu proveden je postupak tvrdog eloksiranja dvije pozicije na dva različita tipa legura aluminija – EN AW 5083 i EN AW 7075. Eloksiranje je provedeno u otopini sumporne kiseline. Nakon provedenog eloksiranja na obradcima će se usporediti debljina nanosa i estetska izvedba s obzirom na sami sastav pojedinog aluminija. Eloksiranje je provedeno u poduzeću TIZ METAL d.o.o. [9] koje pruža usluge površinske zaštite takve vrste.

Aluminijeva legura EN AW 5083

Aluminijeva legura EN AW 5083 se zbog sadržaja silicija može toplinski tretirati te zbog tog vrlo svestrana legura sa širokom primjenom u karoserijama automobila i kamiona, izgradnji brodova, posude pod pritiskom i slično.

Težina %	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Ostalo ukupno
5083	0,4	0,5	-	0,4-0,1	4,0/4,9	0,15	0,25	0,15

Tablica 6. Kemijski sastav aluminijeve legure EN AW 5083



Slika 13. Pozicija od legure EN AW 5083

Aluminijeva legura EN AW 7075

Težina %	Ze	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Ostalo ukupno
7075	5,6	2,1-2,9	1,2-2,0	0,3	0,5	0,4	0,15

Tablica 7. Kemijski sastav aluminijeve legure EN AW 7075



Slika 14. Pozicija od legure EN AW 7075

Alumijsku leguru EN AW 7075 karakterizira visoka čvrstoća te velik omjer čvrstoće i težine. Ova legura se može usporediti s većinom čeličnih legura u pogledu čvrstoće. Svoju primjenu nalazi u proizvodima visokih performansi kao što su pomorski, automobilski i zračni promet.

Eksperimentalni dio se provodio sljedećim redoslijedom operacija:

1. Odamšćivanje u alkalnom deterđentu
2. Dekipiranje
3. Elosiranje u sumpornoj kiselini
4. Provjera debljine sloja

1. Odmaščivanje u alkalnom deterdžentu



Slika 15. Kada za odmaščivanje obradaka u alkalnom deterdžentu

Vrijeme trajanja proces je deset minuta i temperatura 70°C . Poslije odmaščivanja je potrebno ispiranje u vodi također 10 minuta.

Svi se obradci prije samog eloksiranja moraju odmastiti kako ne bi imali zaostale tragove obrade. Otopina deterdženta je zagrijana na $65\text{-}75^{\circ}\text{C}$ te se pri toj temperaturi uspješno odstranjuju sve nečistoće. Problem odstranjivanja nečistoća je veći kod lijevanih legura, ali one ionako nisu pogodne za anodno eloksiranje.

Poslije odmaščivanja se predmeti ne smiju više dodirivati rukama nego samo pomoćnim anodama.

2. Dekapiranje

Postupak dekapiranja pozicija od aluminijevih legura EN AW 5083 i EN AW 7075 sastoji se od dekapiranja u otopini natrijevog hidroksida pa potom u otopini dušične kiseline.

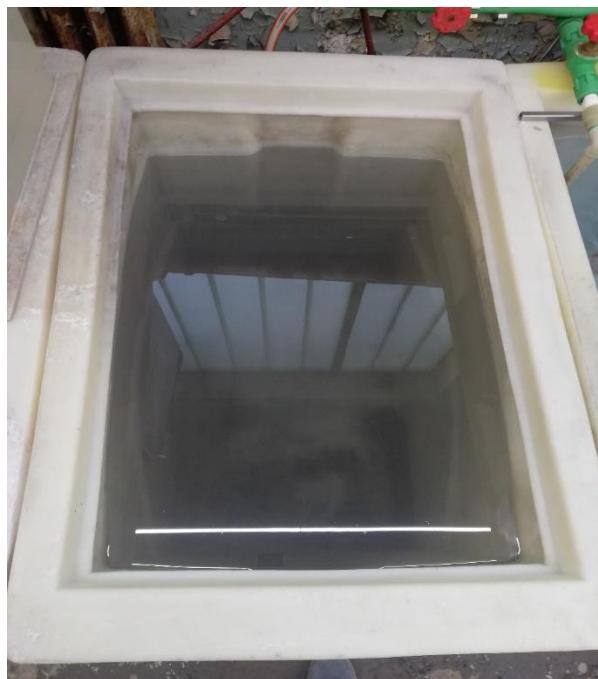
a) Dekapiranje u otopini NaOH

Budući da je aluminij amfoteran, provodi se nagrizanje aluminija i njegovih legura u lužini, odnosno dekapiranje služi za uklanjanje prirodnog sloja oksida sa njegove površine. Izvodi se na način da se prvo obradci zadržavaju u 10-20% otopini NaOH zagrijanoj na 40-60 °C u trajanju od 1-5 minuta. Nakon dekapiranja obradci se moraju obavezno isprati u vodi.



Slika 16. Kad za dekapiranje u otopini NaOH

- b) Dekapiranje u 30% otopini HNO_3



Slika 17. Kada za dekapiranje u 30% otopini HNO_3

Postupak dekapiranja u 30% otopini dušične kiseline provodi se tako da se obradci uranjaju u otopinu između 10-60 sekundi

Nakon dekapiranja u dušičnoj kiselini potrebno je ponovo ispiranje.

3. Eloksiranje u otopini sumporne kiseline

Postupak eloksiranja provodi se u 20% otopini H_2SO_4 .

Parametri: $2.5 \text{ A} / \text{dm}^3$; $t = 25-30 \text{ min}$

Pošto se u eksperimentalnom dijelu provodilo tvrdo eloksiranje parametri su $2.5 \text{ A} / \text{dm}^3$ i $t = 25-30 \text{ min}$. Nakon ispiranja obradci se uranjaju u kadu za eloksiranje. Obradci se spoje s

pomoćnim anodama i na njima se ne primjećuje vizualna promjena dok se kod katode stvaraju mjeđuhurići vodika. Na pozitivan pol se priključuje aluminijski predmet kojeg želimo eloksirati, a kao negativna elektroda se najčešće koristi olovo. Istosmjernom strujom se preko promjenjivog otpornika i ampermetrom regulira potrebna struja za eloksiranje.



Slika 18. Kada za eloksiranje i postupak

Ispiranje poslije eloksiranja je posebno važna operacija i najbolje je da traje kao samo eloksiranje kako bi se odstranila kiselina s površine predmeta i kiselina iz pora oksidnog sloja a to je ostvarivo difuzijom.



Slika 19. Provjera postupka tvrdog eloksiranja

Tokom postupka potrebna kontrola nanosa sloja na 2/3 ukupnog vremena.

Dobivene pozicije s tvrdog eloksiranju su vrlo uredne i čiste te se kod legure 7075 primjećuje promjena boje na žućkasto što se i moglo očekivati s obzirom na udio cinka koji tu boju uzrokuje prilikom tvrdog eloksiranja. Pozicija s legurom 5083 je poprimila sivkastu boju.



Slika 20. Pozicija EN AW 7072 poslije tvrdog eloksiranja



Slika 21. Pozicija EN AW 5083 poslije tvrdog eloksiranja

Iz slike 20. je i vidljivo da je pozicija od materijala EN AW 7075 (udio cinka) poprimila nijansu smeđe boje za razliku od sive boje kod EN AW 5083 (Slika 21.)

4. Provjera debljine nanosa sloja mjeračem – DFT Combo



Slika 22. Mjerač debljine nanosa DFT Combo

Tehnički podaci

Mjerno područje	0 ... 1000 µm
Reolucija	1 µm
Točnost	±(2 µm +3 %)
Najmanja mjerna površina	5 x 5 mm
Najmanji radijus nagiba	Konveksno: 3 mm/ konkavno: 50 mm
Minimalna debljina pozadinskog sloja (metala)	0,5 mm
Prikaz	3-znamenkasti LCD-display
Radni uvjeti	0 ... +60 °C
Napajanje	1 x 1,5 V baterija
Dimenzije uređaja	100 x 38 x 23 mm

Tablica 8. Tehničke karakteristike uređaja DFT Combo.

Rukovanje uređajem za kontrolu nanosa je vrlo jednostavna i radi na principu vrtložnih struja kojima se dobiva iznos nanosa. Potrebno je обратити pozornost da se uređaj koristi na predmet koji se mjeri jer u suprotnom neće dati točne podatke.

Provjerom debljina sloja kod eksperimentalnih pozicija je uočena malo veća vrijednost kod aluminija EN AW 5083 te veći raspon vrijednosti u odnosu na EN AW 7075.

	EN AW 5083 (μm)	EN AW 7075 (μm)
1. mjerjenje	32	23
2. mjerjenje	31	31
3. mjerjenje	33	25
4. mjerjenje	32	22
5. mjerjenje	33	26

Tablica 9. Izmjerene debljine nanosa oksidnog sloja na aluminijskim legurama

Razlog tome je sami sastav koji je uzrokovao uz dane parametre krajnju dobivenu debljinu sloja.



Slika 23. Provjera debljina nanosa – 1



Slika 24. Provjera debljina nanosa – 2



Slika 25. Provjera debljina nanosa – 3



Slika 26. Provjera debljina nanosa – 4

7. Zaključak

Aluminij kao materijal poprima sve veću primjenu u strojarstvu zbog svojih odličnih svojstava i mogućnosti raznolikog legiranja sa svrhom dobivanja željenih svojstava. Aluminijevo svojstvo da stvori prirodni oksidni sloj čini ga antikorozivnim u kontinetalnoj atmosferi ali ga je za ostale uvijete potrebno eloksirati.

Cilj eksperimentalnog dijela je bio dati uvid u korake tvrdog eloksiranja te kontroli nastale debljine nanosa i samog izgleda elokisrane pozicije. Prilikom tvrdog eloksiranja legure EN AW 7072 dobiven je nanos od 23 mikrona dok kod eloksiranje legure EN AW 5083 sloj 32 mikrona. Tokom tvrdog eloksiranja su korišteni isti parametri i razlika u dobivenom sloju je zbog samog sastava legure kao što se i moglo očekivato pošto su različite grupe legura aluminija također različito pogodne za tvrdo eloksiranje.

Sama debljina nanosa tvrdog eloksiranja ne predstavlja problem kod izrađenih pozicija jer se i dalje radi o malom sloju od 20-30 mikrona ali predstavlja ukoliko postoje uske tolerancije pa je u tom slučaju potrebno odraditi adekvatnu strojnu predobradu koja će s nanosom zadovoljiti traženu toleranciju.

Popis literature

- [1] Aluminum Association: Aluminum properties and physical metallurgy. ASM international, 1984.
- [2] Jakovljević, M. O proizvodnji aluminija. // Aluminij. Dostupno na: <http://miroslavjakovljevic.iz.hr/o-aluminiju> (15.6.2021.).
- [3] Alar. V. Kemijska postojanost materijala. Zagreb : Sveučilište u Zagrebu ; Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017. Dostupno na: https://bib.irb.hr/datoteka/843434.KEMIJSKA_POSTOJANOST.pdf (9.6.2021.).
- [4] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2020. Dostupno na: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=17763>.
- [5] Tehnička enciklopedija, digitalizirano izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 1963. Dostupno na: <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/aluminijum.pdf> .
- [6] Mathers, Gene. The welding of aluminium and its alloys. Woodhead publishing, 2002.
- [7] World aluminium - the website of the International Aluminium Institute. Dostupno na: <https://www.world-aluminium.org/> (23.6.2021.).
- [8] Periodni sustav elemenata. Dostupno na: <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/spojevi.html> (21.6.2021.).
- [9] TIZ METAL d.o.o. // Fininfo. Dostupno na: <https://www.fininfo.hr/Poduzece/Pregled/tiz-metal/Detaljno/67126> (24.6.2021.).
- [10] Dolić, N. Metalurgija aluminija. Sisak : Sveučilište u Zagrebu ; Metalurški fakultet, 2015. Dostupno i na: <https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-diplomskog-studija/metalurgija-aluminija>

- [11] Golubić, S. Tehnički materijali. Bjelovar : Veleučilište u Bjelovaru, 2019.
- [12] Skejić, D.; Boko, I.; Torić, N. Aluminij kao materijal za suvremene konstrukcije. // Građevinar 67, 11(2015), str. 1075-1085. Dostupno na: <http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-67-2015-11-3-1395.pdf>.
- [13] Dyvik, S. H.; Manum, B.; Mork, J. H.; Luczkowski, M. Structural aluminium in architecture—the history and future of aluminium as a structural material. Dostupno na: https://www.researchgate.net/profile/Steinar-Dyvik/publication/334418908_Structural_aluminium_in_architecture_-The_history_and_future_of_aluminium_as_a_structural_material/links/5ec21d16a6fdcc90d67e0dfc/Structural-aluminium-in-architecture-The-history-and-future-of-aluminium-as-a-structural-material.pdf (10.6.2021.).
- [14] Juraga, I. et. al. Korozija i metode zaštite od korozije : ppt prezentacija. Zagreb : Sveučilište u Zagrebu ; Fakultet strojarstva i brodogradnje. Dostupno na: https://www.fsb.unizg.hr/korozija/PROIZVODNI_POSTUPCI.pdf (1.6.2021.).
- [15] Juraga, I. Mehanizmi zaštite od korozije. Zagreb : Sveučilište u Zagrebu ; Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012. Dostupno na: https://bib.irb.hr/datoteka/749414.Mehanizmi_zatite_od_korozije_-_skripta_2015.pdf (1.6.2021.).
- [16] Tehnička enciklopedija, digitalizirano izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=33255>
- [17] Andrić, I. Korozija i zaštita od korozije poljoprivredne tehnike : diplomska rad. Osijek : Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera ; Poljoprivredni fakultet Osijek, 2017. Dostupno na: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/pfos:982/preview> (2.6.2021.).

- [18] Špadina, B. Galvanska korozija : seminarski rad. Sisak : Sveučilište u Zagrebu ; Metalurški fakultet, 2007. Dostupno na: [\(29.5.2021.\).](https://bib.irb.hr/datoteka/307438.GALVANSKA_KOROZIJA.pdf)
- [19] Dujić, Z. Zaštita aluminija metodom eloksiranja : diplomski rad. Slavonski Brod : Sveučilište u Osijeku ; Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2017.
- [20] Different Types of Corrosion : Recognition, Mechanisms and Prevention. // Webcorr : The Corrosion Clinic. Dostupno na: [\(23.5.2021.\).](https://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/galvanic_corrosion.htm)
- [21] Ye, R. Everything You Need to Know About Anodizing Aluminum. // 3ERP. Dostupno na <https://www.3erp.com/blog/everything-about-anodizing-aluminum/> (3.6.2021.).
- [22] Eloksiranje. // Ferometal. Dostupno na: [\(22.6.2021.\)](http://www.ferometal.hr/en/eloksiranje)
- [23] Jelić Mrčelić, G. Korozija i zaštita materijala, 2010. Dostupno na: <https://pdfslide.tips/documents/skripta-zastita-materijala.html> (23.6.2021.).
- [24] Lovreček, B.; Bolanča, Z.; Korelić, O. Surface charge and interaction with sulphate ions at the boehmitized aluminum. // Surface and Coatings Technology 31, 4(1987), str. 351-364.
- [25] Korozjska svojstva pojedinih tehničkih materijala : skripta // Sveučilište u Rijeci ; Pomorski fakultet. Dostupno na:
https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20180308_093522_sakan_2.Koroziska.svojstva.pojedinih.tehnickih.materijala.pdf (20.6.2020.).
- [26] Živković, D.; Anzulović, B.; Delić, D. Utjecaj morske korozije na kugličareni sloj aluminijске slitine. // Naše more : znanstveni časopis za more i pomorstvo 52, 5-6(2005), str. 206-213. nemam u tekstu

- [27] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J. Svojstva i primjena materijala, 5. izd. Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [28] Aluminum 101 : Quick Read. // The Aluminium Assosisation. Dostupno na: <https://www.aluminum.org/aluminum-advantage/aluminum-101> (20.5.2021.).
- [29] Alcotec. Dostupno na: <http://alcotec.com/us/en/index.cfm> (20.5.2021.).
- [30] Technology // UACJ. Dostupno na: <https://www.uacj.co.jp/english/index.htm> (20.5.2021.).
- [31] Pennisi, M. Anodising. // Coatings fabrication. Dostupno na: <http://www.coatfab.com/anodising.htm> (18.6.2021.).
- [32] Korelić, O. Anodizacija i ostale površinske zaštite, 1. izd. Zagreb, 1960.
- [33] CEN EN 573-3:2009 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 3: Chemical composition and form of products.
- [34] Kralj, S.; Andrić, Š. Zavarivanje i zavarljivost aluminija i legura. Šibenik: savjetovanje : Zavarene aluminijске konstrukcije, 1990.
- [35] Gojić, M. Tehnike spajanja i razdvajanja materijala. Sisak : Metalurški fakultet, 2008.

Popis literature - slike

[1] Ereiz, M. Studija utjecaja životnog ciklusa boksita eksploriranog u rudnicima boksita Jajce o.d.d. u razdoblju od 2010. do 2012. godine; Diplomski rad, Zagreb : Sveučilište u Zagrebu ; Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu, 2019. Dostupno na:
https://bib.irb.hr/datoteka/1025286.Ereiz_diplomski_2019.pdf (25.5.2021.).

[2] Mašinović, D. Ispitivanje svojstava bakrene i aluminijске legure i njihova spoja za primjenu u elektrotehnici: završni rad. Sisak : Sveučilište u Zagrebu; Metalurški fakultet Sisak, 2016. Dostupno na:

<https://repozitorij.simet.unizg.hr/islandora/object/simet%3A50/datastream/PDF/view>
(22.5.2021.).

[3] Aluminijске fasade. // PVC stolarija A.M.A. Dostupno na:

<https://pvcstolarija4.wordpress.com/proizvodi/aluminijske-fasade/> (25.6.2021.).

[4] Aluminum Association. Aluminum : properties and physical metallurgy. ASM international, 1984.

[5] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J. Svojstva i primjena materijala, 5. izd. Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.

[6] Jelić Mrčelić, G. Korozija i zaštita materijala, 2010. Dostupno na:

<https://pdfslide.tips/documents/skripta-zastita-materijala.html> (23.6.2021.).

[7] Juraga, I. et. al. Korozija i metode zaštite od korozije : ppt prezentacija. Zagreb : Sveučilište u Zagrebu ; Fakultet strojarstva i brodogradnje. Dostupno na:

https://www.fsb.unizg.hr/korozija/PROIZVODNI_POSTUPCI.pdf (1.6.2021.).

[8] Korozija. // Wikipeadia. Dostupno na: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Korozija> (25.6.2021.).

[9] Pennisi, M. Anodising. // Coatings fabrication. Dostupno na:

<http://www.coatfab.com/anodising.htm> (18.6.2021.).

[10] Korelić, O. Anodizacija i ostale površinske zaštite, 1. izd. Zagreb, 1960.