

TVRDO ELOKSIRANJE ALUMINIJSKIH LEGURA

Bešlić, Ivan

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2021

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

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

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-19**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

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



zir.nsk.hr



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. Povijest upotrebe aluminijskih legura	2
2.2. Primjena aluminijskih i njihovih legura	5
3. PODJELA I OZNAČAVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA	10
3.1. Podjela aluminijskih legura.....	10
3.2. Označavanje aluminijskih legura.....	13
3.3. Toplinski obradive legure.....	16
3.4. Toplinski neobradive legure.....	18
4. KOROZIJA	19
4.1. Vrste korozija	21
4.2. Proces elektrokemijske korozije	23
4.3. Otpornost aluminijskih legura na koroziju	25
5. ELOKSIRANJE ALUMINIJA	27
5.1. Svojstva eloksiranih oksidnih slojeva	29
5.2. Postupci eloksiranja.....	30

5.2.1. Elokspiranje sumpornom kiselinom.....	31
5.2.2. Elokspiranje kromnom kiselinom.....	31
5.2.3. Elokspiranje oksalnom kiselinom.....	32
6. EKSPERIMENTLANI DIO	34
7. Zaključak	47
Popis literature.....	48
Popis literature - slike.....	52

POPIS SLIKA

<i>Slika 1. Usporedba sirovine kod proizvodnje aluminija [36].....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 2. Primjena aluminija i njegovih legura u industriji u 2011. godini [37].....</i>	<i>6</i>
<i>Slika 3. Aluminijska fasada [38].....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 4. Promjena debljine aluminijske folije za prehrambenu industriju [1]</i>	<i>9</i>
<i>Slika 5. Posljedice djelovanja korozije [23].....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 6. Klasifikacija korozijskih proces [14].....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 7. Podjela korozije prema mehanizmu djelovanja [23].....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 8. Kemijska korozija na Aluminiju, nehrđajućim čelicima i titanu [39]</i>	<i>22</i>
<i>Slika 9. Korozija metala [40]</i>	<i>23</i>
<i>Slika 10. Elektrokemijska korozija metala [39].....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 11. Anodizacija [31]</i>	<i>27</i>
<i>Slika 12. Anodizacija aluminijske površine – galvanizirani metal, metal bez prevlake, anodizirani aluminij [32]</i>	<i>28</i>
<i>Slika 13. Pozicija od legure EN AW 5083</i>	<i>35</i>
<i>Slika 14. Pozicija od legure EN AW 7075</i>	<i>36</i>
<i>Slika 15. Kada za odmaščivanje obradaka u alkalnom deterdžentu</i>	<i>37</i>
<i>Slika 16. Kad za dekapiranje u otopini NaOH</i>	<i>38</i>
<i>Slika 17. Kada za dekapiranje u 30% otopini HNO₃.....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 18. Kada za eloksiranje i postupak.....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 19. Provjera postupka tvrdog eloksiranja</i>	<i>41</i>
<i>Slika 20. Pozicija EN AW 7072 poslije tvrdog eloksiranja</i>	<i>42</i>
<i>Slika 21. Pozicija EN AW 5083 poslije tvrdog eloksiranja</i>	<i>42</i>

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

POPIS TABLICA

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

SAŽETAK

U teorijskom dijelu radu su prikazana osnovna svojstva aluminijske legure te podjela i označavanje aluminijskih legura. Nadalje je prikazana klasifikacija korozije te otpornost aluminijskih 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 aluminijskih 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 eloksiranja 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 aluminum properties, as well as division, resistance and classification of aluminum alloys and corrosion classification. The last chapter of the 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, alloys, 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 korozivnoj 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].

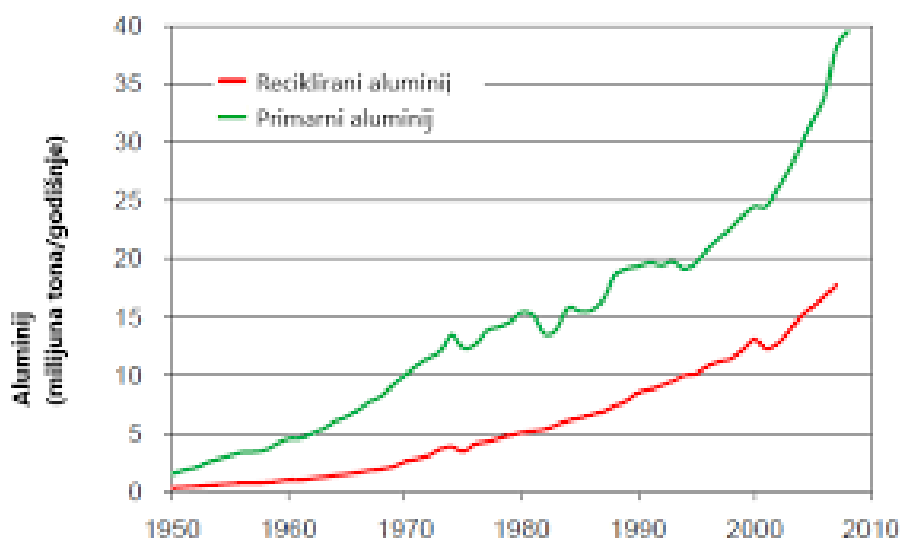
2.1. Povijest upotrebe aluminija

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 Ørsted uspješno izdvojio malo tog metala iz aluminijevog klorida. Ørstedove eksperimente nastavlja Friedrich Wöhler i 1845. izdvaja male kuglice aluminija. Veće uspjehe su zasebno postigli Henri Sinte-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 financijski 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 elektrolitička 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 daljnjim 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 aluminijeveg oksida $AlO(OH)$ ili $Al(OH)_3$, titanijevog oksida, silikata i željeznog oksida koji daje crvnekastu boju. Godine 1808. Humphry Davy je deketektirao postojenje metala u boksitu 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 redukcijnsko 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 aluminijski proizveli da bi uočili detaljno njegova svojstva, sam Wöhler je primjetio neobičnu lakoću aluminijski u usporedbi s ostalim metalima. Devet godina kasnije 1854. godine francuski kemičar i fizičar Henri Saint-Clair Deville je razvio mnogo praktičniju metodu proizvodnje aluminijski kojom je omogućeno dobivanje i nekoliko kilograma čistog aluminijski uz redukciju s natrijem. Ta metoda je kopirana duž cijele Europe i predstavlja ključan korak prema industrijskoj uporabi aluminijski. Deville-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 krto. Fizički, kemijski 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 aluminijski:

- 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 precipitacijskim 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 centrirana 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

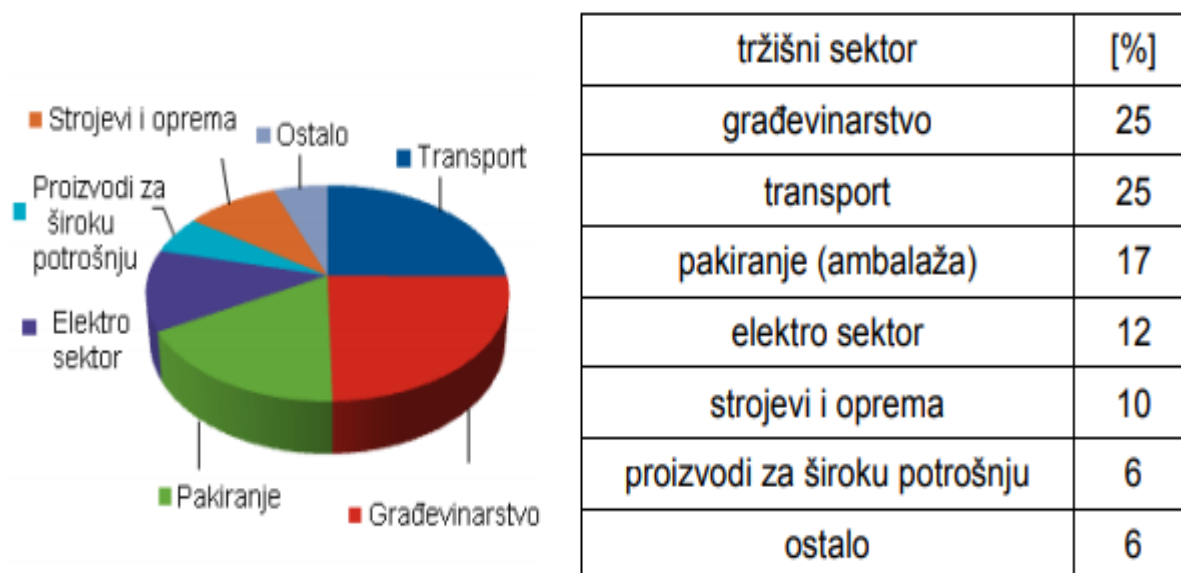
Tablica 1. Usporedba osnovnih fizikalnih svojstava čistog aluminija i aluminijskih legura u odnosu na čelik [12]

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 raznovorsniju 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 koristi u nizu elemenata kao što su aluminijska vrata, fasade (slika 3.), ograde, prozori, vrata jer ne iziskuju velika održavanja, a imaju veliki vijek trajanja. Upotrebom

eloksiranja i anodiziranja vanjske površine omogućen je cijeli niz boja koje je moguće postići te time imitirati plemenite metale, porculan i sl. Prednost upotrebe aluminijskih 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.

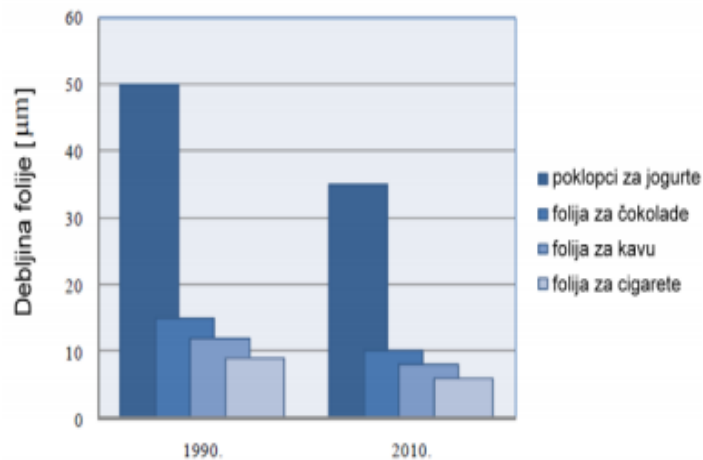
Upotreba aluminija u automobilskoj industriji je posljednjih nekoliko godina doživjela pravu revoluciju. Njegova upotreba se proširila na mnoge automobilske dijelove kao što su aluminijske karoserije, blokovi motora, cilindri, kućišta mjenjača i drugi dijelovi koji su svojom

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 aluminijske folije su izrazito dobra mehanička svojstva i korozijska inertnost u prehrambenoj 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 aluminijske 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 aluminijske ambalaže za oko 30%. U nastavku na slici 4. dan je prikaz promjene debljine aluminijske folije tijekom 20 godina [10].



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

Aluminij se koristi u elektroindustriji za proizvodnju kabela i žica. Električna vodljivost aluminija je 65% vodljivosti bakra, ali aluminijska žica s jednakom vodljivošću 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 užice od tvrdo vučenih aluminijskih žica.

U elektrotehnici je najznačajnija legura almagor (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 istežljivost što je približava vrijednostima za tvrdo vučeni bakar. Osim almagora se koristi i silumini, legura aluminija sa Si 9 – 13,5 % koje se koriste za izradu kaveza motora kod asinkronih 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 primjese, 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 očvrnućem [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, olovo 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.

Legura	Serija	Tip	Internacionale oznake	Raspon mehaničkih karakteristika (MPa)						
				0	100	200	300	400	500	600
Toplinski Neočvrstive legure	1000	Al	1050A 1070A 1100 1200 1080							
	3000	Al-Mn	3003 3004 3005 3105							
	5000	Al-Mg	5086 5083 5056A 5456 5052 5005 5454 5754 5254 5182							
Toplinski očvrstive legure	2000	Al-Cu Al-Cu-Mg	2011 2030 2017A 2618A 2024 (2124) 2014 (2214) 2219							
	6000	Al-Si-Mg	6005A 6060 6061 6082 6081 6106 6351							
		Al-Zn-Mg	7020 7021 7039							
	7000	Al-Zn-Mg-Cu	7049A 7175 7075 7475 7010 7150 7050							

Granica razvlačenja R_p
 Prekidna čvrstoća R_m

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 očvršnuća. Očvršnuće 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 očvršnuća i kemijskom sastavu. Načini očvršnuća aluminijskih legura su precipitacijsko očvršnuće i očvršnuće hladnim oblikovanjem.

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

Legure s povećanim udjelom 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. Ljevane 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 značenje:

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

Kod gnječanih legura poslije prefiksa slijedi četveroznamenasti 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 slicijem. Lijewane 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 gnječanih 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, percipitacijki 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 поближе označavaju stanje dobivene legure.

Osnovne oznake stanja su slijedeće:

- F – kao što je i proizvedeno, primjenjuje se na proizvodne 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 поближе osnovnu operaciju:
 - H1 – hladno deformirano
 - H2 – hladno deformirano i djelomično žareno
 - H3 – hladno deformirano i stabilizirano
 - H4 – deformirano 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 aluminijske 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 automobilske 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 topljenja 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 nagristi. 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 koruzijsku 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
- Elektro-kemijska 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



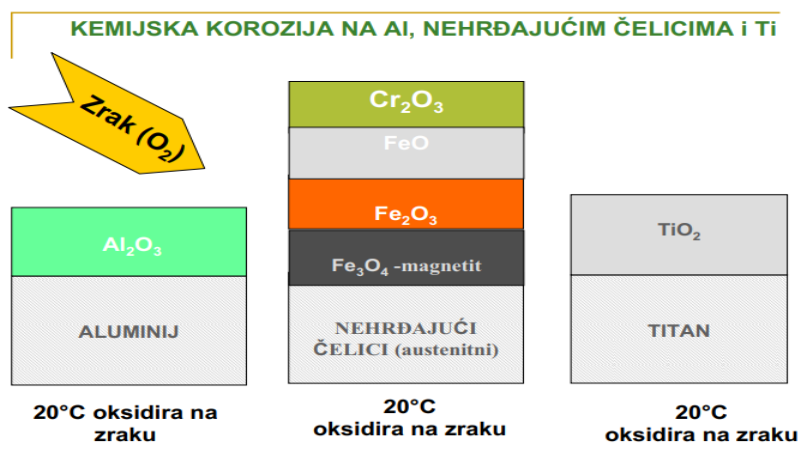
Slika 7. Podjela korozije prema mehanizmu djelovanja [6]

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. Proizvod 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 uvjetima (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 oslobađanje 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:

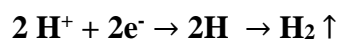
- anodni proces
- katodni proces

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

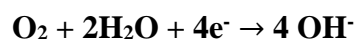


Katodni proces je trošenje elektrona nastalih anodnim procesom. Moguća su dva načina trošenja elektrona:

- a) Vodikova depolarizacija ili redukcija H^{+}

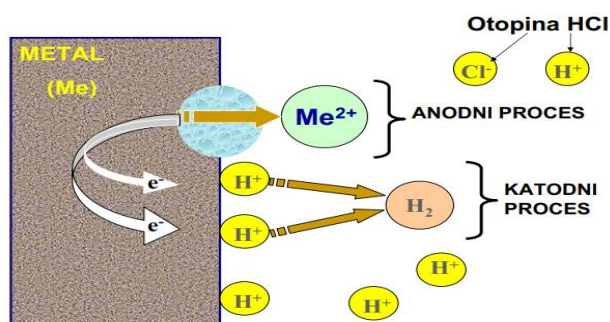


- b) Kisikova depolarizacija ili redukcija O_2



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 molekula. 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].

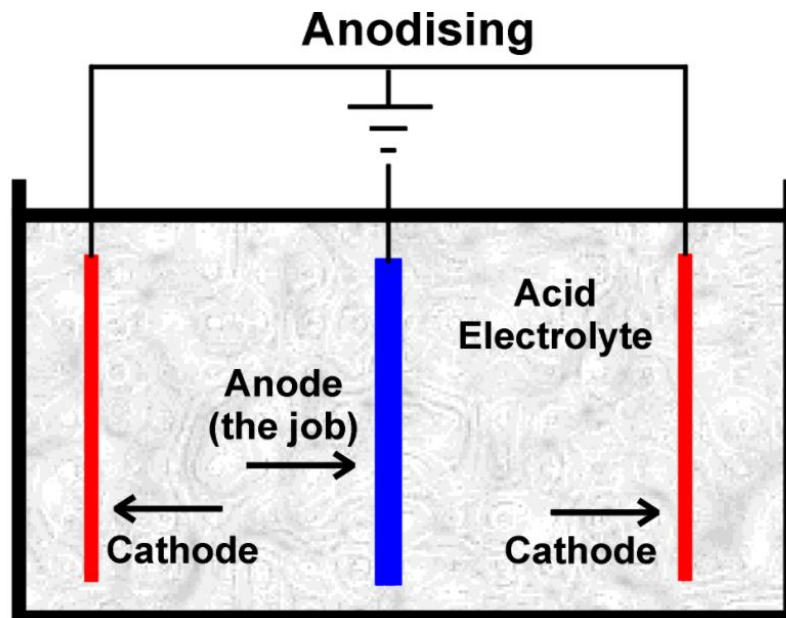
Ako se aluminijive legure površinski legiraju s živom i urone u elektrolit nastaje intenzivna korozija. Aluminijske legure korodiraju pitingom u elektrolitima koji sadrže Cl^- ione pogotovo ako je tekućina ustajala pa dolazi do formiranja članka diferencijalne aeracije koja je svojstvena za podzemne 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 korozivna postojanost ali se legiranjem s niklom smanjuje korozija pri visokim temperaturama [20].

Kod prisustva kloridnih iona (Cl^-) aluminij ubrzano korodira i može se inhibirati ketonima, kinonima, aminima itd. Najbliži 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 udjelom željeza otpornost drastično pada zbog FeAl_3 koji se izlučuje na granicama zrna uzrokovajući interkristalnu koroziju. Posebno dobru korozijsku otpornost pokazuje čisti aluminij iz grupe 1xxx s čistoćom od 99.99%. Legiranjem aluminija s magnezijem i silicijem nastaju jednofazne legure i mogu se upotrebljavati 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 aluminijske. Završna obrada aluminijske 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].



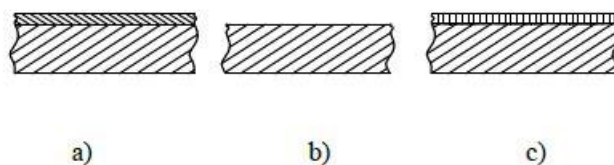
Slika 11. Anodizacija [9]

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

eloksiranjem 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. Eloksirani 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 eloksiranja nastaje oksidni sloj znatno veće debljine nego prirodno nastali. Iako je postupak elektrokemijski kao i galvanizacija, razlikuje ga to što se prilikom eloksiranja 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 aluminijske površine – galvanizirani metal, metal bez prevlake, anodizirani aluminij [10]

Prilikom postupka eloksiranja 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 stavljajući 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 aluminijske površine 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 aluminijski oksid vrlo stabilan spoj tako je i eloksirani sloj vrlo kemijski postojan 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 aluminijske. Sami broj i veličina pora ovisi o strujnim parametrima i primjenjivanom elektrolitu [31].

Optički izgled eloksiranih slojeva ovisi o sastavu i strukturi aluminijske površine, vrsti elektrolita i o parametrima anodizacije. Potpuno prozirni i bezbojni slojevi se dobivaju eloksiranjem u sumpornoj kiselini na čistom aluminijskom. 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 aluminijskog sloja. 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 oksalnom 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 kompliciran 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 svijetlo eloksiranje (zaštitni sloj na svijetloj 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 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ pri kojem nastaje sloj debljine $12 \text{ }\mu\text{m}$ od kojeg otprilike polovica otopljeno elektrolitom.

Sastav elektrolita	15-25% sumporne kiseline H_2SO_4
Vrsta struje	istosmjerna ili izmjenična
Temperatura	$0 \text{ }^\circ\text{C}$
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 posljednjih 10 minuta procesa. Gustoća struje ovog postupka iznosi 300 – 400 A/m². Dobivena boja je neprozirna te uz visokin napon sloj je polupropusan i duktilan. Ova vrsta eloksiranja ima široku primjenu u UK i SAD-u.

Sastav elektrolita	30 g/l kromne kiseline CrO ₃
Vrsta struje	Istosmjerna ili izmjenična
Temperatura	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 0.5-2.5 A/dm³. Najbolje je koristiti izmjeničnu struju ili pulsirajuću struju kako bi se usmjerili oksalni ioni na sloj.

Sastav elektrolita	30-50 g/l oksalne kiseline H ₂ C ₂ O ₄
Vrsta struje	istosmjerna ili izmjenična
Temperatura	15-60 °C
Gustoća struje	0.5-2.5 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. Eloksovanje 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. Eloksovanje 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. Eloksiranje u sumpornoj kiselini
4. Provjera debljine sloja

1. Odmaščivanje u alkalnom deterdentu



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 65-75°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

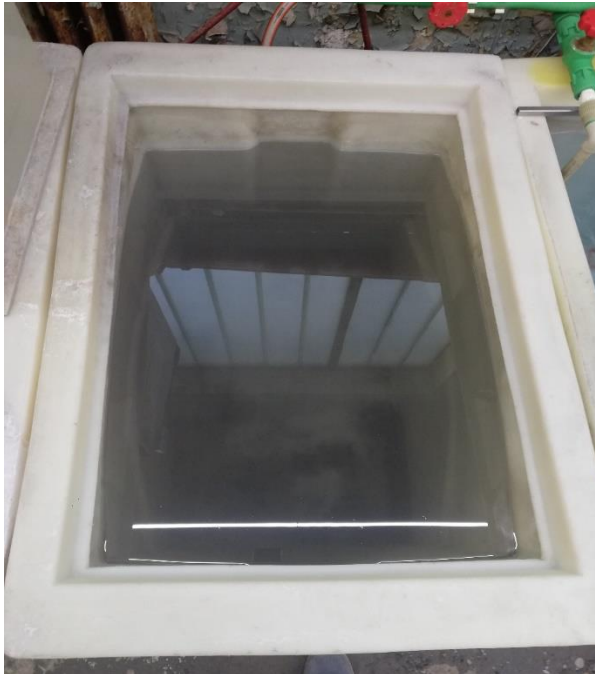
Postupak dekapiranja pozicija od aluminijskih legura EN AW 5083 i EN AW 7075 sastoji se od dekapiranja u otopini natrijevog hidroksida pa potom u otopini dušične kiseline.

a) Dekapiranje u otopini NaOH

Budući da je aluminij amfoteran, provodi se nagrivanje 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 HNO₃

Slika 17. Kada za dekapiranje u 30% otopini HNO₃

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 H₂SO₄.

Parametri: 2.5 A /dm³ ; t = 25-30 min

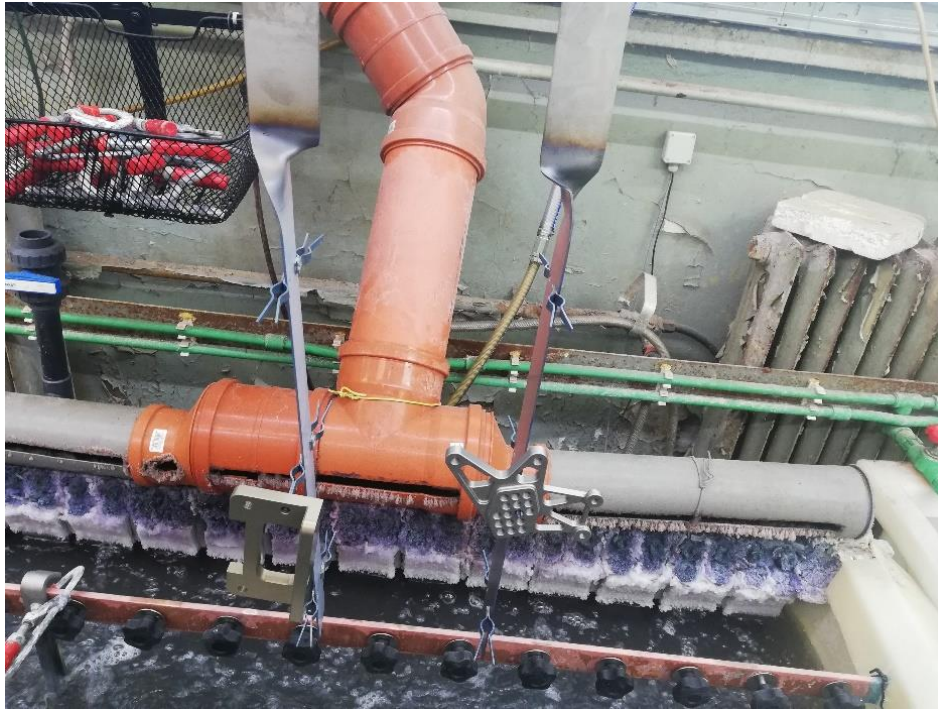
Pošto se u eksperimentalnom dijelu provodilo tvrdo eloksiranje parametri su 2.5 A /dm³ i t = 25-30 min. Nakon ispiranja obradci se uranjaju u kadu za eloksiranje. Obradci se spoje s

pomoćnim anodama i na njima se ne primjećuje vizualna promjena dok se kod katode stvaraju mjehurići 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 mjerачem – DFT Combo



Slika 22. Mjerač debljine nanosa DFT Combo

Tehnički podaci

Mjerno područje	0 ... 1000 μm
Reolucija	1 μm
Točnost	$\pm(2 \mu\text{m} + 3 \%)$
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 $^{\circ}\text{C}$
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 obratiti 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 aluminijske EN AW 5083 te veći raspon vrijednosti u odnosu na EN AW 7075.

	EN AW 5083 (μm)	EN AW 7075 (μm)
1. mjerenje	32	23
2. mjerenje	31	31
3. mjerenje	33	25
4. mjerenje	32	22
5. mjerenje	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. Aluminiјеvo svojstvo da stvori prirodni oksidni sloj čini ga antikorozivnim u kontinentalnoj atmosferi ali ga je za ostale uvijete potrebno eloksirati.

Cilj eksperimentnog 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 eloksiranja legure EN AW 5083 sloj 32 mikrona. Tokom tvrdog eloksiranja su korišteni isti parametri i razlika u dobivenom sloja 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 : diplomski 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: https://bib.irb.hr/datoteka/307438.GALVANSKA_KOROZIJA.pdf (29.5.2021.).
- [19] Dujić, Z. Zaštita aluminijske metode eloksiranja : diplomski rad. Slavonski Brod : Sveučilište u Osijeku ; Strojarski fakultet u Slavskom Brodu, 2017.
- [20] Different Types of Corrosion : Recognition, Mechanisms and Prevention. // Webcorr : The Corrosion Clinic. Dostupno na: https://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/galvanic_corrosion.htm (23.5.2021.).
- [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: <http://www.ferometal.hr/en/eloksiranje> (22.6.2021.).
- [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] Korozijska 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.Korozijka_svojstva_pojedinih_tehnickih_materijala.pdf (20.6.2020.).
- [26] Živković, D.; Anzulović, B.; Delić, D. Utjecaj morske korozije na kugličareni sloj aluminijske slitine. // Naše more : znanstveni časopis za more i pomorstvo 52, 5-6(2005), str. 206-213. nemam u tekstu

- [27] Filetin, T.; Kovačićek, F.; Indof, J. Svojstva i primjena materijala, 5. izd. Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [28] Aluminum 101 : Quick Read. // The Aluminium Assosiation. 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 aluminijske 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 eksplattiranog 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 aluminijske legure i njihova spoja za primjenu u elektrotehnici: završni rad. Sisak : Sveučilište u Zagrebu; Metalurški fakultet Sisak, 2016. Dostupno na: <https://repositorij.simet.unizg.hr/islandora/object/simet%3A50/datastream/PDF/view> (22.5.2021.).
- [3] Aluminijske 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.; Kovačićek, 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. // Wikipedia. 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.