

MEHANIČKA STVOJSTVA ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA

Makarun, Jakov

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:128:229793>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-26**



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
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

JAKOV MAKARUN

**MEHANIČKA SVOJSTVA ALUMINIJA I
ALUMINIJSKIH LEGURA**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2023.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

JAKOV MAKARUN

**MEHANIČKA SVOJSTVA ALUMINIJA I
ALUMINIJSKIH LEGURA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor :

dr. sc. Tihana Kostadin, prof. struč. stud.

KARLOVAC, 2023.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Klasa:
602-07/___-01/___

Ur.broj:
2133-61-04-___-01

Datum:

ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

| | | | |
|---|--|---------------------------|--|
| * Ime i prezime | JAKOV MAKARUN | | |
| OIB / JMBG | | | |
| Adresa | | | |
| Tel. / Mob./e-mail | | | |
| Matični broj studenta | | | |
| JMBAG | | | |
| Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija) | Xpreddiplomski | specijalistički diplomski | |
| Naziv studija | PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA | | |
| Godina upisa | 2019. | | |
| Datum podnošenja molbe | 01.03.2023. | | |
| Vlastoručni potpis studenta/studentice | | | |

* Naslov teme na hrvatskom: MEHANIČKA SVOJSTVA ALUMINIJA I ALUMINIJSKIH LEGURA

* Naslov teme na engleskom: MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM AND ALUMINUM ALLOYS

Opis zadatka:

Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu potrebno je opisati lake i obojene metale i njihova svojstva, a posebno aluminij i legure aluminija. U eksperimentalnom dijelu opisati korištene materijale i opremu, te napraviti ispitivanje mehaničkih svojstava aluminija, odnosno aluminijske legure. Napraviti osnovnu statističku obradu i analizu dobivenih rezultata, a na kraja rada napisati odgovarajući zaključak. Eksperimentalni dio odraditi u Laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu. Rad urediti prema uputama za pisanje završnog rada na strojarskom odjelu, kako je objavljeno na web stranicama Veleučilišta u Karlovcu.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

IZJAVA

Želim iskoristiti priliku da se zahvalim svom mentoru, dr. sc. Tihani Kostadin, prof. struč. stud., na nesebičnom vodstvu i podršci tijekom pisanja ovog rada. Također želim izraziti zahvalnost svojoj obitelji i svima ostalima koji su me podržavali tijekom procesa pisanja.

Ističem da sam rad pisao samostalno te da su svi izvori i literatura koju sam koristio pravilno navedeni i citirani.

Karlovac, 10.07.2023.

Jakov Makarun

SAŽETAK

Završni rad sastoji se od nekoliko osnovnih dijelova koji su ključni za razumijevanje teme. Uvodni dio ili teorijski okvir ima svrhu pružiti čitatelju osnovno razumijevanje o temi rada. U tom dijelu, objašnjava se u kojoj se grupi metala nalazi aluminij, njegove osnovne karakteristike, kao i mehanička i kemijska svojstva. Osim toga, teorijski dio uključuje objašnjenje koncepta legiranja i njegove prednosti i nedostatke.

U eksperimentalnom dijelu rada, navode se dvije konkretne legure (AlMgSi1 legura i AlCuMgPb legura) koje su korištene.

Ključne riječi: laki i obojeni metali, aluminij, aluminijske legure, AlMgSi1 legura i AlCuMgPb legura.

SUMMARY : (MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM AND ALUMINUM ALLOYS)

The final paper consists of several basic parts that are crucial for understanding the topic. The introductory part or theoretical framework has the purpose of providing the reader with a basic understanding of the topic of the paper. In this part, it is explained in which group of metals aluminum is found, its basic characteristics, as well as mechanical and chemical properties. In addition, the theoretical part includes an explanation of the concept of alloying and its advantages and disadvantages.

In the experimental part of the work, two concrete alloys (AlMgSi1 alloy and AlCuMgPb alloy) that were used are listed.

Keywords: light and non-ferrous metals, aluminum, aluminum alloys, AlMgSi1 alloy and AlCuMgPb alloy.

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| POPIS SLIKA | VI |
| POPIS TABLICA | VII |
| POPIS OZNAKA | VIII |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. TEORIJSKI DIO | 2 |
| 2.1. Bakar i njegove legure | 2 |
| 2.1.1. Nelegirani bakar | 2 |
| 2.1.2. Niskolegirani bakar | 2 |
| 2.1.3. Legure bakra | 2 |
| 2.2. Nikal i njegove legure | 4 |
| 2.2.1. Nikal | 4 |
| 2.2.2. Legure nikla | 4 |
| 2.3. Kobalt i njegove legure..... | 5 |
| 2.4. Titan i njegove legure | 6 |
| 2.4.1. Legure titan..... | 7 |
| 2.5. Magnezij i njegove legure..... | 8 |
| 3. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE | 10 |
| 3.1. Uvod..... | 10 |
| 3.2. Aluminij | 10 |
| 3.2.1. Opća svojstva aluminija | 11 |
| 3.2.2. Legure aluminija..... | 14 |
| 3.2.3. Podjela aluminijevih legura | 16 |
| 3.3. Podjela prema kemijskom sastavu..... | 21 |
| 3.4. Podjela prema mogućnosti toplinske obrade..... | 23 |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO | 26 |
| 4.1. Uvod..... | 26 |
| 4.2. Materijal i oprema | 26 |
| 4.2.1. AlMgSi1 (aluminij –magnezij – silicij) legura | 26 |
| 4.2.2. AlCuMgPb (aluminij – bakar – magnezij – olovo)..... | 27 |
| 4.2.3. Mjerna oprema | 28 |
| 4.2.4. Ispitivanje mehaničkih svojstva na kidalici..... | 30 |
| 4.2.5. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu | 36 |
| 4.3. Rezultati ispitivanih mehaničkih svojstva | 38 |
| 4.4. Analiza rezultata..... | 41 |
| 5. ZAKLJUČAK | 42 |
| LITERATURA | 43 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Kristali magnezija..... | 9 |
| Slika 2. Plošno centrirana kubična (FCC) kristalna rešetka [11]..... | 12 |
| Slika 3. Proizvodi od aluminija i aluminijskih legura [6]..... | 13 |
| Slika 4. Prikupljeni proizvodi od aluminija za recikliranje [7]..... | 14 |
| Slika 5. Kidalica u laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu..... | 28 |
| Slika 6. Tvrdomjer Brinell/Vickers u laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu..... | 29 |
| Slika 7. Dimenzije epruveta za ispitivanje vlačne čvrstoće [13]..... | 30 |
| Slika 8. Položaj epruvete u kidalici prije ispitivanja..... | 32 |
| Slika 9. Položaj puknuća epruvete u kidalici..... | 33 |
| Slika 10. Epruvete legure AlMgSi1 nakon ispitivanja..... | 34 |
| Slika 11. Epruvete legure AlCuMgPb nakon ispitivanja..... | 35 |
| Slika 12. Pozicija uzorka na tvrdomjeru..... | 36 |
| Slika 13. Označeni uzorak AlMgSi1 legure nakon ispitivanja na tvrdomjeru..... | 37 |
| Slika 14. Označeni uzorak AlCuMgPb legure nakon ispitivanja na tvrdomjeru..... | 37 |
| Slika 15. Dijagram "naprezanje - deformacija" [12]..... | 38 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva nikla [1]..... | 4 |
| Tablica 2. Primjeri superlegura na bazi kobalta [1]..... | 5 |
| Tablica 3. Fizikalna i mehanička svojstva titana [1]..... | 6 |
| Tablica 4. Mehanička svojstva titanovih legura u toplinskom obrađenom stanju [1]..... | 7 |
| Tablica 5. Fizikalna i mehanička svojstva magnezija [1]..... | 8 |
| Tablica 6. Fizikalna i mehanička svojstva aluminijskih legura [1]..... | 11 |
| Tablica 7. Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura [1]..... | 17 |
| Tablica 8. Označivanje Al-legura za lijevanje [7]..... | 18 |
| Tablica 9. Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijskih legura [1]..... | 19 |
| Tablica 10. Označivanje aluminijskih legura za gnječenje [5]..... | 20 |
| Tablica 11. Podjela i mehanička svojstva toplinski neobradivih aluminijskih legura [8] .. | 23 |
| Tablica 12. Podjela i mehanička svojstva toplinski obradivih aluminijskih legura [8] .. | 24 |
| Tablica 13. Dimenzije vlačne epruvete | 31 |
| Tablica 14. Rezultati ispitivanja na kidalici za leguru AlMgSi1 | 39 |
| Tablica 15. Rezultati ispitivanja na kidalici za leguru AlCuMgPb | 40 |
| Tablica 16. Rezultati ispitivanja na tvrdomjeru za leguru AlMgSi1 i AlCuMgPb..... | 40 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------|-------------------|--|
| R_m | N/mm ² | Vlačna čvrstoća |
| R_e | N/mm ² | Granica razvlačenja |
| $R_p 0.2$ | N/mm ² | Konvencionalna granica razvlačenja |
| S_0 | mm ² | Površina poprečnog presjeka |
| A | % | Istezljivost |
| Z | % | Suženje poprečnog presjeka (kontrakcija) |

1. UVOD

Laki i obojeni metali su jedna vrsta ne željeznih metala. Osnovne karakteristike lakih i obojenih metala za razliku od čelika su: imaju dosta slabija mehanička svojstva, više su elastičniji, otporniji na koroziju, bolji su provodnici električne i toplinske energije, nisu magnetični, otporni su na trenje i imaju puno manju specifičnu težinu [1].

Neki od obojenih metala su:[1]

- Aluminij,
- Bakar,
- Nikal,
- Kobalt,
- Titan,
- Magnezij.

U teorijskom dijelu se opisuje svaki materijal i njegove mehaničke karakteristike. U trećem poglavlju je opisan aluminij i njegove mehaničke karakteristike kao i aluminijske legure.

Aluminij i magnezij imaju manju vlačnu čvrstoću u odnosu na bakar, nikal i titan.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Bakar i njegove legure

2.1.1. Nelegirani bakar

Električna vodljivost je najbitnije i najvažnije tehničko svojstvo. Čisti bakar je nakon srebra najbolji i najkorisniji vodič za električnu energiju koja je u velikoj mjeri ovisi koliko je čisto. Dobra električna vodljivost kao i toplinska vodljivost se temelje na pokretanju slobodnih elektrona[1].

2.1.2. Niskolegirani bakar

Čvrstoća bakra može se povisiti dodavanjem određenih količina odabranih legiranih elemenata. Od svih legura za strojarstvo je najvažnija legura bakra i berilija.

Osim čvrstoće i električne vodljivosti, niskolegirani bakar ima i dobru otpornost na popuštanje[1].

2.1.3. Legure bakra

Bakrene se legure svrstavaju pomoću glavnih legiranih elemenata. Svaka od vrsta može imati i druge elemente koje imaju određeni utjecaj na svojstva. Glavne vrste legura označene su specifičnim imenima: bronce i mjedi.

Bronce su bakrene legure gdje se bakar legira sa kositrom. Ostale bronce mogu sadržavati još željezo, berilij, mangan, cink, olovo.

Mjedi su bakrene legure gdje se bakar legira sa cinkom kojima se mogu još dodati i ostali elementi[1].

U nastavku je navedena osnovna podjela bakrenih legura:

1. Legure bakra s cinkom:

- a) legure bakra s cinkom i niklom (10...30%Ni) – novo srebro,
- b) legura bakra i cinka (>50%Cu i <44 %Zn) – mjedi.

2. Legure bakra bez cinka:

- a) legure bakra s niklom (<45%Ni),
- b) legure bakra s berilijem (<2%Be) – berilijske bronce,
- c) legure bakra s manganom te silicijem i manganom – manganske i silicijske bronce,
- d) legure bakra i kositra (<15%Sn) – kositrene bronce,
- e) legure bakra i aluminijske (<14%Al) – aluminijske bronce,
- f) legure bakra i kositra i/ili olovom (<10%Sn i/ili <25%Pb) olovnokositrene i olovne bronce.

2.2. Nikal i njegove legure

2.2.1. Nikal

Nikal kao materijal je poseban i zanimljiv radi svojih tehnoloških i mehaničkih svojstava te je otporan na koroziju[1].

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva nikla [1]

| | | |
|--------------------------------|---------------------|-----------|
| Gustoća | Kg / m ³ | 8900 |
| Talište | °C | 1453 |
| Modul elastičnosti | N / mm ² | 210000 |
| Toplinska rastezljivost | 10 ⁶ K | 13 |
| Vlačna čvrstoća* | N / mm ² | 380 - 500 |
| Istezljivost | % | 2...60 |

* ovisno o udjelu nečistoća i stanju obrade [1]

Otpornost na koroziju je najbitnije svojstvo čistoga nikla. Općenito nikal je radi stvaranja posebnog zaštitnog omotača otporan na utjecaje iz prirode. Nikal je materijal sa feromagnetičnim svojstvima. Sa time je usko vezana magnetostrikcija koja daje mogućnost primjene u ultrazvučnim generatorima [1].

2.2.2. Legure nikla

Glavna značajka legura koje su napravljene na osnovi nikla je FCC kristalna struktura. Legure na bazi nikla su napravljene prvenstveno radi njihove otpornosti pri visokim temperaturama i otpornosti na koroziju. Niklove legure su odlične zato što zadržavaju vrlo dobro vlačnu čvrstoću i otpornije su na puzanje do određenih temperatura.

Ostala posebna svojstva niklovih legura su električna i magnetska svojstva kao i svojstvo jake rastezljivosti. Legure koje su otporne na koroziju i vrlo visoke temperature, a koje se koriste u tehničkoj primjeni, podijeljene su prema legirnim elementima.

Porastom stupnja legiranosti aluminijske, obradljivost oblikovanjem i odvajanjem čestica može postati otežana. U tim slučajevima, legure s visokim stupnjem legiranosti, kao što su legure s visokim udjelom kobalta, često se preferiraju u procesu lijevanja [1].

2.3. Kobalt i njegove legure

Zbog svoje specifične građe kobalt je jako dobro oblikovljiv u toplom stanju, ali ima ograničeno hladno oblikovanje jer do deformacije dolazi, kao i kod ostalih metala s HCP rešetkom. Kobalt kao čisti materijal se manje koristi kao konstrukcijski materijal.

Kobalt je jako bitan kao legirni element za izradu trajnih magnetnih materijala, brzoreznih čelika, zubarskih legura, sinteriranih tvrdih metala.

Od legura najvažnije svojstvo je lijev otporan na toplinu, sinterirane i kovane legure koje se svrstavaju u grupu superlegura. Kod superlegura na bazi nikla najčešće se dodatno povišenje čvrstoće pri visokim temperaturama postiže precipitacijom intermetalnih spojeva, dok se kod legura na bazi kobalta postiže izlučivanjem karbida. Superlegure kojima je osnova kobalt kao i na bazi nikla ne predlaže se upotrebljavati na temperaturama većim od 1000 °C jer iznad te temperature će doći do ponovnog otapanja u čvrstoj otopini.

Tablica 2. Primjeri superlegura na bazi kobalta [1]

| Trgovačko ime | Osnovni sastav maseni % | $R_p 0.2$ N/mm ² | R_m N/mm ² | A % | Primjena |
|---------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----|---|
| Haynes 25 | 50 Co: 20Cr: 15W: 10Ni | 450 | 930 | 60 | Mlazni motori |
| Stellite 6B | 60Co: 30Cr: 4,5W | 710 | 1220 | 4 | Dijelovi otporni na abrazijsko trošenje |

U tablici 2. za dvije legure kojima je baza kobalt navedeni su mehanička svojstva osnovni podaci o sastavu i primjena[1].

2.4. Titan i njegove legure

Titan je element koji je široko rasprostranjen u prirodi. U Zemljinoj kori, udio titana iznosi oko 0,7%. U prirodi se nalazi u obliku minerala ilmenita i rutila, koji su glavni izvori titana. U tablici 3. su navedeni podaci u mehaničkim i fizikalnim svojstvima titana [1].

Tablica 3. Fizikalna i mehanička svojstva titana [1]

| | | |
|--------------------------------|---------------------|-----------|
| Gustoća | Kg / m ³ | 4500 |
| Talište | °C | 1670 |
| Modul elastičnosti | N / mm ² | 110000 |
| Toplinska rastezljivost | 10 ⁶ K | 9 |
| Vlačna čvrstoća * | N / mm ² | 250 - 700 |
| Istezljivost * | % | >10 |

* ovisno o stanju obrade i udjelu nečistoća

Dobivanje titana i njegovih legura je postupak koji prolazi kroz određene faze. Prva je faza posebnih granulica koje miješaju ostalim legirnim dodacima kada je u pitanju proizvodnja legura. Nakon toga ide prešanje ili stiskanje i zavarivanje otpresaka koje se tale u vakuumskim el. pećima. Slijede faze: vruće kovanje, tokarenje da bi se otklonila površinska onečišćenja i na kraju rezanje u konačne proizvode postupcima (deformiranje ili odvajanje čestica) [1].

Legure u kojima se nalazi titan i sami titan su zbog njihovog omjera gustoće i čvrstoće u temperaturnom intervalu (od -200 °C do +550 °C) u velikoj prednosti pred ostalim materijalima koji se koriste u inženjerskim slučajevima. Titan ima i veliku otpornost na puzanje i umor, imaju malu vrlo visoku toplinsku rastezljivost i visoku otpornost u teškim i agresivnim sredinama.

Proizvodnja i troškovi prerade su jako veliki [1].

2.4.1. Legure titana

Prema djelovanju legirnih elemenata na α/β prekrizaciju dijele se i titanove legure prema mikrostrukturi koja je pri sobnoj temperaturi (20 °C) na α -, β - i ($\alpha+\beta$)-legure. Najbitniji oslonac kod α - faze su aluminij, dušik i kisik. Aluminij mijenja temperaturu prekrizacije na α/β prema višim temperaturama. β - stabilizatori kao željezo, mangan, nikal, krom itd. oni služe da stabiliziraju β -fazu i smanje temperaturu prekrizacije α/β . ($\alpha+\beta$)-legure su zapravo legure koje rade neku poveznicu između α - i β -legura. Te legure imaju prednost što se mogu oblikovati deformiranjem i toplinski očvrstiti, mogu se još zavarivati, ali kod toga postupka može doći do problema[1].

Tablica 4. Mehanička svojstva titanovih legura u toplinskom obrađenom stanju [1]

| Vrsta legura | Kristalna struktura | Toplinska obrada | $R_p 0.2$ N/mm ² | R_m N/mm ² | A % |
|--------------|---------------------|---|--------------------------------|-------------------------|-----|
| TiAl5Sn2.5 | α (HCP) | rekristalizacijski žareno 790°C/zrak | 850 | 950 | 14 |
| TiAl6V4 | $\alpha+\beta$ | rekristalizacijski žareno 750°C/zrak | 890 | 970 | 13 |
| | | rastvoreno žareno 930°C/voda + 540°C/17h/zrak | 1080 | 1180 | 11 |
| TiC13Cr11Al3 | β (BCC) | rekristal, žareno 790°C/zrak | 900 | 950 | 14 |
| | | rastvor žareno 930°C/voda + 480°C/17h/zrak | 1220 | 1290 | 7 |
| | | rastvor žareno 790°C/voda + hlad. Oblikovano + 480°C/17h/zrak | 1700 | 1820 | 4 |

2.5. Magnezij i njegove legure

Magnezij i magnezijeve legure imaju najmanju gustoću od svih zanimljivih legura koje smo do sada spominjali, ali ima srednju vlačnu čvrstoću. Magnezij kao čisti materijal ima vrlo malu čvrstoću te se kao materijal koriste samo njegove legure, čija je čvrstoća puno veća. Najviše se magnezij koristi kao jedan od legirnih dodataka aluminijskim legurama. Magnezijske legure nisu još sto posto usvojene u primjeni s obzirom na sva fizikalna i mehanička svojstva koja pruža. Razlog je to što je magnezij jako kemijski reaktivan[1].

Tablica 5. Fizikalna i mehanička svojstva magnezija [1]

| | | |
|--------------------------------|---------------------|----------|
| Gustoća | Kg / m ³ | 1740 |
| Talište | °C | 649 |
| Modul elastičnosti | N / mm ² | 45100 |
| Toplinska rastezljivost | 10 ⁶ K | 25 |
| Vlačna čvrstoća * | N / mm ² | 80 - 180 |
| Istezljivost * | % | 1...12 |

* ovisno o stanju obrade

Magnezijske legure zahtijevaju posebne zaštitne mjere protiv samozapaljenja tijekom lijevanja, a možda i kod obrade odvajanjem čestica. Razvoj magnezijских legura je fokusiran na primjenu u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji. Glavni razlog je to što magnezijske legure imaju malu masu[1].

Prednosti magnezijских legura su:

- mala masa, jako slične aluminijskim legurama što se tiče omjera između čvrstoće i gustoće,
- imaju veliku sposobnost da priguše vibracije,
- rezljivost materijala je vrlo dobra s obzirom na kvantitetu obrađenog metala i trošenja alata,
- prednost pred aluminijskim legurama je inertnost prema čeličnim kalupima,
- primjenjuju se u kovanom, lijevanom i valjanom stanju.



Slika 1. Kristali magnezija

Nedostaci su im:

- otpornost na koroziju je jako slaba,
- nizak modul elastičnosti: 45000 N/mm^2 ,
- najviša temperaturna granica uporabe je do nekih $350 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE

3.1. Uvod

Aluminij se prirodno nalazi u obliku oksida i kompleksnih oksidnih ruda, iz kojih se putem zahtjevnog elektrolitičkog postupka izdvaja samo metal. Općenito, metali se ekstrahiraju iz oksidnih ruda pomoću ekonomičnih redukcijskih agensa putem termičke obrade, dok se dobiveni sirovi metal potom rafinira kako bi se omogućila oksidacija i eliminacija prisutnih nečistoća. Međutim, kod aluminija takav redukcijski postupak nije izvediv zbog izraženog afiniteta aluminija prema kisiku. U okviru konvencionalnih kemijskih metoda, svi prateći elementi se lakše reduciraju od aluminija.

Važno je istaknuti da je krajem 19. stoljeća otkriven jeftiniji postupak proizvodnje aluminija iz glinice. To otkriće je označilo početak industrijske proizvodnje i šire primjene aluminija [1].

U usporedbi s drugim metalima, aluminij posjeduje niz prednosti zahvaljujući svojoj niskoj gustoći, visokoj toplinskoj vodljivosti, iznimnoj električnoj vodljivosti, otpornosti na koroziju, niskom modulu elastičnosti te estetski privlačnom izgledu. Međutim, glavna slabost aluminija leži u relativno niskoj tvrdoći i vlačnoj čvrstoći, zbog čega se u praksi često koriste aluminijske legure u inženjerskim primjenama. Stoga, sljedeći korak u razvoju bio je pronalazak postupaka koji bi omogućili povećanje čvrstoće aluminijskih legura, stvarajući tako preduvjete za iskorištavanje posebnih kemijskih i fizikalnih svojstava aluminija [1].

Danas, na raspolaganju je širok spektar aluminijskih legura koje su razvijene primjenom različitih mehanizama s ciljem povećanja čvrstoće. Kao rezultat toga, postignute su znatno veće vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće u usporedbi s čistim aluminijem.

3.2. Aluminij

Aluminij karakterizira niska gustoća te ima srebrno-bijelu boju. U pogledu zastupljenosti na Zemlji, aluminij se nalazi na trećem mjestu, s udjelom od približno 8%. To ga čini jednim od najzastupljenijih metala, odmah iza kisika i silicija. Unatoč relativno kratkom vremenu upotrebe od malo više od jednog stoljeća, aluminij se ubraja među najčešće korištene metalne materijale u svijetu, odmah iza čelika [1, 2, 3].

3.2.1. Opća svojstva aluminija

Tehnički aluminij je lagan metal koji se odlikuje relativno visokom otpornošću na koroziju, niskim modulom elastičnosti te visokom toplinskom i električnom vodljivošću. Otporan je na djelovanje vode i atmosferskog zraka, no nije otporan na tvari koje mogu razgraditi njegov zaštitni oksidni sloj, kao što su mineralne lužine i kiseline. Ponajprije se koristi zbog dobre korozijske postojanosti, niske gustoće kao i lijepog izgleda površine [1, 4, 5]..

Tablica 6. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [1]

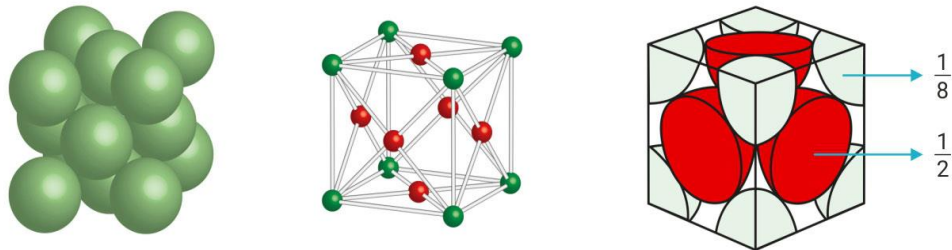
| | | |
|--------------------------------|--------------------|-----------|
| Gustoća | kg/m ³ | 2700 |
| Talište | °C | 660 |
| Modul elastičnosti | N/mm ² | 69000 |
| Toplinska rastezljivost | 10 ⁻⁶ K | 23,8 |
| Električna vodljivost | m/Ωmm ² | 36...37,8 |
| Granica razvlačenja | N/mm ² | 20...120 |
| Vlačna čvrstoća* | N/mm ² | 40...180 |
| Istezljivost* | % | 50...4 |

*ovisno o stanju

Aluminij nije plemenit metal prema svom položaju u nizu elektrokemijskih potencijala metala. Međutim, njegova antikorozivnost temelji se na stvaranju gustog, nepropusnog i tankog oksidnog sloja na površini metala koji se formira u prisutnosti zraka i vodenih otopina. Ovaj oksidni sloj djeluje kao zaštita od daljnje korozije. U slučaju da se oksidni sloj ošteti, na površini aluminija odmah se formira novi sloj putem oksidacije. Otpornost oksidnog sloja povećava se s jačom oksidacijom. Aluminijev oksid ima iznimnu tvrdoću, stoga povećanje debljine oksidnog sloja također povećava otpornost na trošenje.

Mikrostruktura aluminija ima značajan utjecaj na njegova svojstva, a ta svojstva mogu se dalje modificirati toplinskom obradom i legiranjem. Primjenom odgovarajućih toplinskih procesa i legiranja, mogu se postići željene karakteristike aluminija za različite primjene.

Također, zbog vrlo niskog modula elastičnosti, konstrukcije koje su izrađene od aluminija su znatno fleksibilnije u usporedbi s konstrukcijama od istih dimenzija izrađenim od čelika. Ovo svojstvo čini aluminij pogodnim za primjene gdje je potrebna visoka fleksibilnost i elastičnost materijala [1].



Slika 2. Plošno centrirana kubična (FCC) kristalna rešetka [11]

Aluminij ima plošno centriranu kubičnu (FCC) kristalnu rešetku koja mu omogućuje izvanrednu obradljivost u oblikovanju, kako u toplom tako i u hladnom stanju. Ova kristalna struktura pridonosi njegovoj sposobnosti za lako oblikovanje i preoblikovanje [1,4].

Zahvaljujući svojim karakteristikama, kako mehaničkim tako i kemijskim, aluminij i njegove legure pronašle su široku primjenu u gotovo svim područjima života.

U kućanstvu, aluminij se često koristi za izradu kuhinjskog posuđa, zbog svoje lakoće, toplinske vodljivosti i korozijske postojanosti. Također se koristi za izradu metalnih proizvoda široke potrošnje, kao što su limenke za piće i ambalaža, zahvaljujući svojoj lakoći, oblikovnoj fleksibilnosti i recikliranosti.

U graditeljstvu, aluminij i njegove legure koriste se za različite namjene. Primjerice, koriste se za izradu prozora, vrata, fasada i krovnih elemenata zbog svoje korozijske postojanosti, lakoće i estetskog izgleda. Također se koriste za izradu električnih vodiča zbog visoke električne vodljivosti aluminija.

U kemijskoj industriji, aluminij i njegove legure koriste se za izradu posuda i rezervoara zbog svoje kemijske postojanosti i otpornosti na koroziju. Aluminijevi limovi ili paneli često se koriste za izgradnju spremnika za kemikalije ili procesne opreme.

Osim navedenih primjena, aluminij se također koristi u automobilskoj industriji, zrakoplovstvu, elektronici, medicini i mnogim drugim industrijskim sektorima [1, 7].



Slika 3. Proizvodi od aluminija i aluminijevskih legura [6]

Važno je naglasiti da je aluminij izuzetno pogodan za recikliranje, čime se postiže očuvanje prirodnih resursa i smanjenje utjecaja na okoliš. Aluminij može biti recikliran više puta bez gubitka svojih osnovnih svojstava i kvaliteta.

Proces recikliranja aluminija ima značajne ekološke prednosti u odnosu na proizvodnju primarnog aluminija iz rude. Troši se samo oko 5% energije potrebne za proizvodnju primarnog aluminija, što značajno smanjuje potrošnju energije i emisiju stakleničkih plinova. Također, recikliranje aluminija smanjuje potrebu za eksploatacijom i vađenjem aluminijevih ruda, što ima pozitivan učinak na očuvanje prirodnih resursa.

Pretaljivanje proizvoda od aluminija i aluminijских legura koji su već bili u uporabi predstavlja važan proces u recikliranju aluminija. Kroz taj postupak, odbačeni ili reciklirani proizvodi od aluminija prolaze kroz proces toplinske obrade i taljenja kako bi se dobila sekundarna sirovina poznata kao sekundarni aluminij koji se koristi za izradu odljevaka [7, 8].



Slika 4. Prikupljeni proizvodi od aluminija za recikliranje [7]

3.2.2. Legure aluminija

Legiranje metala, dodavanjem određenih legirnih elemenata osnovnim metalima, predstavlja važan postupak za poboljšanje njihovih svojstava i proširenje njihovih područja primjene. Kroz legiranje, mehanička svojstva metala mogu se značajno poboljšati, posebno vlačna čvrstoća i tvrdoća, ali i krutost, rastezljivost, ponekad i žilavost te livljivost.

Međutim, legiranje također ima određene nedostatke. Smanjenje električne i toplinske vodljivosti može biti jedan od tih nedostataka. Dodavanje legirnih elemenata može

poremetiti strukturu metala i stvaranje prepreka za protok električne energije ili topline kroz materijal [1, 8].

3.2.2.1. Opća svojstva aluminijskih legura

Legure aluminijske upotrebljavaju se u lijevanom i u gnječenom stanju. Brojne legure koriste se bez bilo koje dodatne toplinske obrade. Mehanička svojstva mogu se i dalje poboljšati posebnim (precipitacijskim) očvršćućem ili nekim postupkom toplinske obrade [1].

Najvažnija prednost aluminijskih legura je visoka specifična čvrstoća. Aluminijski, s gustoćom tri puta nižom od čelika, ima povoljan omjer čvrstoće i gustoće, posebno kada je riječ o toplinski očvršćenim legurama. Visokočvrste legure aluminijske mogu se natjecati s čelicima visoke čvrstoće i legurama titana u pogledu specifične čvrstoće. Kristalna struktura aluminijskih legura omogućuje im da pri nižim temperaturama ne postanu naglo krhke, već postaju čvršće bez značajnog gubitka žilavosti kako se temperatura smanjuje. Ovo svojstvo omogućuje primjenu aluminijskih legura u uvjetima niskih temperatura [1, 8].

Važno je naglasiti da se ovi nedostaci mogu djelomično prevladati primjenom odgovarajućih tehnika toplinske obrade ili odabirom odgovarajućih legiranih elemenata kako bi se poboljšala svojstva legura [1].

Modul elastičnosti aluminijskih legura otprilike je tri puta niži u odnosu na čelike, što rezultira znatno većom elastičnošću u usporedbi s ostalim konstrukcijskim materijalima. Ovo svojstvo omogućuje legurama aluminijske veću fleksibilnost i deformabilnost pri primjeni sila i opterećenja. Međutim, niska krutost također može ograničiti primjenu u područjima koja zahtijevaju visoku krutost materijala.

Važno je napomenuti da primjena legura aluminijske ima temperaturna ograničenja zbog niske temperature tališta aluminijske (660 °C). Ovi materijali se najbolje ponašaju i zadržavaju svoja svojstva u temperaturnom rasponu od 150 °C do 200 °C. Izvan tog raspona, svojstva legura aluminijske mogu se smanjiti, što može ograničiti njihovu primjenu u područjima visokih temperatura [1,8].

3.2.3. Podjela aluminijskih legura

Legure aluminija mogu se podijeliti u tri glavne skupine prema [8]:

- načinu proizvodnje (tehnološkoj preradi),
- kemijskom sastavu,
- mogućnosti toplinske obrade.

Podjela prema načinu proizvodnje (tehnološkoj preradi)

Prema načinu proizvodnje aluminijske legure se dijele na [1, 8]:

- a) lijevane legure,
- b) gnječene legure.

3.2.3.1. Ljevane legure

Ljevane legure aluminija mogu se podijeliti u tri osnovne skupine: Al-Si, Al-Mg i Al-Cu. Ove skupine legura mogu se kombinirati kako bi se postigle legure s poboljšanim svojstvima u odnosu na čisti aluminij.

Jedna od prednosti aluminijskih lijevanih legura je njihova sposobnost da se jednako dobro liju na sva tri osnovna načina: lijevanje u kokilu, lijevanje u pijesak i tlačno lijevanje. Ovisno o specifičnim zahtjevima i uvjetima, odabire se odgovarajući način lijevanja.

Važno je napomenuti da je odabir odgovarajuće legure aluminija za određenu primjenu ključan kako bi se postigli željeni rezultati. Legiranje omogućava prilagodbu svojstava materijala prema specifičnim zahtjevima i potrebama krajnjeg proizvoda [1].

Tablica 7.Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura [1]

| Mehanička otpornost | Livljivost | Rezljivost | Otpornost na koroziju | Tip legure | Predstavnik |
|---------------------|------------|------------|-----------------------|------------|---|
| mala | srednja | dobra | vrlo dobra | Al-Mg | AlMg3, AlMg5 |
| | | | | Al-Si-Mg | AlSi10Mg, AlSi7Mg1 (Mg omogućuje toplinsko očvrnuće) |
| mala | vrlo dobra | slaba | dobra | Al-Si | AlSi12 |
| | | | | Al-Si-Cu | AlSi5Cu1, AlSi6Cu2 (Si negativno utječe na rezljivost, Cu omogućuje smanjenje Si, ali pogoršava otpornost na koroziju) |
| osrednja* | slaba | dobra | vrlo slaba | Al-Cu | AlCu4MgTi (Ti i Mg usitnjuju zrno) |

*uz toplinsku obradu

Većina zemalja koristi internacionalne brojčane oznake. Al-legure za lijevanje označavaju se sa četiri znamenke oznakom kao što je prikazano u tablici 8.

Tablica 8. Označivanje Al-legura za lijevanje [7]

| Oznaka serije | Glavni legirni element |
|----------------------|-------------------------------|
| 1XX.0 | Bez legirnih elemenata |
| 2XX.0 | Cu |
| 3XX.0 | Si+Cu i/ili Mg |
| 4XX.0 | Si |
| 5XX.0 | Mg |
| 6XX.0 | Neiskorišteno |
| 7XX.0 | Zn |
| 8XX.0 | Sn |
| 9XX.0 | Drugi elementi |

3.2.3.2. Gnječene legure

Osnovna podjela gnječenih aluminijskih legura temelji se na mogućnosti precipitacijskog očvršćivanja i kemijskom sastavu. Postoje mnoge varijante aluminijskih legura. Ovakva podjela prikazana je u tablici 9. gdje su prikazane osnovne skupine legura s mnogostrukim varijantama [1].

Tablica 9. Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura [1]

| Vrsta legure | Način očvršnuća | R_m N/mm ² |
|----------------|--------------------------------|-------------------------|
| 1. Al-Mn | Deformiranjem u hladnom stanju | 200...350 |
| 2. Al-Mg | | |
| 3. Al-Mg-Mn | | |
| 4. Al-Mg-Si | Precipitacijom | ~330 |
| 5. Al-Cu-Mg | | ~450 |
| 6. Al-Zn-Mg | | ~400 |
| 7. Al-Zn-Mg-Cu | | ~550 |
| 8. Al-Li-Cu-Mg | | ~500 |

Ove legure također imaju dobru otpornost na koroziju u atmosferskim uvjetima, što ih čini pogodnim za vanjsku primjenu kao što su konstrukcije, ograde, i slično. Primjer takve legure je aluminij legura 5052 koja se često koristi u brodogradnji i automobilskoj industriji. Legure koje očvršćuju hladnim deformiranjem obično se dobivaju procesom hladnog valjanja ili hladnog vučenja. Ovim postupcima se legura deformira i izlagana je hladnoj radnoj temperaturi, što dovodi do povećanja čvrstoće i tvrdoće materijala. Otpornost na deformaciju je svojstvo legure koje se poboljšava ovim postupkom [1].

Važno je napomenuti da legure koje očvršćuju hladnim deformiranjem mogu biti osjetljive na toplinsko tretiranje, što može utjecati na njihova mehanička svojstva. Stoga je važno

provoditi odgovarajuće postupke toplinske obrade kako bi se održala željena mikrostruktura i svojstva materijala [1].

Precipitacijski očvrstljive legure imaju povoljan omjer gustoće i čvrstoće te se često koriste kada je potrebna visoka čvrstoća uz relativno nisku masu materijala. Legirni elementi poput cinka, magnezija, silicija i bakra dodani su aluminiju kako bi stvorili intermetalne spojeve i poboljšali mehanička svojstva legure. Postupak precipitacijskog očvršćivanja uključuje odgovarajuću termičku obradu legure koja uzrokuje stvaranje finih precipitata unutar čvrste otopine. Ovi precipitati ometaju kretanje dislokacija u kristalnoj rešetki i time povećavaju tvrdoću i čvrstoću materijala. Očvršnuće postignuto precipitacijom obično je veće od očvršnuća postignutog hladnim oblikovanjem [1].

Ostali legirni elementi također imaju svoju primjenu u poboljšanju određenih svojstava aluminijских legura. To su krom, titanij, olovo i bizmut. Svaki od ovih legirnih elemenata ima specifičnu ulogu u poboljšanju određenih svojstava legura te se koriste prema potrebama i zahtjevima primjene [5].

Tablica 10. Označivanje aluminijских legura za gnječenje [5]

| Oznaka serije | Glavni legirni element |
|---------------|------------------------------|
| 1xxx | bez legirnih elemenata |
| 2xxx | bakar (Cu) |
| 3xxx | mangan (Mn) |
| 4xxx | silicij (Si) |
| 5xxx | magnezij (Mg) |
| 6xxx | magnezij (Mg) i silicij (Si) |
| 7xxx | cink (Zn) |
| 8xxx | Drugi elementi |

Prva znamenka u oznaci aluminijevih legura obično označava legirni element ili elemente koji imaju najveći udio u leguri. Svaka serija aluminijevih legura ima svoju oznaku koja pruža informacije o glavnom legirnom elementu. Ova podjela prema glavnom legirnom elementu omogućuje brzo prepoznavanje karakteristika i svojstava legure na temelju njezine oznake [5].

3.3. Podjela prema kemijskom sastavu

Legirni elementi poput bakra (Cu), silicija (Si), magnezija (Mg), mangana (Mn) i cinka (Zn) imaju važnu ulogu u aluminijskim legurama. Dodatak ovih elemenata ili primjesa u aluminij omogućuje poboljšanje specifičnih svojstava legure. Osim toga, dodatak željeza (Fe), titana (Ti) i kroma (Cr) također može biti prisutan u manjim količinama. Kombiniranjem različitih legirnih elemenata i dodataka mogu se stvoriti kompleksne legure koje imaju unaprijeđena svojstva kao što su usitnjenje zrna, poboljšana rastezljivost i sposobnost toplinskog očvršćivanja. Također, u dodatne legirne elemente spadaju kobalt (Co), srebro (Ag), kositar (Sn), bizmut (Bi), nikal (Ni), vanadij (V), kadmij (Cd), olovo (Pb), litij (Li) i cirkonij (Zr). Ovi elementi se često koriste u malim količinama kako bi se postigle određene željene karakteristike aluminijskih legura. Također se može primijetiti prisutnost elemenata poput natrija (Na), bora (B), berilija (Be) i stroncija (Sr), iako u vrlo malim količinama. Ovi elementi mogu imati specifične uloge u poboljšanju određenih svojstava legura.[1, 5, 8].

Svi nabrojani legirni elementi, pri dovoljno visokim temperaturama potpuno su topljivi u rastaljenom aluminiju. Topljivost elemenata ograničena je u kristalima mješancima pri čemu neotopljeni elementi stvaraju vlastite faze ili intermetalne spojeve. Topljivost legirnih elemenata u aluminiju, kao i njihov udio te veličina, oblik i raspodjela intermetalnih spojeva određuje fizikalna, proizvodna i kemijska svojstva legura [1, 8].

Mehanička svojstva, korozijska postojanost i deformabilnost su zajednička svojstva svim aluminijskim legurama. Međutim, kombinacija ovih svojstava značajno varira između različitih serija legura i ovisi o nekoliko faktora, uključujući način proizvodnje i sadržaj legirnih elemenata. Kombinacija mehaničkih svojstava, korozijske postojanosti i deformabilnosti može biti prilagođena za određenu primjenu ili zahtjeve dizajna. Različite serije legura, kao i promjene u njihovom sastavu i postupcima obrade, omogućuju inženjerima prilagođavanje materijala specifičnim potrebama u raznim industrijama i aplikacijama.

Pojedini legirni elementi imaju specifičan utjecaj na svojstva aluminijskih legura. Evo pregleda utjecaja nekih od tih legirnih elemenata na svojstva aluminijskih legura, prema navedenim izvorima [1, 9]:

- Magnezij (Mg): Povećava čvrstoću aluminijskih legura putem mehanizma hladne deformacije i stvaranja kristala mješanaca. Također, usitnjava zrno legure.
- Mangan (Mn): Povećava čvrstoću aluminijskih legura putem mehanizma hladne deformacije i stvaranja kristala mješanaca.
- Bakar (Cu): Smanjuje otpornost na koroziju, duktilnost i zavarljivost aluminijskih legura, ali povećava čvrstoću i rezljivost. Također, omogućuje precipitacijsko očvršćivanje legure.
- Silicij (Si): Značajno poboljšava livljivost, čvrstoću i duktilnost aluminijskih legura. U kombinaciji s magnezijem, omogućuje precipitacijsko očvršćivanje legure.
- Cink (Zn): Može uzrokovati napetosnu koroziju, ali istovremeno poboljšava čvrstoću aluminijskih legura i omogućuje precipitacijsko očvršćivanje.
- Željezo (Fe): Povećava čvrstoću tehničkog aluminija.
- Krom (Cr): Povećava otpornost aluminijskih legura na napetosnu koroziju.
- Nikal (Ni): Poboljšava čvrstoću aluminijskih legura pri povišenim temperaturama.
- Titanij (Ti): Umanjuje veličinu zrna u aluminijskim legurama.
- Cirkonij (Zr): Koristi se za smanjenje veličine zrna u aluminijskim legurama
- Litij (Li): Značajno povećava čvrstoću aluminijskih legura, smanjuje gustoću legure i omogućuje precipitacijsko očvršćivanje.
- Skandij (Sc): Koristi se za smanjenje veličine zrna u aluminijskim legurama te povećanje čvrstoće putem dozrijevanja.
- Olovo (Pb) i bizmut (Bi): Poboljšavaju obradljivost aluminijskih legura kroz stvaranje odvojenih čestica.

Važno je napomenuti da su ovi utjecaji općeniti, a konkretni rezultati mogu varirati ovisno o konkretnoj leguri, udjelu legirnih elemenata, postupcima proizvodnje i drugim čimbenicima.

3.4. Podjela prema mogućnosti toplinske obrade

Aluminijske legure se mogu podijeliti na dvije osnovne kategorije ovisno o njihovoj sposobnosti za toplinsku obradu: toplinski obradive i toplinski neobradive legure. Konkretna svojstva legura ovise o njihovom specifičnom kemijskom sastavu, postupcima toplinske obrade i drugim faktorima. Stoga se detaljnija analiza svojstava i primjena pojedinih legura provodi na temelju specifičnih informacija o leguri. Mehanička svojstva prikazana su u tablici 11 i 12 [1].

Tablica 11. Podjela i mehanička svojstva toplinski neobradivih aluminijskih legura [8]

| Serija EN 573 | Tip | Oznaka | R_e , N/mm ² | R_m , N/mm ² |
|------------------|-------|---|------------------------------|------------------------------|
| 1000 | Al | 1050 A 1070 A 1100 1200 1080 | 20-140 | 50-180 |
| 3000 | Al-Mn | 3003 3004 3005 3105 | 50-220 | 120-300 |
| 5000 | Al-Mg | 5086 5083 5056 A 5456 5052 5005 5053 5754 5254 5182 | 30-320 | 110-380 |

Kod legura koje se ne mogu očvrnuti toplinskom obradom, željena mehanička svojstva se postižu dodavanjem određenih legirnih elemenata. Magnezij (Mg), mangan (Mn), silicij (Si) i željezo (Fe) su često korišteni legirni elementi u takvim legurama. Ovi elementi mogu poboljšati čvrstoću, tvrdoću, deformabilnost i druge mehaničke karakteristike legura [9].

Tablica 12.Podjela i mehanička svojstva toplinski obradivih aluminijskih legura [8]

| Serijski broj EN 573 | Tip | Oznaka | R_e , N/mm ² | R_m , N/mm ² |
|----------------------|-------------------|--|------------------------------|------------------------------|
| 2000 | Al-Cu Al-Cu-Mg | 2011 2017 A 2024 2219 2030 2618 | 250- 500 | 360- 530 |
| 6000 | Al-Si-Mg | 6005 6061 6082 6081 6106 6351 6060 | 140- 360 | 180- 380 |
| 7000 | Al-Zn-Mg | 7020 7021 7039 | 230- 430 | 360- 500 |
| | Al-Zn-Mg-Cu | 7049 A 7175 7075 7130 7475 7010 7050 | 350- 720 | 440- 760 |

Toplinski obradive aluminijske legure, koje sadrže bakar (Cu), magnezij (Mg), cink (Zn) i silicij (Si) kao osnovne legirne elemente, mogu očvrnuti putem postupka nazvanog precipitacijsko očvršćivanje. Ovaj postupak se koristi za postizanje željenih mehaničkih svojstava legura, uključujući povećanje čvrstoće i tvrdoće.

Precipitacijsko očvršćivanje uključuje žarenje legure na određenim temperaturama između 450 i 550 °C, a zatim brzo hlađenje. Nakon toga slijedi prirodno ili umjetno dozrijevanje na sobnoj temperaturi ili povišenim temperaturama. Tijekom ovog procesa, legirni elementi formiraju čvrste čestice u matrici aluminija, što rezultira povećanjem čvrstoće i tvrdoće legure.

Precipitacijsko očvršćivanje se smatra efikasnijim postupkom za povećanje mehaničkih svojstava aluminijskih legura za gnječenje u usporedbi s plastičnom deformacijom. Ovaj postupak omogućuje postizanje boljih vrijednosti čvrstoće i tvrdoće, što je važno za primjenu ovih legura u konstrukcijama i drugim područjima gdje je potrebna visoka čvrstoća materijala.

Važno je napomenuti da precizni parametri toplinske obrade, uključujući temperature žarenja i dozrijevanja, ovise o konkretnoj leguri i željenim svojstvima. Stoga je važno provesti detaljnu analizu i optimizaciju procesa toplinske obrade za određenu leguru kako bi se postigla željena mehanička svojstva [10].

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Uvod

Cilj rada je bio ispitati mehanička svojstva AlMgSi1 legure i AlCuMgPb legure. Ispitivala se vlačna čvrstoća na kidalici i tvrdoća na tvrdomjeru.

Iz legure AlMgSi1 i AlCuMgPb su napravljene epruvete kako bi se mogla napraviti ispitivanja.

Ispitivanja su provedena u laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu.

4.2. Materijal i oprema

Za eksperimentalni dio koriste se dvije aluminijske legure. Obje legure su korištene u svrhu konstrukcija kao i u brodogradnji i automobilskoj industriji. Izabrane su ove dvije legure jer se razlikuju u mehaničkim svojstvima i pokazuje prednosti i nedostatke aluminijskih legura. Dvije aluminijske legure su:

- a) AlMgSi1 (aluminij – magnezij – silicij) – oznaka 6082,
- b) AlCuMgPb (aluminij – bakar – magnezij – olovo) – oznaka 2007.

4.2.1. AlMgSi1 (aluminij –magnezij – silicij) legura

Aluminij-magnezij legure predstavljaju novu vrstu legura koje kombiniraju izvrsna ljevačka svojstva s visokom otpornošću na koroziju i niskom toplinskom rastezljivošću nakon toplinske obrade. Dodatak magnezija u tim legurama omogućuje postizanje precipitacijskog očvršćenja, pri čemu se dodaje oko 0,2% do 0,5% magnezija [11].

Ove legure karakterizira uski temperaturni interval skrućivanja od samo 30 °C i mali linearni skup od 1%. Ako se lijevaju u pijesak, zahtijevaju dodatno cijepanje ili modifikaciju, ali rezultirajući odljevci mogu se zavarivati. Važno je napomenuti da se tlačni odljevci ne smiju zavarivati zbog većeg sadržaja plinova. Ovi materijali su pogodni za uporabu na radnim temperaturama do 200 °C [1].

Dodavanje berilija malim udjelom dodatno povećava čvrstoću i žilavost legura Al-Si-Mg. Ove legure se često nazivaju "antikorodali" zbog njihove izvrsne otpornosti na koroziju. Mogu se podvrgnuti toplinskoj obradi precipitacijskim očvršćivanjem, a karakteriziraju se visokim omjerom čvrstoće i električne vodljivosti u stanju precipitacijskog očvršćenja i hladne deformacije. Zbog tih svojstava, ove legure se široko koriste u prijenosu električne energije [1].

Ove legure su otporne na koroziju, prikladne za poliranje, zavarivanje i anodizaciju. Umjetnim dozrijevanjem, konvencionalna granica razvlačenja doseže vrijednosti od oko 240 N/mm², dok se prirodnim dozrijevanjem postiže nešto niža granica razvlačenja od oko 110 N/mm². Vlačna čvrstoća ovih legura obično je manja od 330 N/mm² [1].

4.2.2. AlCuMgPb (aluminij – bakar – magnezij – olovo)

Ova aluminijska legura sadrži između 3,3 – 4,6% bakra. Vrlo je pogodna za visoke brzine obrade i idealni za narezivanje navoja. Osim bakra, sadrži i magnezij te olovo. Ovaj materijal se obično koristi za proizvodnju dijelova strojeva, vijaka i matica. Međutim, njegov sadržaj bakra daje nisku zavarljivost i nisku otpornost na koroziju.

Ova legura se još koristi u industriji gdje se radi obrada odvajanjem čestica.

4.2.3. Mjerna oprema

Za pravilna mjerenja mehaničkih svojstava trebalo je izraditi epruvete po standardnim dimenzijama. Svaka kidalica ima svoje dimenzije i dimenzije epruveta koje odgovaraju za ispitivanje vlačne i tlačne čvrstoće.

Iz materijala kojeg ispituujemo, izrađuju se probni uzorci (epruvete), dimenzija u skladu sa standardom. Epruvete se ispituju do loma, podaci (rezultati) se izračunavaju i unose. Iz ovih podataka, crta se dijagram naprezanje / istežanje.

Standard za ispitivanje vlačne čvrstoće metalnih materijala je HRN EN ISO 6892-1. Standard za ispitivanje tvrdoće pomoću Brinell metode metalnih materijala je HRN EN ISO 6506-1.

Na slici 5. prikazana je kidalica u laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu.



Slika 5. Kidalica u laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu

Na slici 6. prikazan je tvrdomjer u laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu.



Slika 6. Tvrdomjer Brinell/Vickers u laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu

4.2.4. Ispitivanje mehaničkih svojstva na kidalici

Mehanička ispitivanja na kidalici provedena su u laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu.

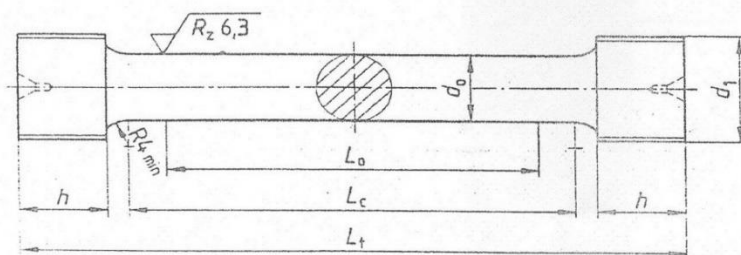
4.2.4.1. Izrada epruveta

Da bi se proveo statički vlačni pokus na kidalici, potrebne su epruvete koje će biti podvrgnute ispitivanju. Te epruvete obično se izrađuju strojnom obradom kako bi se postigla točna geometrija i dimenzije prema standardnim specifikacijama. Od AlMgSi1 legure izrađeno je pet epruveta i od AlCuMgPb legure pet epruveta.

Ispitivanje metalnih materijala – vlačne probe – DIN 50 125

1 – Vlačna proba – oblik B

Okrugle epruvete s navojnim glavama



- d_0 - Promjer epruvete, mm
- d_1 - Metrički navoj - ISO
- h - Visina glave epruvete, mm
- L_0 - Početna mjerna duljina epruvete ($L_0 = 5 d_0$), mm
- L_c - Ispitna duljina epruvete ($L_c \geq L_0 + d_0$), mm
- L_t - Ukupna duljina epruvete, mm

Označivanje vlačne epruvete oblik B s promjerom epruvete $d_0 = 14$ mm i početnom mjernom duljinom epruvete $L_0 = 70$ mm:

VLAČNA EPRUVETA DIN 50 125 – B 14 x 70

Slika 7. Dimenzije epruveta za ispitivanje vlačne čvrstoće [13]

Tablica 13. Dimenzije epruvete

| d_0 | L_0 | d_1 | h min. | L_c min. | L_t min. |
|-------|-------|-------|--------|------------|------------|
| 8 | 40 | M12 | 10 | 48 | 75 |

4.2.4.2. Ispitivanje na kidalici

Na kidalici u laboratoriju za ispitivanje materijala Veleučilišta u Karlovcu ispitivana je vlačna čvrstoća.

Za utvrđivanje vlačne čvrstoće i istežljivosti provedeno je statičko vlačno ispitivanje na:

- pet epruveta AlMgSi1 legure,
- pet epruveta AlCuMgPb legure.

Položaj epruvete na kidalici prikazan je slikom 8.



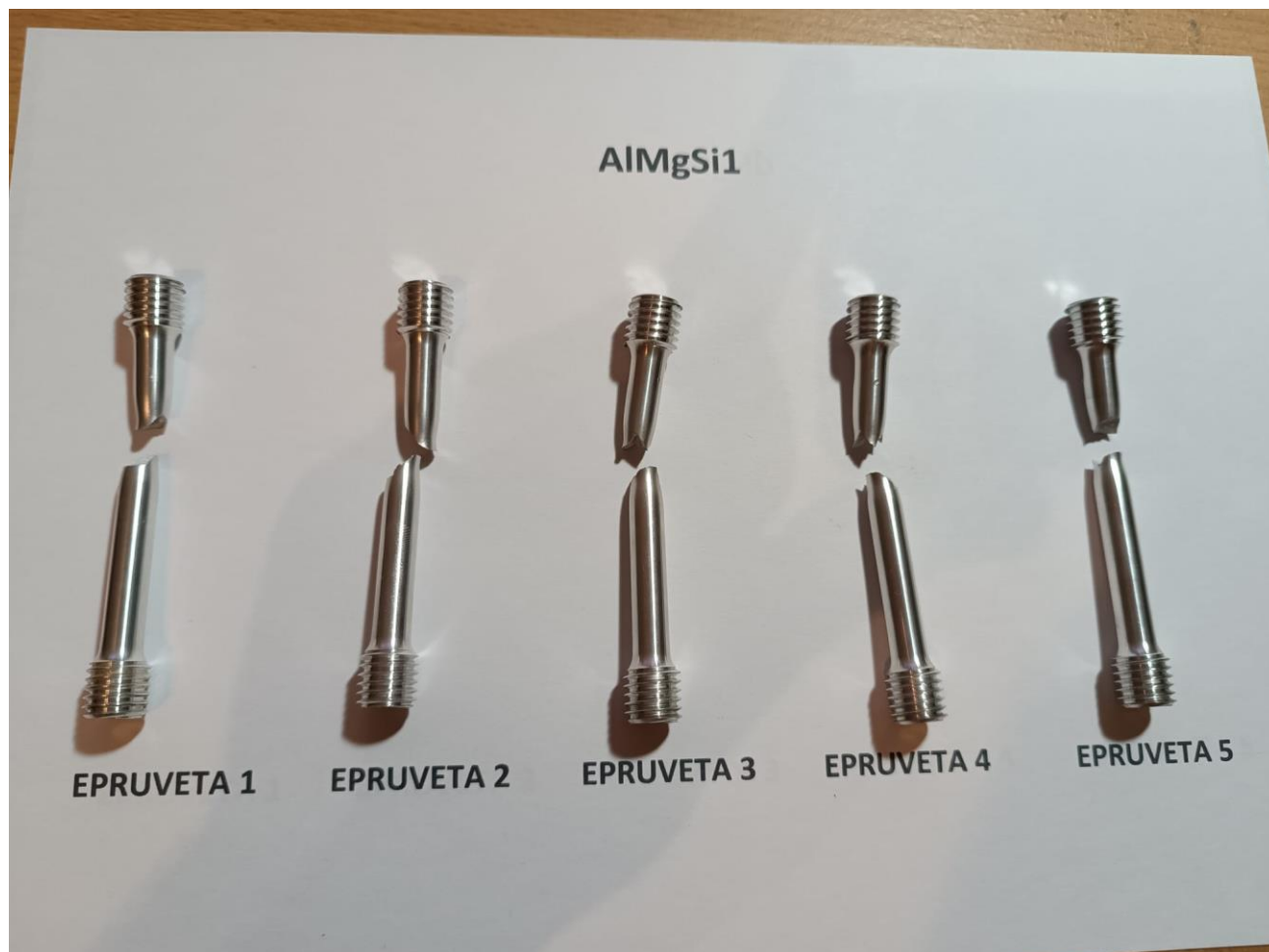
Slika 8. Položaj epruvete u kidalici prije ispitivanja

Položaj puknuća epruvete u kidalici prikazan je slikom 9.



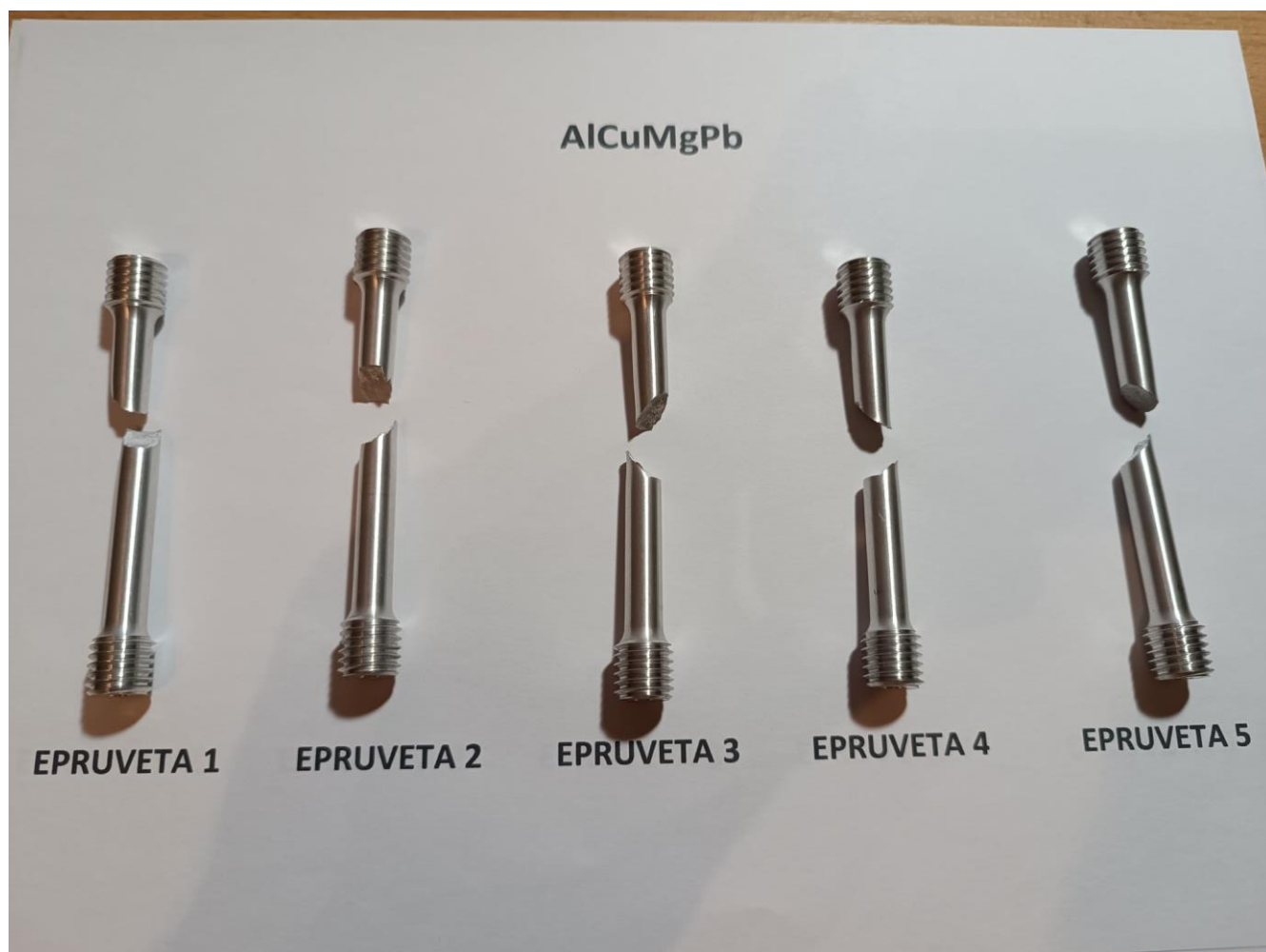
Slika 9. Položaj puknuća epruvete u kidalici

Epruvete AlMgSi1 legure nakon ispitivanja na kidalici prikazane su na slici 10.



Slika 10. Epruvete legure AlMgSi1 nakon ispitivanja

Epruvete AlCuMgPb legure nakon ispitivanja na kidalici prikazane su na slici 11.



Slika 11. Epruvete legure AlCuMgPb nakon ispitivanja

4.2.5. Ispitivanje tvrdoće po Brinellu

Ispitivanja tvrdoće provedena su na tvrdomjeru Brinell/Vickers, nazivne sile 306 N. Trajanje opterećivanja penetratora iznosi od 20 sekundi. Promjer penetratora (kuglice [mm]) iznosi 2.5 mm.

Za utvrđivanje tvrdoće provedeno je ispitivanje po Brinell postupku na:

- jednom uzorku AlMgSi1 legure
- jednom uzorku AlCuMgPb legure

Na svakom ispitanom uzorku ima tri otiska od penetratora.

Pozicija uzorka na tvrdomjeru prikazana je slikom 12.



Slika 12. Pozicija uzorka na tvrdomjeru

Označeni uzorak AlMgSi1 legure nakon ispitivanja na tvrdomjeru prikazan je na slici 13.



Slika 13. Označeni uzorak AlMgSi1 legure nakon ispitivanja na tvrdomjeru

Označeni uzorak AlCuMgPb legure nakon ispitivanja na tvrdomjeru prikazan je na slici 14.



Slika 14. Označeni uzorak AlCuMgPb legure nakon ispitivanja na tvrdomjeru

4.3. Rezultati ispitivanih mehaničkih svojstva

Provedbom statičnog vlačnog pokusa na ispitnim epruvetama dobiveni su rezultati koji su prikazani u tablicama 14. i 15. . Formulama i proračunima su se dobili rezultati ispitivanja.

$$d_0 = 8mm$$

$$l_0 = 40mm$$

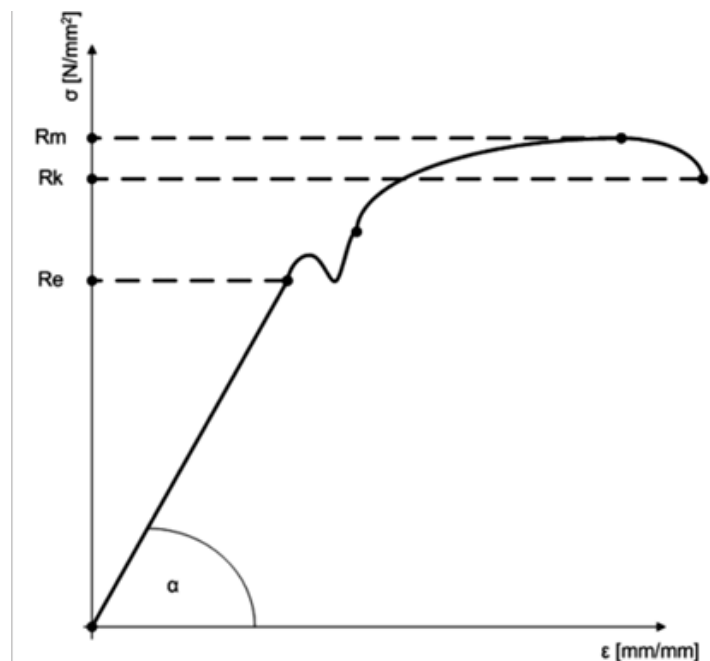
$$s_0 = \frac{d_0^2 \times \pi}{4} \quad (1)$$

$$R_e = \frac{F_e}{s_0} ; R_m = \frac{F_m}{s_0} \quad (2)$$

$$A = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 [\%] \quad (3)$$

$$Z = \frac{s_0 - s_u}{s_0} \times 100 \quad (4)$$

Formulama se izračuna granica razvlačenja, maksimalna vlačna čvrstoću, istežljivost i suženje poprečnog presjeka.



Slika 15. Dijagram "naprezanje - deformacija" [12]

Na slici 15. prikazan je dijagram gdje je na apscisi prikazana deformacija, tj. istežanje ϵ [%], a na ordinati naprežanje σ [N/mm²]. Na dijagramu vidljive su točke razvlačenja – elastičnosti (R_e), granica loma – kidanja (R_k) i vlačna čvrstoća (R_m). [12]

U tablici 14. prikazani su rezultati ispitivanja na kidalici za leguru AlMgSi1.

| Naziv legure | Epruveta | Granica razvlačenja R_e (N/mm ²) | Vlačna čvrstoća R_m (N/mm ²) | Istezljivost A (%) | Suženje poprečnog presjeka (%) | Aritmetička sredina (Odstupanje rezultata) (R_e) | Aritmetička sredina (Odstupanje rezultata) (R_m) |
|--------------|----------|--|--|--------------------|--------------------------------|--|--|
| AlMgSi1 | 1 | 158 | 394 | 18.6% | 42.43% | 244,6 (56,29209) | 394,2 (0,447213) |
| | 2 | 276 | 394 | 17.9% | 39.1% | | |
| | 3 | 217 | 394 | 18.5% | 39.7% | | |
| | 4 | 286 | 394 | 19% | 41.8% | | |
| | 5 | 286 | 395 | 17.8% | 42.2% | | |

Tablica 14. Rezultati ispitivanja na kidalici za leguru AlMgSi1

U tablici 15. prikazani su rezultati ispitivanja na kidalici za leguru AlCuMgPb.

Tablica 15. Rezultati ispitivanja na kidalici za leguru AlCuMgPb

| Naziv legure | Epruveta | Granica razvlačenja R_e (N/mm ²) | Vlačna čvrstoća R_m (N/mm ²) | Istezljivost A (%) | Suženje poprečnog presjeka (%) | Aritmetička sredina (Odstupanje rezultata) (R_e) | Aritmetička sredina (Odstupanje rezultata) (R_m) |
|--------------|----------|--|--|--------------------|--------------------------------|--|--|
| AlCuMgPb | 1 | 276 | 453 | 15.4% | 18.4% | 274,2 (22,38749) | 453.8 (0,447213) |
| | 2 | 237 | 454 | 14.95% | 21.1% | | |
| | 3 | 276 | 454 | 16.5% | 20.7% | | |
| | 4 | 296 | 454 | 14.7% | 21.8% | | |
| | 5 | 286 | 454 | 15.5% | 22.4% | | |

U tablici 16. prikazani su rezultati ispitivanja na tvrdomjeru za leguru AlMgSi1 i AlCuMgPb.

Tablica 16. Rezultati ispitivanja na tvrdomjeru za leguru AlMgSi1 i AlCuMgPb

| Legura | Otisak na uzorku | Tvrdoća (HB) | Srednja vrijednost tvrdoće | Odstupanje rezultata (standarna devijacija) |
|----------|------------------|--------------|----------------------------|---|
| AlMgSi1 | 1 | 76.3 | 70.3 | 5.2735 |
| | 2 | 68.2 | | |
| | 3 | 66.4 | | |
| AlCuMgPb | 1 | 127.7 | 117.6 | 11.3165 |
| | 2 | 119.9 | | |
| | 3 | 105.4 | | |

4.4. Analiza rezultata

Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja vlačne čvrstoće, istezljivosti i tvrdoće, mogu se analizirati usporedbe između legura AlMgSi1 i AlCuMgPb:

Vlačna čvrstoća: rezultati prikazuju da AlCuMgPb legura ima veću vlačnu čvrstoću od AlMgSi1 legure radi određenih legiranih elemenata koje pojedina legura sadrži.

Istezljivost: AlMgSi1 legura ima veću istezljivost od AlCuMgPb legure za 2.95%. To ukazuje na veću sposobnost AlMgSi1 legure da se deformira pri istezanju prije nego što dosegne granicu loma.

Ovi rezultati upućuju na to da AlMgSi1 legura ima nešto nižu vlačnu čvrstoću, veću istezljivost i manju tvrdoću. AlCuMgPb legura se razlikuje od AlMgSi1 legure zbog određenih elemenata u toj leguri. Ovisno o specifičnim zahtjevima primjene, može se odabrati legura koja najbolje odgovara potrebama u smislu mehaničkih svojstava.

U tablici 14. vidljivo je da u epruveti 1, granica razvlačenja iznosi 158 N/mm^2 radi vjerojatne greške u materijalu.

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstva legura zadovoljavaju tražene vrijednosti za te materijale.

5. ZAKLJUČAK

Aluminij je postao široko prihvaćen u industriji zbog svojih iznimnih svojstava kao što su niska gustoća, visoka korozijska postojanost, dobra toplinska vodljivost, visoka električna vodljivost, nizak modul elastičnosti i estetski privlačan izgled nakon obrade površine. Međutim, njegova niska čvrstoća ograničava njegovu primjenu u inženjerskim područjima. Kako bi se poboljšala čvrstoća, aluminij se često legira s drugim elementima.

Postoji velik broj aluminijskih legura, s raznim kombinacijama legirnih elemenata. Neki od glavnih legirnih elemenata u aluminijskim legurama su bakar, magnezij, cink i silicij. Legure aluminija mogu biti toplinski očvrstive ili toplinski neočvrstive. Toplinski očvrstive legure se koriste u precipitacijskom očvršćivanju, što omogućuje postizanje boljih mehaničkih svojstava u usporedbi s plastičnom deformacijom.

Također se ističe da aluminijska legura može biti očvrstnuta i hladnom deformacijom, a ne samo toplinskom obradom. Aluminijska legura za gnječenje, koja ima plošno centriranu kubičnu (FCC) kristalnu strukturu, posebno je pogodna za očvršćivanje plastičnim oblikovanjem u hladnom stanju.

Usporedba mehaničkih svojstava različitih legura, kao što su AlMgSi1 i AlCuMgPb, pruža korisne informacije o njihovim karakteristikama. Cijena proizvodnje aluminija i aluminijskih legura može biti izazov, ali njihova primjena i dalje ima opravdanje zbog njihovih iznimnih svojstava i prednosti.

Ukratko, aluminij i aluminijske legure nude širok spektar prednosti u industriji zahvaljujući svojim jedinstvenim svojstvima. Legiranje, toplinsko očvršćivanje i hladna deformacija koriste se kao mehanizmi za poboljšanje čvrstoće i drugih mehaničkih svojstava aluminija. Iako postoji izazov cijene, upotreba aluminijskih legura ima opravdanje zbog njihovih izvanrednih karakteristika.

Zaključno se može reći da se na temelju analize dobivenih rezultata AlMgSi1 legura ima manju vlačnu čvrstoću od AlCuMgPb legure. Putem Brinell metode utvrđeno je da AlCuMgPb legura ima veću tvrdoću od AlMgSi1 legure. Istezljivost AlMgSi1 legure je puno veća AlCuMgPb legure. Određene se legure koriste ovisno o tome koja su mehanička svojstva pogodna za određeni proizvod i za što se taj proizvod koristi odnosno koja mu je namjena.

LITERATURA

[1] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2002.

[2] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf,

[3] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863>,

[4] <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/spojevi.html>,

[5] <https://www.imetllc.com/training-article/mechanisms-strengthening-aluminum/>,

[6] <https://www.hydro.com/en/about-aluminium/how-its-made/>,

[7] Ćorić D., Filetin T.: Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2012.

[8] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak 2003.

[9] Sinanović A., "Primjena keramičkih podloga kod MIG zavarivanja aluminija", Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[10] Kaufman, J.G.: Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications, ASM International, 2004.

[11] Callister W. D., Jr., Rethwisch D. G.: Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach, 3e, Third edition, John Wiley & sons, inc., United States, 2007.

[12] Kostadin, T.: Čelici i željezni ljevovi, Materijali II, Veleučilište u Karlovcu, 2017.

[13] Interna dokumentacija Veleučilišta u Karlovcu