Aluminijeve legure za rad na povišenim temperaturama

Zadelj, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2012

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:139183

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-24**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Doc.dr.sc. Branko Bauer

Student:
Ivan Zadelj

Zagreb, 2012.

IZJAVA

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

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Branku Baueru na savjetima, uputstvima i komentarima pri izradi ovog rada. Zahvaljujem se i djelatnicima Katedre i Laboratorija za ljevarstvo, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na stručnoj pomoći i suradnji.

Ivan Zadelj

SADRŽAJ

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA VI

SAŽETAK VII

1. UVOD 1

2. OPĆENITO O LJEVARSTVU 2

2.1. Postupci lijevanja 3

2.2. Metalne legure za lijevanje 4

2.3. Kalup 4

2.4. Uljevni sustav 5

2.5. Greške na odljevcima 6

2.6. Lijevanje u pješčane kalupe 7

2.7. Proizvodni proces u ljevaonici 8

3. ALUMINIJ 10

3.1. Dobivanje aluminija 11

3.2. Primjena aluminija 12

3.3. Tehnički aluminij 13

4. ALUMINIJSKE LEGURE 16

4.1. Dijagrami stanja aluminijskih legura 17

4.1.1. Dijagram stanja aluminij-magnezij (Al-Mg) 17

4.1.2. Dijagram stanja aluminij-bakar (Al-Cu) 18

4.1.3. Dijagram stanja aluminij-silicij (Al-Si) 19

4.2. Trokomponentni legirni sustavi 19

4.3. Precipitacijsko očvrsnuće aluminijskih legura (starenje materijala, dozrijevanje) 20

4.4. Lijevane aluminijske legure 21

4.4.1. Al-Mg legure 22

4.4.2. Al-Cu legure 23

4.4.3. Al-Si legure 23
4.5. Gnječene aluminijske legure 25
5. RAZVOJ AL-SI LEGURA ZA RAD NA POVIŠENIM TEMPERATURAMA 27
5.1. Podeutektičke Al-Si legure 27
5.2. Eutektičke Al-Si legure 28
5.3. Nadeutektičke Al-Si legure 29
5.4. Normirane Al-Si legure za rad pri povišenim temperaturama 31
6. EKSPERIMENTALNI DIO 33
6.1. Izrada odljevaka 33
6.1.1. Model odljevaka 33
6.1.2. Izrada kalupa 35
6.1.3. Lijevanje odljevaka 39
6.1.4. Vađenje odljevaka 45
6.2. Metalografska ispitivanja 46
6.2.1. Priprema uzoraka 46
6.2.2. Ispitivanje mikroskopom 52
6.3. Mehanička ispitivanja na kidalici 54
6.3.1. Izrada epruveta 54
6.3.2. Ispitivanja na kidalici 55
6.4. Radiografska ispitivanja 57
6.5. Kemijska analiza 57
7. REZULTATI I RASPRAVA 58
7.1. Rezultati kemijske analize 58
7.2. Rezultati metalografskih ispitivanja 60
7.3. Rezultati radiografskog ispitivanja 64
7.4. Rezultati mehaničkih ispitivanja 66
8. ZAKLJUČAK 68
LITERATURA 69

POPIS SLIKA

Slika 1. Lijevanje metala u kalup 1
Slika 2. Primjena odljevaka u autoindustriji 2
Slika 3. Podjela procesa lijevanja metala 3
Slika 4. Donjak jednokratnog kalupa i donjak stalnog kalupa 3
Slika 5. Podjela lijevova prema vrsti metala za lijevanje 4
Slika 6. Dijelovi jednokratnog kalupa 5
Slika 7. Osnovni dijelovi uljevnog sustava 5
Slika 8. Primjeri grešaka na odljevcima 7
Slika 9. Pješčani kalup 8
Slika 10. Proizvodni proces lijevanja u pješčani kalup u ljevaonici 9
Slika 11. Aluminij u elementarnom stanju 10
Slika 12. Boksit 11
Slika 13. Primjena aluminija za izradu cijevi i raznih profila 12
Slika 14. Aluminijska kubično plošno centrirana struktura (FCC) 14
Slika 15. Primjena aluminija za proizvodnju limenki 15
Slika 16. Dijagram stanja Al-Mg 17
Slika 17. Dijagram stanja Al-Cu 18
Slika 18. Dijagram stanja Al-Si 19
Slika 19. Prikaz općeg postupka precipitacijskog očvršćivanja 20
Slika 20. Zbivanja pri cijepljenju eutektičke legure Al-Si s 12 %Si 24
Slika 21. Fazni dijagram binarne Al-Si legure s podeutektičkom i nadeutektičkom mikrostrukturom 30
Slika 22. Model odljevka 34
Slika 23. Računalni model odljevka s pojilom i spustom 34
Slika 24. Nasipavanje modelnog pijeska 35
Slika 25. Nasipavanje već korištenog pijeska 36

Slika 26. Sabijanje kalupne mješavine donjaka 36
Slika 27. Postavljanje modela spusta i pojila 37
Slika 28. Sabijanje kalupne mješavine gornjaka 37
Slika 29. Donjak nakon oblikovanja spusta 38
Slika 30. Gornjak 38
Slika 31. Jednokratni pješčani kalup 39
Slika 32. Peć za taljenje 39
Slika 33. Blokovi AlSi12 legure 40
Slika 34. Taljevina AlSi12 legure u peći 40
Slika 35. Mjerenje temperature pirometrom 41
Slika 36. Mjerenje temperature taljevine neposredno prije ulijevanja u kalup 41
Slika 37. Ulijevanje taljevine u kalup 42
Slika 38. Umetanje lonca u elektrootpornu peć 43
Slika 39. Očitavanje temperature taljevine 43
Slika 40. Ulijevanje rastaljene AlCuMgSi legure u kalup 44
Slika 41. Kalup ispunjen taljevinom 44
Slika 42. Rastresavanje kalupa 45
Slika 43. Odljevak 45
Slika 44. Dijelovi izdvojeni za pojedino ispitivanje; 46
Slika 45. Uzorak za ispitivanje mikrostrukture (Φ20 x 10 mm) 47
Slika 46. Posude za zaštitu uzoraka 47
Slika 47. Stroj za brušenje ispitnih uzoraka 48
Slika 48. Brusni papir 49
Slika 49. Ultrazvučna čistilica 49
Slika 50. Uređaj za poliranje 50
Slika 51. Dijamantne paste 51
Slika 52. Sredstvo za hlađenje pri poliranju 51
Slika 53. Odjeljak s kemikalijama 52

Slika 54. Svjetlosni mikroskop 53

Slika 55. Prikaz mikrostrukture na računalu 53

Slika 56. Epruveta za vlačna ispitivanja na kidalici 54

Slika 57. Dimenzije epruvete za vlačna ispitivanja 54

Slika 58. Hidraulička kidalica 55

Slika 59. Pozicija epruvete na kidalici 56

Slika 60. Mjesto loma druge ispitne epruvete od AlSi12CuNiMg legure 56

Slika 61. Rezultati kemijske analize AlSi12 legure 58

Slika 62. Mikrostruktura AlSi12 legure (povećanje 200x) 60

Slika 63. Mikrostruktura AlSi12 legure (povećanje 500x) 61

Slika 64. Mikrostruktura AlSi12CuNiMg legure (povećanje 200 x) – prvo mjesto snimanja 62

Slika 65. Mikrostruktura AlSi12CuNiMg legure (povećanje 500 x) – prvo mjesto snimanja 62

Slika 66. Mikrostruktura AlSi12CuNiMg legure (povećanje 200 x) – drugo mjesto snimanja 63

Slika 67. Mikrostruktura AlSi12CuNiMg legure (povećanje 500 x) – drugo mjesto snimanja 63

Slika 68. Radiogram epruveta od AlSi12 legure 64

Slika 69. Radiogram epruveta od AlSi12CuNiMg legure 65

Slika 70. Grafički prikaz srednjih vrijednosti vlačnih čvrstoća ispitivanih legura 66

Slika 71. Grafički prikaz srednjih vrijednosti istezljivosti ispitivanih legura 67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija 14

Tablica 2. Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura..... 22

Tablica 3. Udjeli legirnih elemenata u Al-Si legurama..... 25

Tablica 4. Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura..... 25

Tablica 5. Al-Si Legure za rad pri povišenim temperaturama i njihova namjena 32

Tablica 6. Rezultati kemijske analize AlSi12CuNiMg legure 59

Tablica 7. Maseni udjeli pojedinih elemenata u AlSi12CuNiMg leguri prema normi EN1706... 59

Tablica 8. Vlačne čvrstoće i istezljivosti AlSi12 i AlSiCuMg legura..... 66

SAŽETAK

Ovaj rad sastoji se od dva dijela: teoretskog i eksperimentalnog.

U teoretskom dijelu ovog rada objašnjen je postupak lijevanja, ponašanje aluminijskih legura pri povišenim temperaturama te njihove promjene u mikrostrukturi i svojstva.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada provedena su metalografska ispitivanja na optičkom mikroskopu, radiografska analiza te mehanička ispitivanja nad odljevcima od AlSi12 legure i AlSi12CuNiMg legure.

Na temelju rezultata može se zaključiti da se dodatkom bakra, nikla i magnezija povećava vlačna čvrstoća legure te znatno smanjuje istezljivost.

1. UVOD

Proizvodnja metalnih odljevaka jedan je od najstarijih i najučinkovitijih postupaka oblikovanja proizvoda. Najstariji pronađeni odljevci potječu iz perioda oko 4500 godina prije nove ere. [1]

Lijevanje je jedna od tehnologija oblikovanja predmeta od metala kojom se taljevina oblikuje ulijevanjem u kalupe, što je prikazano na slici 1. [2] Metal poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine te ga zadržava nakon skrućivanja. Postupak lijevanja je vrlo pogodan za serijsku i masovnu proizvodnju zbog visoke produktivnosti i lake mogućnosti izrade replika. Također je pogodan i za automatizaciju u proizvodnji. Lijevanje je ponekad i jedina tehnologija kojom se mogu izraditi vrlo složeni predmeti sa šupljinama, npr. blokovi motora ili velika masivna kućišta. Oblikovanje se odvija u tekućem stanju, a za ulijevanje se najčešće koristi sila gravitacije. Taljevina na kalup djeluje mehanički, kemijski i toplinski. Utrošak energije je dosta velik pa se lijevanje najviše isplati za izradu složenijih oblika. Obzirom da skrućivanje traje vrlo kratko, lijevanje je visokoproduktivan postupak. [1]

Slika 1. Lijevanje metala u kalup [3]

Postupkom lijevanja nastoji se postići što veću kvalitetu proizvoda uz što niže proizvodne troškove. No, lijevanje metala je vrlo kompleksan postupak pa je moguće javljanje nepoželjnih rezultata. Samo neke od varijabli koje utječu na kvalitetu i svojstva odljevka su: kvaliteta uloženih materijala, proces taljenja i obrade taljevine, metalurško stanje i čistoća taljevine, temperatura i brzina lijevanja, uljevni sustav, kao i mnogi drugi utjecaji. [1]

2. OPĆENITO O LJEVARSTVU

Prednosti postupka lijevanja [2] :

- moguće lijevanje složenih geometrija vanjskog i unutarnjeg dijela
- moguće dobiti dimenzijski točan ili približno točan oblik
- moguće proizvesti vrlo velike odljevke
- lijevati se može bilo koji metal
- moguća masovna proizvodnja
- velik raspon dimenzija odljevaka – od 1g do 250 tona.

Nedostaci postupka lijevanja [2] :

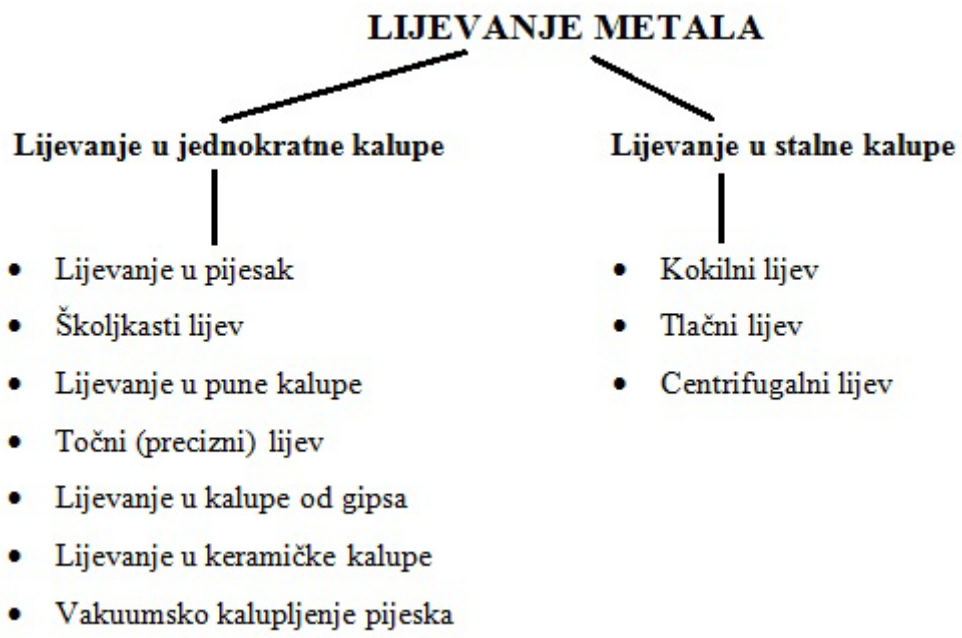
- ograničenost mehaničkih svojstava, poroznost
- problem je postići dimenzijsku točnost i određenu kvalitetu površine
- opasan postupak proizvodnje
- loš ekološki utjecaj

Odljevci se najčešće primjenjuju u automobilskoj industriji te su neki od njih prikazani na slici 2. Također se primjenjuju u strojogradnji, građevini, medicini, brodogradnji, energetici, zrakoplovnoj industriji te u raznim drugim područjima. Većina tehničkih sklopova je nezamisliva bez odljevaka. [2]

Slika 2. Primjena odljevaka u autoindustriji [4]

2.1. Postupci lijevanja

Podjela procesa lijevanja metala prikazana je na slici 3.



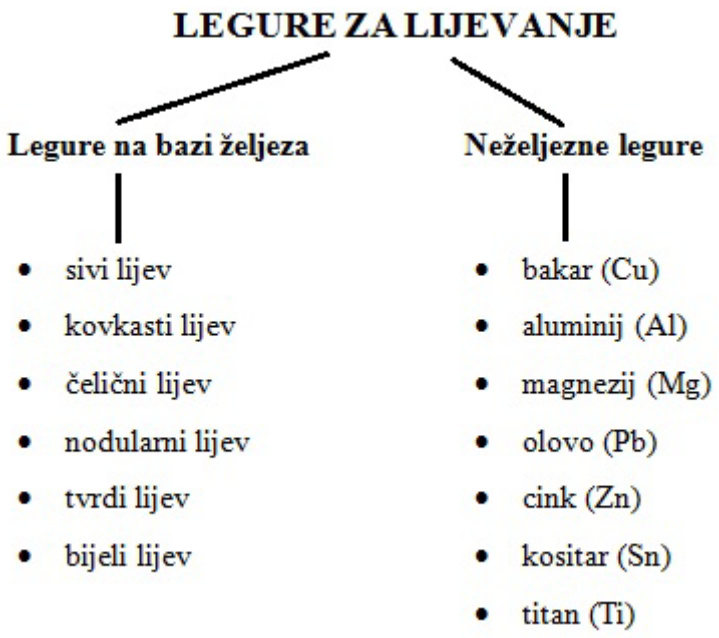
Slika 3. Podjela procesa lijevanja metala [2]

Nakon lijevanja u jednokratne kalupe, kalup je potrebno uništiti kako bi se izvadio odljevak. Materijali za izradu jednokratnih kalupa su pijesak i slični materijali kojima se dodaju veziva i dodaci. Stalni kalupi (kokile) najčešće se izrađuju od metala ili rijeđe od grafita. Koriste se više puta i isplativiji su u velikoserijskoj proizvodnji. Za manje serije isplativiji su jednokratni kalupi. [2] Na slici 4 prikazan je donjak jednokratnog i donjak stalnog kalupa.

Slika 4. Donjak jednokratnog kalupa (lijevo) i donjak stalnog kalupa (desno) [5,6]

2.2. Metalne legure za lijevanje

Metalne legure za lijevanje prikazane su na slici 5.

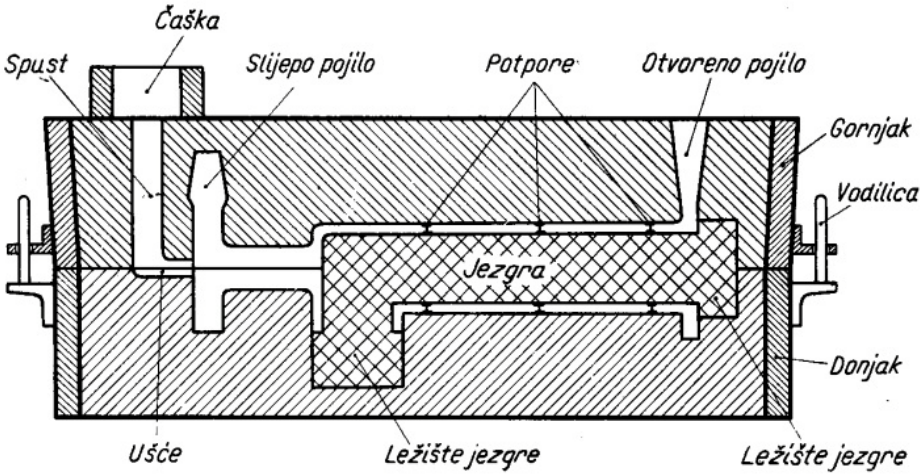


Slika 5. Podjela lijevova prema vrsti metala za lijevanje [7]

2.3. Kalup

Kalup služi za određivanje oblika odljevka. Vanjski oblik odljevka određuju stijenke kalupa, dok im unutarnji oblik (ukoliko se zahtjevaju šupljine) određuju umetci koji se nazivaju jezgre. U pravilu se kalupi sastoje iz dva dijela; kako bi se što lakše izvadio model iz kalupa nakon kalupljenja (jednokratni kalupi), ili radi lakšeg vađenja odljevka (stalni kalupi). Kod horizontalno dijeljenih kalupa (horizontalna diobena ravnina) gornji kalup naziva se gornjak, a donji donjak. Kod vertikalno dijeljenih (vertikalna diobena ravnina) jedan se dio naziva tlačni dio kalupa, a drugi protutlačni. [8]

Dijelovi jednokratnog kalupa prikazani su na slici 6.

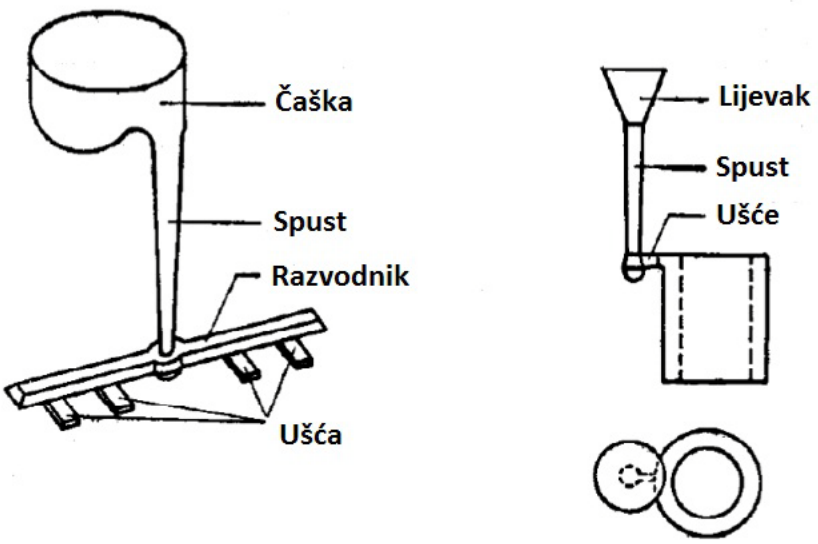


Slika 6. Dijelovi jednokratnog kalupa [9]

2.4. Uljevni sustav

Osim izrade i pripreme kalupa, tehnologija izrade odljevaka obuhvaća i operaciju ulijevanja u kalupe, od kojeg trenutka započinje proces formiranja odljevaka. Pri ulijevanju taljevine u kalup vrlo je važno odabrati pravilnu temperaturu ulijevanja, tehniku te brzinu ulijevanja. [10]

Uljevni sustav je mreža kanala kojima se taljevina dovodi do kalupne šupljine. Potrebno je ispuniti kalupnu šupljinu u što kraćem vremenu, sa što manjim pregrijanjem, što mirnijim strujanjem i uz što manji utrošak materijala. [8] Osnovni dijelovi uljevnog sustava prikazani su na slici 7.



Slika 7. Osnovni dijelovi uljevnog sustava [9]

Pravilno konstruiran uljevni sustav mora zadovoljiti sljedeće kriterije [8] :

- brzo popunjavanje kalupne šupljine,
- minimalizacija turbulencija,
- izbjegavanje erozije kalupa i jezgara,
- uklanjanje metalnih oksida, troske i uključaka prije ulaza u kalupnu šupljinu,
- mogućnost uklanjanja plinova iz kalupne šupljine,
- izbjegavanje deformacije (distorzije) odljevaka,
- stvaranje pogodnih toplinskih gradijenata,
- korištenje minimalne količine metala,
- ekonomičnost uklanjanja uljevnog sustava,
- kompatibilnost s postojećim načinom kalupljenja i lijevanja.

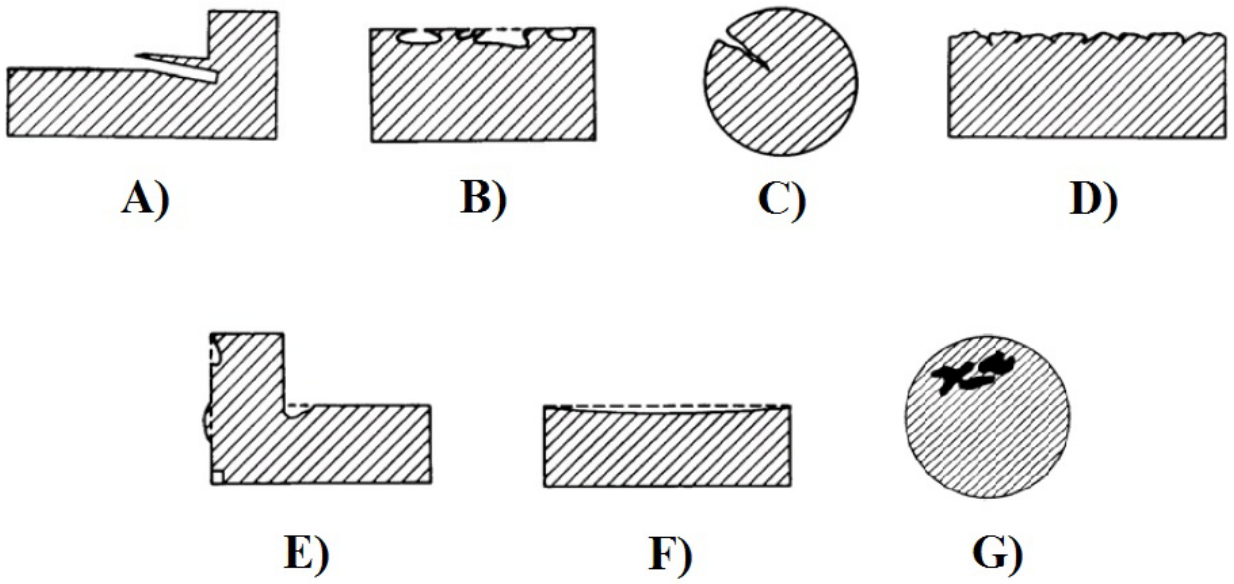
2.5. Greške na odljevcima

Ispravnost odljevka u velikoj mjeri utječe na njegovu funkcionalnost. Zato je vrlo bitno da odljevci ne sadrže greške koje mogu dovesti do prijevremenog oštećenja ili loših mehaničkih svojstava odljevka, kao i loma alata tijekom strojne obrade. [8]

Postoje i greške koje ne utječu na funkcionalnost proizvoda, ali mogu poskupiti daljnje faze obrade (npr. strojna obrada). Većinu takvih grešaka moguće je ukloniti sačmarenjem ili brušenjem. Neke greške se teško uklanjaju pa mogu biti prihvatljive na određenim lokacijama. [8]

Definirano je sedam osnovnih kategorija grešaka na odljevcima na čijoj je osnovi sastavljen i atlas grešaka. Sve greške svrstane su u jednu od sedam kategorija prikazanih na slici 8: [10]

A) metalne izrasline (zadebljanja)
B) šupljine
C) prekid kontinuiteta mase (napukline)
D) pogreške na površini odljevka
E) nepotpun odljevak
F) netočne mjere ili oblik
G) uključci i nepravilna struktura



Slika 8. Primjeri grešaka na odljevcima: A) izrasline, B) šupljine, C) napukline, D) površinske greške, E) nepotpun odljevak, F) netočne mjere (oblik), G) uključci [11]

Metode za uočavanje i analizu grešaka [11] :

- uobičajene metode kontrole:
  - vizualna kontrola
  - kontrola dimenzija odljevaka
  - kontrola mase odljevka
  - ispitivanje tvrdoće odljevka
- ispitivanje tekućim penetrantom
- ispitivanje feromagnetnim prahom
- ispitivanje vrtložnim strujama
- radiografsko ispitivanje
- ispitivanje ultrazvukom
- metalografska analiza pretražnim elektronskim mikroskopom.

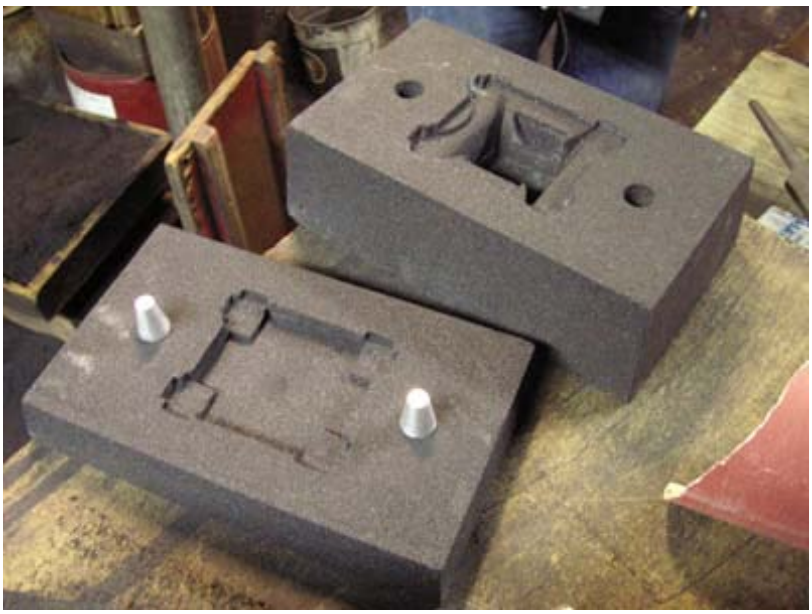
2.6. Lijevanje u pješčane kalupe

Karakteristike pješčanog lijeva: [2, 8]

- najraširenij postupak lijevanja
- mogućnost izrade odljevaka raznih dimenzija (od vrlo malih do vrlo velikih)

- mogućnost istovremenog lijevanja više komada u jednom kalupu
- primjenjivost za lijevanje gotovo svih materijala
- primjena u pojedinačnoj i masovnoj proizvodnji
- niski alatni troškovi, ali visoki direktni troškovi zbog velikog udjela ručnog rada.

Pješčani kalup sastoji se od osnovnog materijala (pijeska), veziva i dodataka. Primjer takvog kalupa prikazan je na slici 9.



Slika 9. Pješčani kalup [12]

Vrste pješčanih kalupa [2] :

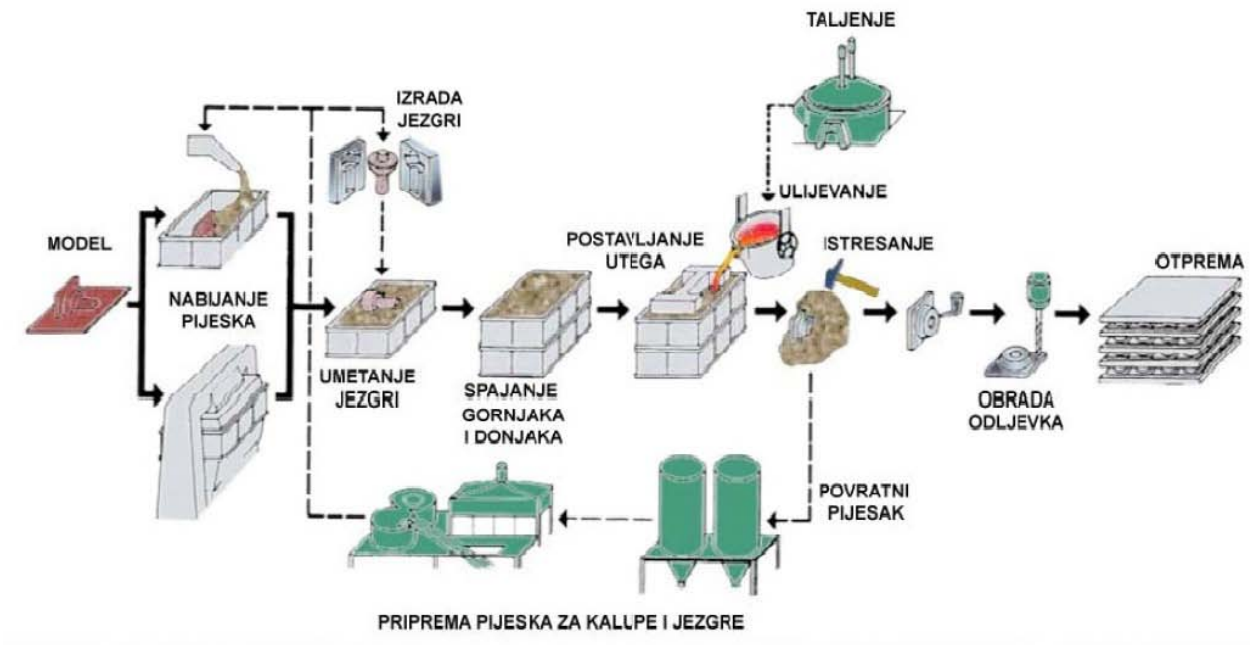
- kalup od vlažnog pijeska (mješavina pijeska, gline i vode)
- kalup od suhog pijeska (umjesto gline sadrži organska veziva)
- površinski osušen kalup (suši se površina kalupne šupljine od vlažnog pijeska)

2.7. Proizvodni proces u ljevaonici

Proizvodni proces lijevanja u pješčani kalup u ljevaonici sastoji se od [2] :

1. Ulijevanja metala u pješčani kalup
2. Skrućivanja metala
3. Razbijanja kalupa i vađenja odljevka
4. Čišćenja i pregledavanja odljevka radi mogućeg nastanka grešaka
5. Naknadne toplinske obrade ukoliko je potrebno poboljšanje svojstava odljevka

Slika 10 prikazuje proizvodni proces lijevanja u pješčani kalup u ljevaonici.



Slika 10. Proizvodni proces lijevanja u pješčani kalup u ljevaonici [2]

3. ALUMINIJ

Aluminij je sjajan metal srebrno-bijele boje. Talište mu je pri 660 °C, a vrelište pri 2519 °C. Kao kovina je mekan, žilav, male gustoće (2,700 kg/m³) i lako je rezljiv. Sam metal je jako reaktivan, ali je zaštićen tankim prozirnim slojem oksida koji brzo nastaje na zraku te ga čini korozijski postojanim. No, neotporan je na tvari koje razaraju zaštitni oksidni film, kao što su npr. lužine, mort i građevno vapno. Nema veliku čvrstoću, ali je postupkom precipitacijskog očvrsnuća moguće proizvesti aluminijske legure iste čvrstoće kao i mnogi čelici. Zbog niskog modula elastičnosti koristi se za izradu konstrukcija koje su znatno gipkije i elastičnije od čeličnih. Također ima visoku toplinsku i električnu vodljivost. [13, 14]

Treba spomenuti i da se radi o metalu koji je vrlo pogodan za recikliranje. Za recikliranje je potreban znatno manji utrošak energije nego za samu primarnu proizvodnju. Pretaljivanjem već korištenog aluminija i njegovih legura dobiva se sekundarni aluminij koji se pretežno koristi za izradu odljevaka. [14]

Toplinskom obradom aluminijskih materijala moguće je utjecati na kemijski sastav i mikrostrukturno stanje te na taj način postići željena svojstva. [14]

Aluminij u elementarnom stanju prikazan je na slici 11.

Slika 11. Aluminij u elementarnom stanju [15]

Kemijski element aluminij se u periodnom sustavu elemenata označava simbolom Al, atomski (redni) broj mu je 13, a atomska masa mu iznosi 26,98. [13]

3.1. Dobivanje aluminija

Prvi aluminij proizveo je 1825. godine danski kemičar H.C. Örsted uporabom skupog redukcijskog sredstva u obliku metalnog kalija. Sve do 1886. godine aluminij je smatran rijetkim i dragocijenim materijalom, no tada su C.M. Hall i P. Hérault otkrili relativno jeftin postupak za proizvodnju aluminija. [16]

U prirodi se aluminij nalazi u obliku oksida i smjese oksida iz kojih se metal izdvaja skupim elektrolitskim postupkom. Na slici 12 prikazana je polazna ruda za dobivanje aluminija (boksit).

Slika 12. Boksit [17]

Boksit je heterogena ruda koja se uglavnom sastoji od jednog ili više aluminijevih hidroksida, a također može sadržavati i silicij dioksid, željezni oksid, te alumosilikate (argentit). Pročišćavanjem boksita dobije se aluminijev oksid (glinica), iz kojeg se kasnije elektrolitičkom redukcijom dobija aluminij. Jakost električne struje pri procesu elektrolize iznosi oko 150000 A, a napon je oko 5 V. [13,16]

Najčešće su katode izrađene od ugljena te lagano izgaraju i reagiraju s kisikom i fluorom iz elektrolita (najčešće rastaljeni kriolit - Na_3AlF_6). Aluminij se izlučuje na katodi i pada na dno kupke, a na anodi se oslobađa ugljični dioksid. Sam kriolit ne sudjeluje u elektrolitičkom procesu nego pliva na površini i štiti aluminij od oksidacije. Tako nastaju određene količine plinova CO i

CO_2, te plinoviti spojevi s fluorom koji pridonose efektu staklenika. Dobiveni aluminij drži se na visokim temperaturama nekoliko sati kako bi iz njega isparili udjeli silicija, titana, bakra i cinka. Najveću čistoću moguće je dobiti električnom rafinacijom (99,999%). Također se razvijaju i druge elektrolitne metode, npr. obrada boksita s klorom i elektroliza rastopljenog klorida. [13,16,17,18]

3.2. Primjena aluminija

Zbog male težine i gustoće (gustoća aluminija je tri puta manja od gustoće čelika), prirodne otpornosti na koroziju i pogodnih fizikalnih svojstava za kalupljenje, aluminij ima vrlo široku primjenu u [16] :

- avioindustriji
- brodogradnji
- pakiranju proizvoda (aluminijske folije, limenke...)
- svemirskoj industriji (preko 80% udjela aluminija u svemirskim letjelicama)
- prijenosu električne struje (dalekovodi)
- automobilskoj industriji (motor i ostali dijelovi)
- informatičkoj industriji (mobiteli, prijenosnici...)
- građevinarstvu (instalacije, građevinski elementi...).

Slika 13 prikazuje primjenu aluminija za izradu cijevi i raznih profila.

Slika 13. Primjena aluminija za izradu cijevi i raznih profila [30]

Primjenu aluminija kao inženjerskog materijala određuju tri glavna svojstva: [16]

- povoljan omjer čvrstoće i gustoće (tzv. specifična čvrstoća), posebno pri uporabi nekih od legura. Gostoća aluminija je tri puta manja od gustoće čelika, pa se aluminij i njegove legure prvenstveno koriste u proizvodnji vozila i zrakoplova.
- najpovoljniji omjer električne vodljivosti i gustoće među svim metalima. Zato se sve češće za prijenos električne energije koristi aluminij umjesto bakra.
- velik afinitet prema kisiku te relativno velika korozijska postojanost (primjena u graditeljstvu).

3.3. Tehnički aluminij [16]

Nelegirani aluminij ponajprije se koristi zbog njegove korozijske postojanosti, male gustoće te lijepog izgleda. Antikorozivnost mu se temelji na postojanju gustog nepropusnog oksidnog filma koji se stvara na površini metala na zraku i vodenim otopinama. Ako se oksidni sloj ošteti, odmah se oksidacijom nadomješta novim. Što je jače oksidiran, nastali sloj je otporniji.

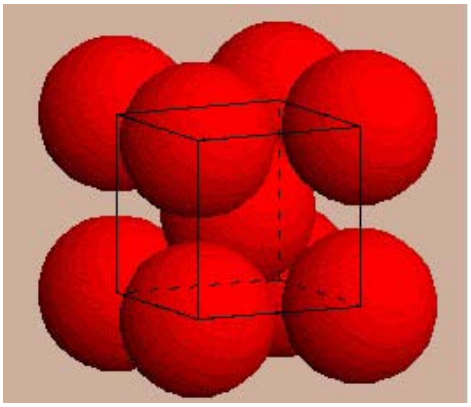
Kvalitetu oksidnog sloja moguće je poboljšati postupcima kemijskog fosfatiranja i kromatiranja. Također je moguće provesti anodizaciju kojom se umjetno podebljava prirodni sloj oksidnog filma (eloksiranje). Anodizacija se izvodi u kupkama sa sumpornom ili kromnom kiselinom, a nastali sloj je ravnomjeran, gust i staklasto-proziran (idealno u dekorativne svrhe). Obzirom da je aluminijev oksid vrlo tvrd, njegovim podebljanjem povećava se i otpornost trošenju. Dodajući razne dodatke elektrolitima, moguće je sloj i obojiti po želji.

Prirodni oksidni sloj je debljine oko 0,01 μm i pun je sitnih pora. Ukoliko postoji razlika u kemijskom sastavu uslijed prisutnih nečistoća ili precipitata, pore mogu prouzročiti točkastu koroziju (pitting). No ipak, takav oblik korozije moguće je spriječiti na sljedeća dva načina:

- ograničavanjem udjela štetnih primjesa
- umjetnim stvaranjem neporoznog zaštitnog sloja.

Obzirom na teškoće rafinacije sirovog aluminija, trgovačke kvalitete najčešće sadrže oko 99,0% metala. Moguće je dobiti i aluminij više čistoće (do 99,999 %), ali uz bitno višu cijenu.

Aluminij s kubičnom prostorno centriranom strukturom prikazanom na slici 14 (FCC – Face Centered Cubic), odličan je metal za toplo i hladno oblikovanje deformiranjem. Valjanjem se mogu proizvesti folije od samo nekoliko µm debljine (pakiranje industrijskih i prehrambenih proizvoda). No, za te namjene mogu se koristiti jedino kvalitetnije vrste aluminija koje nemaju nemetalne uključke ili intermetalne spojeve željeza i silicija koji uzrokuju nastanak pora i malih rupica u foliji. Ovisno o uključcima u samom metalu, aluminij se može vrlo dobro laštiti na vrlo visok sjaj. Za visokovrijedne površine i sve ostale kod kojih je dekorativan izgled najvažniji, mora se upotrijebiti čisti aluminij.



Slika 14. Aluminijska kubična plošno centrirana struktura (FCC) [20]

Primarni aluminij upotrebljava se jedino u gnječenom stanju. Njegova mehanička svojstva tokom hladne obrade ovise o čistoći i stupnju ugnječenosti i prikazana su u tablici 3. Na svojstva koja ovise o mikrostrukturi može se dalje utjecati toplinskom obradom (npr. žarenje aluminija s manjim udjelom željeza i silicija na 250...300 °C). Obzirom na mekost i nisku vlačnu čvrstoću, aluminij se uglavnom upotrebljava u legiranom stanju.

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [16]

Gustoća	kg/m³	2700
Talište	°C	660
modul elastičnosti	N/mm^2	69000
toplinska rezljivost	$10^{-6}/K$	23,8
električna vodljivost	$m/\Omega mm^2$	36...37,8
granica razvlačenja	N/mm^2	20...120
vlačna čvrstoća*	N/mm^2	40...180
istezljivost*	%	50...4

*ovisno o stanju

Primjena tehničkog aluminija: aparati, posude i rezervoari u prehrambenoj i kemijskoj industriji, kuhinjsko posuđe, graditeljstvo (krovovi, žlijebovi, ukrasi...), pakiranje (tube, folije, limenke...), električni vodiči itd. [16]

Primjena aluminija za proizvodnju limenki prikazana je na slici 14.

Slika 15. Primjena aluminija za proizvodnju limenki [21]

4. ALUMINIJSKE LEGURE

Svrha legiranja jest prvenstveno poboljšanje mehaničkih svojstava, ponajprije vlačne čvrstoće i tvrdoće, zatim krutosti, rezljivosti, pa i žilavosti ili livljivosti. Nadalje im je mehanička svojstva moguće poboljšati precipitacijskim očvrsnućem, makar se brojne legure koriste bez ikakve obrade. Za razliku od primarnog aluminija koji se upotrebljava samo u gnječenom stanju, aluminijske legure se upotrebljavaju i u gnječenom i u lijevanom stanju. [16]

Najvažniji legirni elementi su: [13]

- bakar (Cu)
- magnezij (Mg)
- silicij (Si)
- cink (Zn)
- mangan (Mn).

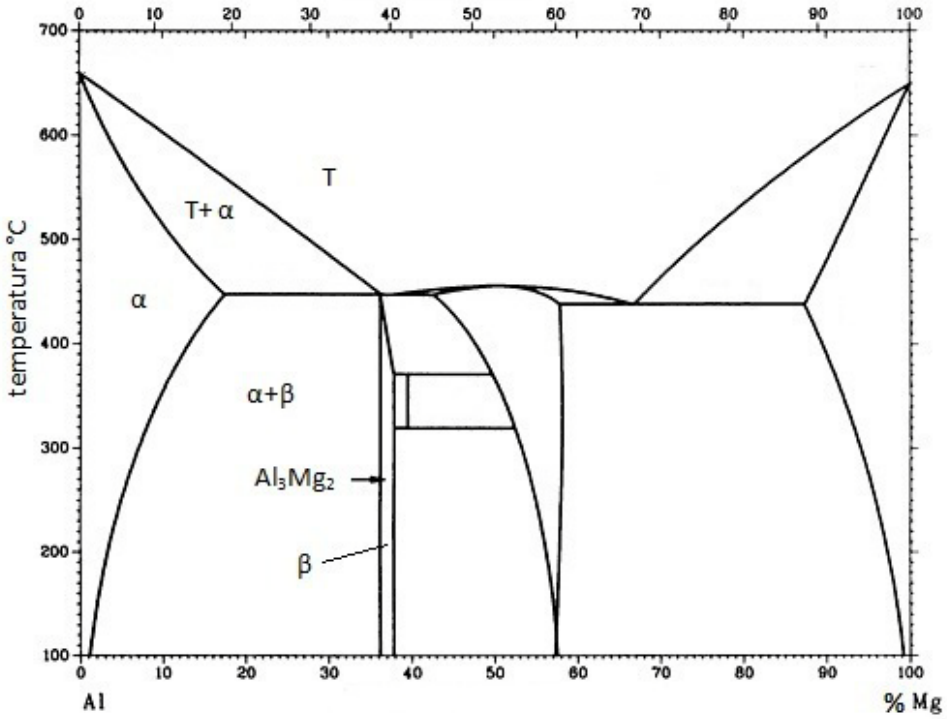
Kao dodaci ili nečistoće prisutni su u manjem udjelu željezo (Fe), krom (Cr), i titan (Ti). Kompleksnije legure nastaju njihovom međusobnom kombinacijom i uz dodatak drugih legirnih elemenata koji poboljšavaju svojstva. Neki od takvih posebnih dodataka su: nikal (Ni), kobalt (Co), litij (Li), srebro (Ag), vanadij (V), cirkonij (Zr), kositar (Sn), olovo (Pb), kadmij (Cd) i bizmut (Bi). U vrlo malim količinama dodaju se i berilij (Be), bor (B), natrij (Na) i stroncij (Sr). Svi legirni elementi su pri dovoljno visokim temperaturama potpuno topivi u rastaljenom aluminiju. Topivost elemenata ovisi o kristalima mješancima. Neotopljeni elementi stvaraju vlastite faze ili intermetalne spojeve. Svojstva legura ovise o topivosti legirnih elemenata, udjelu, veličini, obliku i raspodjeli intermetalnih spojeva. [16]

Utjecaj legirnih elemenata na mikrostrukturu prikazuje se u dijagramima stanja. Iz njega se može vidjeti tijek skrućivanja, nastajanje faza i topivost u čvrstom stanju ovisno o temperaturi i sastavu. No, vrijede jedino za čiste legure u termodinamičkoj ravnoteži. Zato treba uzeti u obzir i moguće razlike između ravnotežnog i stvarnog stanja. [16]

4.1. Dijagrami stanja aluminijskih legura [16]

Najvažniji legirni elementi s aluminijem u dijagramu stanja imaju polje eutektičkog tipa. Prema aluminijskom području ograničeno je polje kristala mješanaca, a u području prema višim udjelima legirnih elemenata nalazi se polje prijelaznih faza (intermetalnih spojeva).

4.1.1. Dijagram stanja aluminij-magnezij (Al-Mg) [16]



Slika 16. Dijagram stanja Al-Mg [22]

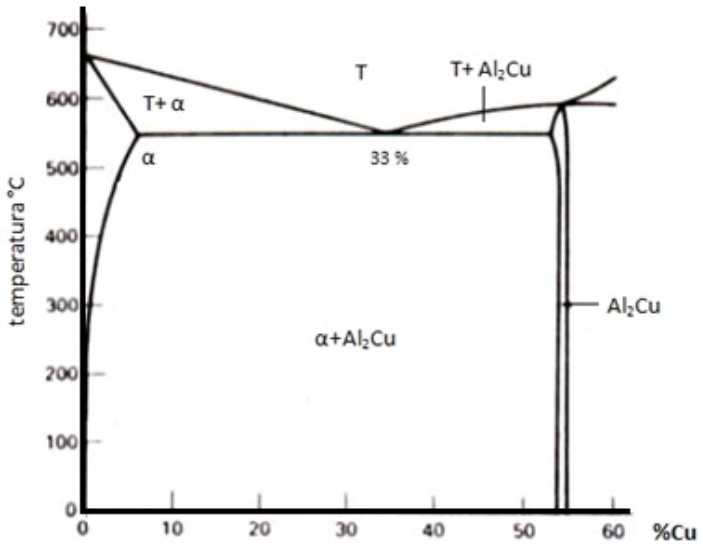
Iz slike 16 vidi se da aluminij i magnezij pri 37,5 % Mg tvore intermetalni spoj Al_3Mg_2 (β). Ta faza je u legurama aluminija i magnezija nepoželjna iz dva razloga:

- vrlo je tvrda pa nije pogodna za oblikovanje deformiranjem
- sadrži velik udio magnezija te prva prelazi u otopinu pri djelovanju korozivnog medija.

Čvrstoću legura moguće je povisiti povećanjem udjela otopljenog magnezija u kristalu mješancu. Zbog smanjene topivosti se ispod eutektičke temperature izlučuje β-faza, no njezin utjecaj na očvrsnuće nije značajan. Intermetalni spoj Al_3Mg_2 izlučuje se po granicama zrna u obliku krupnih čestica.

Treba biti oprezan pri korištenju legura s više od 7 %Mg. Naime, kod takvih legura oko aluminijskih zrna može nastati mreža precipitata Al_3Mg_2 koji uzrokuju međukristalnu koroziju. Ipak, ta se mreža može odstraniti rastvornim žarenjem tako da se legura gasi s temperature žarenja te ponovno žari na nižoj temperaturi. Nakon takvog postupka toplinske obrade legura više nije osjetljiva na interkristalnu koroziju. Zato je uporaba Al-Mg legura ograničena na područje ispod 15 %Mg. Obzirom da eutektik sadrži gotovo 80 % tvrde i krhke faze Al_3Mg_2, ove legure nisu pogodne za lijevanje.

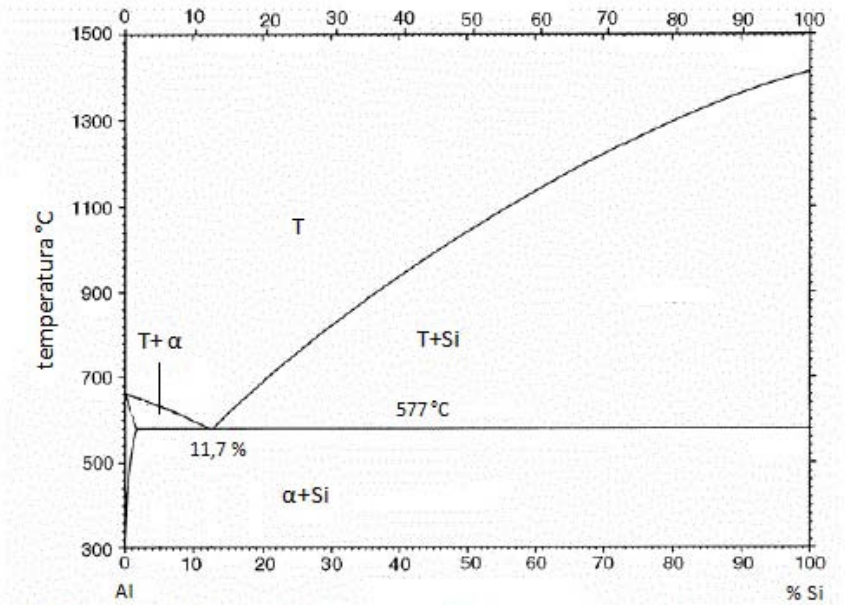
4.1.2. Dijagram stanja aluminij-bakar (Al-Cu) [16]



Slika 17. Dijagram stanja Al-Cu [23]

Iz slike 17 vidljivo je nastajanje intermetalnog spoja Al_2Cu pri 54 % Cu (prisutan u legurama sa više od 5,7 % Cu). Takav spoj je krhak i nije poželjan u tehničkim legurama. Zbog slabe žitkosti, legure eutektičkog sastava (33 % Cu) nisu u uporabi. Tehničke legure sadrže oko 4,5 % Cu zbog širokog intervala skrućivanja. Baš na ovoj leguri prvi je put otkriveno toplinsko očvrsnuće aluminijskih legura.

4.1.3. Dijagram stanja aluminij-silicij (Al-Si) [16]



Slika 18. Dijagram stanja Al-Si [24]

Na slici 18 prikazan je dijagram stanja aluminij-silicij eutektičkog tipa s eutektikom pri 11,7 %Si i temperaturi od 577 °C. Pri toj temperaturi se u kristalima mješancima aluminija (α) otapa 1,65 %Si, a pri temperaturi 300 °C još samo 0,07 %Si. Time se može zaključiti da se eutektik sastoji od oko 90 % kristala mješanaca aluminija, dok je ostatak čisti silicij. Dakle, svojstva uglavnom ovise o žilavim mješancima aluminija, a manje o krhkom siliciju. To su dobri preduvjeti za dobivanje lijevanih legura, a k tome i eutektički sastav omogućuje dobro popunjavanje kalupa pri lijevanju i daje sitnozrnatu strukturu.

4.2. Trokomponentni legirni sustavi [16]

Jedan od važnih trokomponentnih legirnih sustava je sustav aluminij-magnezij-silicij (Al-Mg-Si) gdje se javlja prijelazna Mg_2Si faza. Ona se može promatrati i kao samostalna legirna komponenta. Najvišu čvrstoću moguće je postići sustavima koji imaju iste mogućnosti precipitacijskog očvrsnuća:

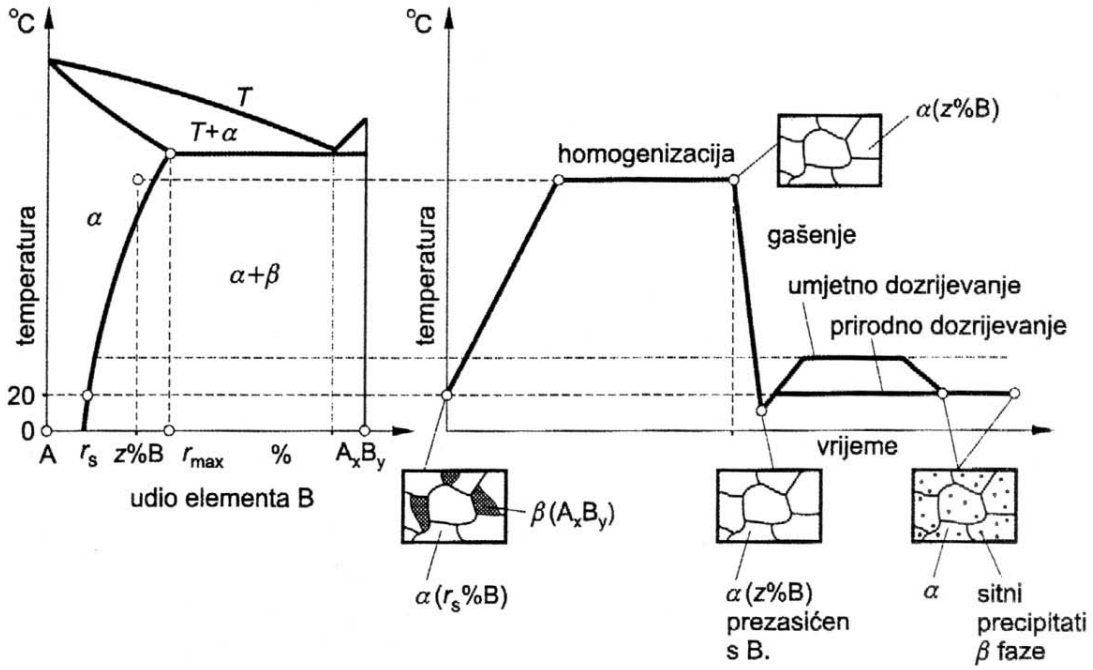
- aluminij-bakar-magnezij (Al-Cu-Mg)
- aluminij-cink-magnezij (Al-Zn-Mg) – javlja se intermetalni spoj $MgZn_2$.

Na osnovi ovih sustava razvio se cijeli niz tehnički važnih precipitacijski očvrstljivih legura. Precipitacijsko očvrsnuće se primjenjuje i na druge legure pogodnog sastava u kojima se mijenja topivost legirnih elemenata obzirom na temperaturu.

4.3. Precipitacijsko očvrsnuće aluminijskih legura (starenje materijala, dozrijevanje) [16,25]

Precipitacijsko očvrsnuće (dozrijevanje, starenje materijala) je vrsta toplinske obrade metala u kojoj se izvajaju disperzirane faze u osnovnoj strukturi metala. Legiranje ili nastajanje kristala mješanca doprinosi povećanju čvrstoće samog materijala. Najveći doprinos očvrsnuću proizlazi iz prezasićene krute faze osnovne strukture. Pojava je prvi put zabilježena 1906. godine, a otkrio ju je njemački istraživač A. Wilm. Uočio je da Al-Cu legura (patentirana pod imenom „dural“) gašena u vodi s temperature od oko 500 ºC očvrsne stajanjem na okolišnoj temperaturi. Za šest do sedam dana postignut je najviši iznos čvrstoće.

Opći postupak precipitacijskog očvršćivanja prikazan je na slici 19.



Slika 19. Prikaz općeg postupka precipitacijskog očvršćivanja [16]

Prirodno „dozrijevanje“ je postupak očvrsnuća nakon gašenja držanjem legure na temperaturi okoline. Postupak je moguće i ubrzati te postići veću čvrstoću ukoliko se gašena legura zagrije na temperaturu od oko 180 ºC (umjetno „dozrijevanje“). Povećanje čvrstoće i tvrdoće povezano je sa stvaranjem koherentnih precipitata unutar rešetke osnovnog kristala mješanca.

Postupak se najviše koristi kod aluminijskih legura s bakrom, legura s magnezijem i silicijem (očvrsnuće zbog precipitacije Mg_2Si), te onih s cinkom, magnezijem i bakrom ($MgZn_2$ i Al_2CuMg). Kod ostalih legura najviše se koristi kod legura sa osnovom magnezija, titana, bakra te određenih vrsta čelika.

Kod gnječivih aluminijskih legura s bakrom, zagrijavanje iznad 160 °C može prouzročiti porast čestica precipitiranog nekoherentnog Al_2Cu do dimenzija razlučivih svjetlosnim mikroskopom. Tako velike čestice dovode do sniženja tvrdoće i čvrstoće pa se takva toplinska obrada naziva „starenje“ ili „naddozrijevanje“.

Zagrijavanjem legure ubrzava se postupak precipitacijskog očvrsnuća, a pothlađivanjem se usporava. Za očvrsnuće neke aluminijske legure potrebno je ispuniti određene uvjete:

- odabrati sastav tako da legura bude iz heterogenog područja dijagrama stanja
- maseni udio legirnih elemenata mora biti što viši, ali ne smije prekoračiti granicu maksimalne topljivosti u α mješancu kako bi se mogla postići potpuna apsorpcija stranih atoma rastvornim žarenjem
- druga faza mora u polaznom stanju biti intermetalni spoj kako bi došlo do ponovnog izlučivanja intermetalnog spoja u koherentnom obliku.

4.4. Lijevane aluminijske legure

Lijevane legure aluminija moguće je razvrstati u tri osnovne skupine: [16]

- aluminij-silicij (Al-Si) legure
- aluminij-magnezij (Al-Mg) legure
- aluminij-bakar (Al-Cu) legure.

Njihovom kombinacijom mogu se dobiti legure s poboljšanim nekim od osnovnih svojstava prikazanih u tablici 2.

Tablica 2. Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura [16]

Mehanička otpornost	**Livljivost**	**Rezljivost**	**Otpornost na koroziju**	**Tip legure**	**Predstavnik**	
mala	srednja	dobra	**vrlo dobra**	Al-Mg	AlMg3, AlMg5	
				Al-Si-Mg	AlSi10Mg	Mg omogućuje toplinsko očvrsnuće
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*

4.4.1. Al-Mg legure

Glavne značajke: [16,26]

- korozijski vrlo postojane – moguće postići vrlo visok sjaj (dekorativne svrhe)
- neke su vrlo otporne na udarce (za umjereno opterećene dijelove u pomorstvu)
- jako dobro se zavaruju (arhitektura i dekoracija)
- legura s 10 %Mg ima najbolju kombinaciju čvrstoće i žilavosti, no teško ju je dobiti zbog otežane livljivosti
- u uporabi najčešće legure s 3 % i 5 % Mg.

Postoje i eutektičke Al-Si-Mg legure koje su precipitacijski očvrstljive uz 0,2 % do 0,5 %Mg. Odlikuju se dobrom livljivošću koja se pogoršava smanjenjem udjela silicija. Vrlo se malo linearno skupljaju (1 %). Potrebno ih je cijepiti pri lijevanju u pijesak. Zavarivati se mogu pješčani odljevci, samo neki kokilni, a tlačni odljevci ne mogu zbog većeg sadržaja plinova. Odljevci se mogu koristiti na temperaturama do 200 ºC. [16]

4.4.2. Al-Cu legure

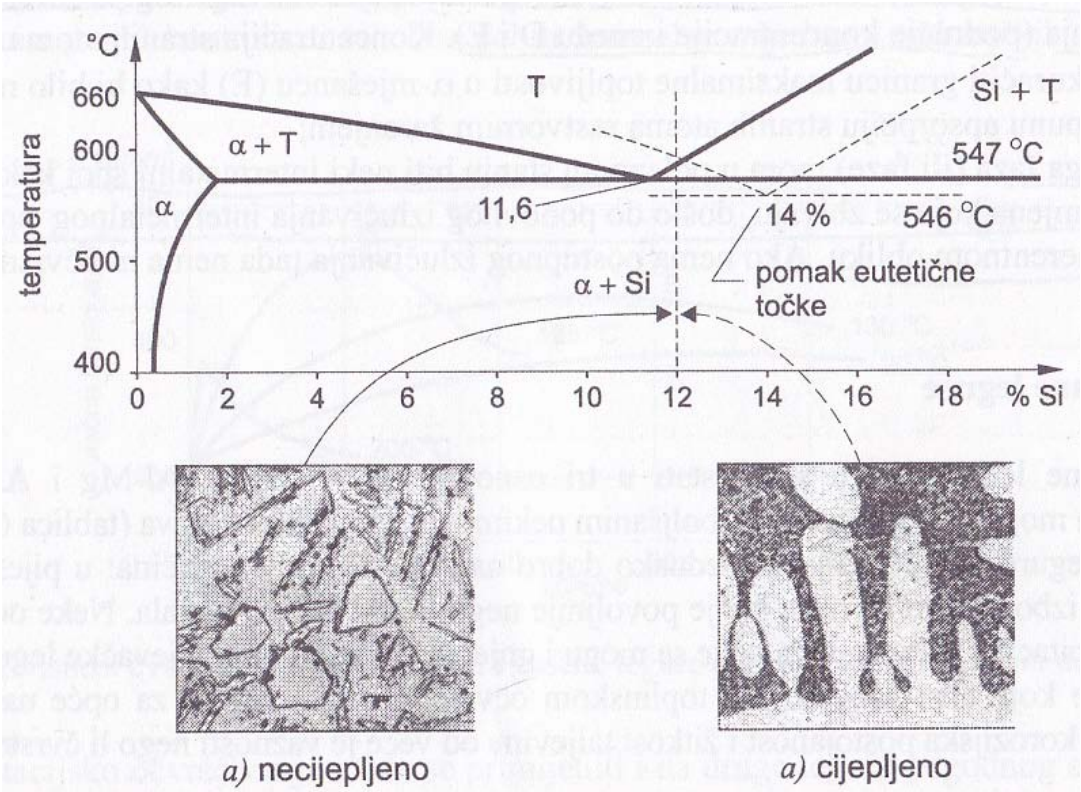
Glavne značajke [16] :

- toplinski očvrstljive legure s osrednje visokom čvrstoćom
- srednje ili slabo otporne na udarce
- dobra otpornost pri povišenim temperaturama i dobra rezljivost
- slaba livljivost
- najslabija korozijska postojanost među svim aluminijskim legurama
- dodaje im se magnezij kako bi si izbjeglo pogrubljenje zrna pri skrućivanju
- odljevci se mogu koristiti na temperaturama do 300 ºC

Koriste se i eutektičke Al-Si-Cu legure u kojima se povećanjem udjela bakra poboljšava čvrstoća i rezljivost, a smanjuje livljivost i otpornost na koroziju. Nadalje je čvrstoću i tvrdoću moguće poboljšati rastvornim žarenjem i precipitacijom. Dodavanjem titana postiže se sitnozrnata mikrostruktura pa ovakve legure imaju dobru žilavost, otpornost na udarce i obradivost odvajanjem čestica. [16,26]

4.4.3. Al-Si legure

Al-Si legure su najrasprostranjenije legure u grupi lijevanih legura („silumin“), posebno one s 10-13 % Si. Osnovni element im je silicij koji doprinosi dobroj livljivosti. Prikladne su za tlačni lijev zbog približno eutektičkog sastava (uzak interval skrućivanja). Prilično grubu eutektičku mikrostrukturu moguće je usitniti postupkom cijepljenja ili modifikacije. Cijepljenje se izvodi dodatkom male količine natrija (manje od 0,1 % mase šarže) u obliku soli, i to neposredno prije ulijevanja taljevine u kalup. Na taj se način pokušava odgoditi nukleacija silicija pri normalnoj eutektičkoj temperaturi i pomaknuti eutektička točka u desno na dijagramu stanja Al-Si prikazanom na slici 20. U takvoj cijepljenoj leguri moguć je udio silicija veći od 14 %, a da se ne pojave primarni kristali silicija u mikrostrukturi. Pretpostavka je da se natrij skuplja u taljevini na međupovršini s novonastalim klicama silicija te na taj način usporava njihov rast. Time dolazi do pothlađenja te nastaje velik broj klica silicija (sitnozrnata eutektička mikrostruktura). Cijepljene legure imaju višu vlačnu čvrstoću, veću istezljivost te visoku duktilnost. [16]



Slika 20. Zbivanja pri cijepljenju eutektičke legure Al-Si s 12 %Si [16]

Postupkom pretaljivanja mikrostruktura se vraća u početno stanje zbog gubitka natrija (oksidacija). [16]

Obzirom na udio silicija u Al-Si legurama, razlikuju se [16,27] :

- podeutektičke legure (<12 %Si) - primarni aluminij (α-aluminij) i eutektik
- eutektičke legure (12-13 %Si) - gotovo samo eutektik (α-aluminij i β-silicij)
- nadeutektičke legure (>13 %Si) - eutektik i primarni silicij (β-silicij).

Eutektičke legure imaju veliku žitkost, malo skupljanje te uski interval skrućivanja. Kemijski su dobro postojane pa se koriste u pomorstvu. Obzirom da imaju nižu gustoću od Al-Cu legura, pogodni su i za primjenu u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji. Primjenjivi su pri temperaturama do 200 ºC. [16]

Al-Si legure moguće je upotrebljavati kao čiste binarne legure (izvrsna livljivost i otpornost na koroziju). No, zbog slabijih mehaničkih svojstava (prije svega male čvrstoće i slabe strojne obradivosti), ovim se legurama često dodaju i drugi legirni elementi (najčešće Mg, Cu, Fe). [16]

Mogući udjeli legirnih elemenata u Al-Si legurama prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Udjeli legirnih elemenata u Al-Si legurama [28]

Element	**%**
Si	5-25
Cu	0-5
Fe	do 3
Mg	0-2
Zn	0-3
Mn, Cr, Co, Mo, Ni, Be, Zr	do 3
Na, Sr	< 0,02
P	< 0,01

4.5. Gnječene aluminijske legure [16]

Gnječene aluminijske legure prikazane u tablici 4 dijele se obzirom na kemijski sastav i mogućnost precipitacijskog očvrsnuća.

Tablica 4. Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura [16]

Vrsta legure	**Način očvrsnuća**	**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

Za očvrsnuće legura hladnim deformiranjem potrebna je dovoljna čvrstoća i krutost u hladnom stanju, također i korozijska postojanost. Legure s većim udjelom magnezija koriste se u pomorstvu zbog njihove odlične postojanosti u morskoj vodi. Mehanička svojstva se postižu u zadnjem stupnju hladnog oblikovanja deformiranjem, pa se uobičajeno isporučuju u mekom

stanju. Konačne dimenzije takvog proizvoda nije moguće mijenjati (eventualno mekšanjem postupkom žarenja).

Osnovne značajke precipitacijski očvrstljivih legura navedenih u tablici 6.:

- Al-Mg-Si legure („antikorodal“) – otporne na koroziju, uvjetno pogodne za zavarivanje, anodizaciju i poliranje, koriste se za prijenos električne energije
- Al-Cu-Mg legure („dural“) – umjerena otpornost na koroziju, dodavanjem magnezija može se ubrzati očvrsnuće
- Al-Zn-Mg legure – kemijski otpornije od dural legura, zadovoljavajuća čvrstoća i korozijska postojanost te zavarljivost
- Al-Zn-Mg-Cu legure („konstruktal“) – legure s najvećom čvrstoćom među svim aluminijskim legurama, osjetljive ne napetosnu koroziju
- aluminijske legure s litijem (Al-Cu-Mg-Li i Al-Li-Cu-Mg) – obzirom na konvencionalne legure imaju manju gustoću te veći modul elastičnosti, nije pogodna za lijevanje, poboljšana duktilnost, zavarljivost i žilavost, uporaba u zrakoplovnoj industriji.

Precipitacijski očvrsnute legure su bolje za uporabu ukoliko se zahtijeva povoljan omjer čvrstoće i gustoće. Osnovu takvih legura čine bakar, magnezij, cink i silicij. Dodaju se i sljedeći elementi koji povećavaju određena svojstva:

- titan (Ti) – za postizanje sitnijeg zrna
- olovo (Pb) i bizmut (Bi) – bolja rezljivost
- krom (Cr) – pospješuje precipitacijsko očvrsnuće.

5. RAZVOJ AL-SI LEGURA ZA RAD NA POVIŠENIM TEMPERATURAMA

Materijali malih masa i gustoće važni su iz ekonomskih, ali i ekoloških razloga. Stoga se sve češće upotrebljavaju aluminij i njegove legure. Zbog svoje izvrsne otpornosti na koroziju u većini okruženja, deformabilnosti, reflektivnosti, omjera čvrstoće i mase, aluminij je jedan od najvažnijih laganih metala. Mehaničko ponašanje aluminijskih legura sve je važnije, pogotovo pri cikličkom opterećenju na sobnim i povišenim temperaturama. [32]

Aluminijske legure za rad pri povišenim temperaturama najviše su zastupljene u automobilskoj industriji, i to za izradu dijelova motora sa unutarnjim izgaranjem (blokovi motora, klipovi, košuljice cilindara itd.). Također je velika primjena i u zrakoplovnoj industriji gdje se intenzivno teži sve lakšim materijalima. Svojom malom gustoćom, toplinskom otpornosti i malom toplinskom rastezljivosti postaju idealna zamjena za odljevke od željeznih lijevova. [11, 32]

Za rad na povišenim temperaturama najprikladnije su Al-Si legure zbog dobrih mehaničkih svojstava i dobre livljivosti. Samoj livljivosti najviše doprinosi silicij, dok je za postizanje ostalih mehaničkih svojstva potrebno dodati i neke druge legirne elemente. [28]

5.1. Podeutektičke Al-Si legure

Glavne značajke [28] :

- izvrsna livljivost
- povoljan omjer čvrstoće i mase (posebice u toplinski obrađenom stanju)
- dobra korozijska postojanost.

Najčešće se primjenjuju legure sa 7-11 % Si. Ostali se legirni elementi dodaju ovisno o zahtijevanim mehaničkim svojstvima. Ovakve legure moguće je dodatno poboljšati modifikacijom ili usitnjavanjem zrna (moguće provesti i precipitacijsko očvrsnuće). [28]

Obzirom da se teži poboljšavanju već postojećih legura, kao i razvijanju novih, potrebno je poznavati njihovo ponašanje pri skrućivanju. Ovisno o načinu nastajanju eutektika, određena je morfologija eutektičke faze te udio poroznosti u mikrostrukturi što utječe na mehanička svojstva odljevka. [29]

Binarne podeutektičke legure se vrlo rijetko primjenjuju. Uglavnom se legiraju i drugim elementima pa im se i mikrostruktura mijenja. Tako ne postoje samo primarni dendriti aluminija (α_{Al}) i eutektika ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$), nego se prilikom skrućivanja javljaju i drugi intermetalni spojevi i faze. Osim toga, i nečistoće utječu na složenost procesa skrućivanja. [28]

Ukoliko Al-Si legurama dodamo bakar i magnezij, dolazi do stvaranja Al_2Cu i Mg_2Si precipitata koji utječu na povećanje čvrstoće pri sobnoj temperaturi. Ti precipitati ipak mogu pogrubiti ako se legure izlažu temperaturama većim od 150°C . Dodavanjem nikla i bakra povećava se čvrstoća na sobnim i povišenim temperaturama zbog nastanka stabilnih aluminida. Čvrstoća se može povećati i dodavanjem 0,6 - 1,96 % Ni (sve do 400 ºC). Također je moguće dodati i male količine nikla i željeza koji povećavaju čvrstoću pri povišenim temperaturama, a ne smanjuju žilavost. [30]

Željezo je neizbježna nečistoća u Al-Si legurama te najčešće precipitira u obliku Al_5FeSi i $Al_{15}(MnFe)_3Si_2$ spojeva. Al_5FeSi je tvrda i krhka faza koja loše utječe na žilavost, a može prouzročiti i nastanak pukotina. Uz prisustvo mangana nastaje intermetalna faza $Al_{15}(MnFe)_3Si_2$. Mangan se u većini slučajeva smatra nečistoćom, no ponekad se dodaje kako bi neutralizirao štetan utjecaj željeza. Tako se dobije veća čvrstoća odljevaka bez povećanja krhkosti pri povišenim temperaturama. [28]

5.2. Eutektičke Al-Si legure

Glavne značajke eutektičkih Al-Si legura [5] :

- visoka otpornost prema koroziji i trošenju
- visoka toplinska vodljivost
- visoka specifična krutost
- dobra specifična čvrstoća.

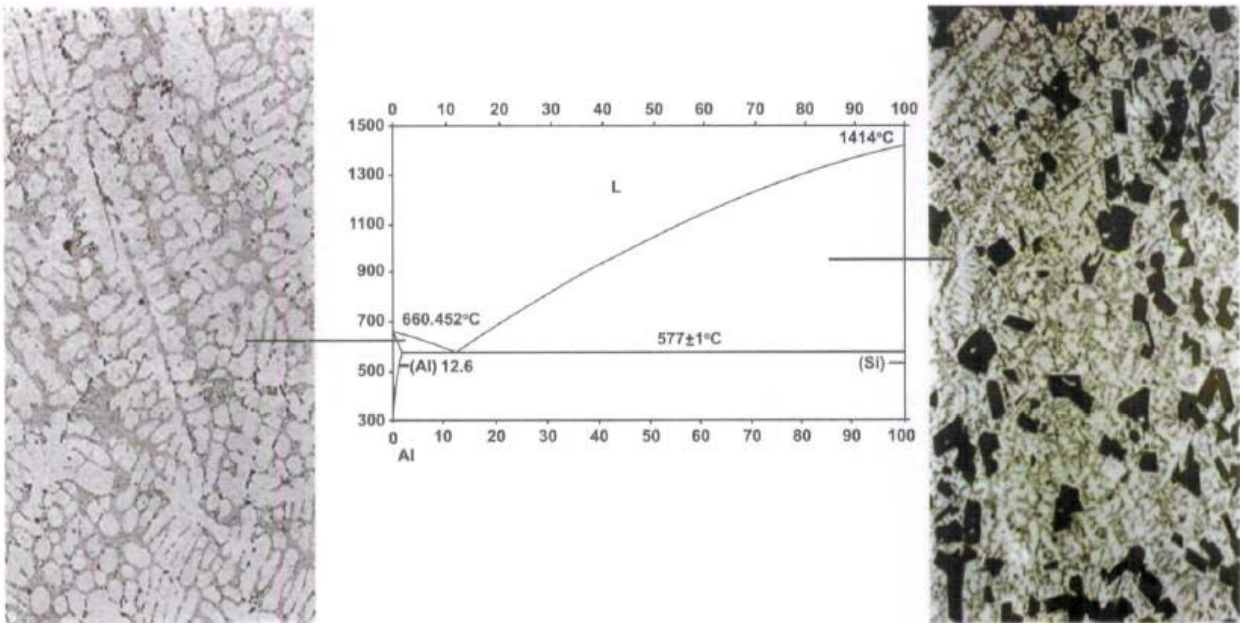
Eutektičke Al-Si legure se također primjenjuju za proizvodnju dijelova namijenjenih za rad pri povišenim temperaturama, posebice u automobilskoj industriji za izradu klipova i ventila. Legure za izradu klipova moraju podnositi temperature više i od 350 ºC te toplinski umor između sobne temperature i 300 ºC. Moraju imati visoku toplinsku vodljivost, povišenu čvrstoću te toplisku stabilnost. [28]

Ove legure imaju izvrsna mehanička svojstva zbog niske točke taljenja i uskog temperaturnog intervala skrućivanja. Eutektik se sastoji od vrlo žilavog primarnog aluminija α_{Al} (90 % udjela) i čistog silicija (ostalih 10 %). Takav sastav pridonosi livljivosti i omogućuje dobro popunjavanje kalupa pri lijevanju te daje sitnozrnatu mikrostrukturu. Moguće im je dodati i neke od pratećih elemenata, kao što su bakar i željezo. Za ove legure se dosta često koristi modifikacija, usitnjavanje zrna te precipitacijsko očvršćivanje. [16]

Vrlo važan legirni element u legiranju Al-Si legura za rad na povišenim temperaturama jest nikal (Ni). Samo malim dodatkom nikla utječe se na povećanje čvrstoće i modul elastičnosti, pogotovo za rad pri povišenim temperaturama. Ukoliko se takvoj leguri doda i željezo (Fe), učinak nikla postaje još veći. Mehanička svojstva su još bolja ako se provede postupak sferoidizacijskog žarenja (povećana nosivost). [28]

5.3. Nadeutektičke Al-Si legure

U novije vrijeme sve se više koriste nadeutektičke Al-Si legure, i to za izradu visokokvalitetnih blokova motora. Udio silicija u ovim legurama veći je od 13 %, dok im se mikrostruktura uobičajeno sastoji od primarne silicijske faze u eutektičkoj metalnoj osnovi. Takva binarna Al-Si mikrostruktura prikazana je na slici 21. [28]



Slika 21. Fazni dijagram binarne Al-Si legure s podeutektičkom (lijevo) i nadeutektičkom (desno) mikrostrukturom [28]

Silicijski kristali su najtvrđa faza u bilo kojoj ljevačkoj Al-Si leguri. Pridonose povećanoj otpornosti na trošenje, no imaju i štetan utjecaj. Loše utječu na čvrstoću, duktilnost, vučenje i strojnu obradivost zbog grubosti Si pločica koje uzrokuju nastanak pukotina i povremene prijelome pri naprezanju. Ipak, te nedostatke moguće je ukloniti dodavanjem fosfora kojim se usitni zrno Si kristala. [31]

Nadeutektiče Al-Si legure za rad pri povišenim temperaturama najčešće se legiraju magnezijem (Mg), bakrom (Cu) i željezom (Fe). Ovisno o željenim svojstvima određuje se njihov udio u leguri. Naknadnom toplinskom obradom moguće im je poboljšati mehanička svojstva. [28]

Obzirom na sve veće zahtjeve za legurama s većom otpornosti na trošenje te većim modulom elastičnosti, sve se više proučavaju i ispituju nadeutektičke Al-Si legure. Tako se zaključilo da je moguće poboljšati i ostala mehanička svojstva, kao što su duktilnost i čvrstoća. Povećanim udjelom silicija (preko 14 %) moguće je povećati modul elastičnosti te sniziti koeficijent toplinskog rastezanja. [28]

5.4. Normirane Al-Si legure za rad pri povišenim temperaturama

Razvijeno je mnogo Al-Si legura za rad pri povišenim temperaturama koje se koriste u automobilskoj industriji, ali i u zrakoplovstvu te za potrebe vojnog i svemirskog programa. [32]

Za izradu klipova putničkih automobila, sportskih vozila i lakih kamiona, najčešće se koristi legura 332.0-T5 (AlSi9,5Cu3Mg1). Ima dobra ljevačka, mehanička i fizikalna svojstva. Poboljšanje strojne obradivosti postiže se gašenjem na zraku odmah nakon vađenja iz kokile radi precipitacijskog očvršćivanja. Često se koristi i legura 336.0-T551 (AlSi12Ni2,5Mg1Cu1). Legura 242.0-T571 (AlCu4Ni2Mg2,5) ima viši koeficijent toplinske vodljivosti te pruža bolja mehanička svojstva na povišenim temperaturama. [28]

Zrakom hlađene glave cilindara za avione i motocikle izrađivale su se od legure 220.0-T61, ali se danas koriste legure 242.0 i 243.0 zbog bolje livljivosti i znatno boljih mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama. [28]

Za održavanje visoke tvrdoće i čvrstoće sve do 175 °C primjenjuju se legure 295.0 (AlCu4,5Si1,1), 355.0 (AlSi5Cu1,3Mg0,5) i C355.0 (AlSi5Cu1,3Mg0,5). Koriste se za izradu aviomotora i kućišta prigona. Pri ovim temperaturama koriste se još i legure A201.0 (AlCu4,6Ag0,7Mn0,35Mg0,35Ti0,25) i 204.0/206.0 (AlCu4,6Mg0,25Fe0,17Ti0,17 /AlCu4,5Mn0,3Mg0,25Ti0,22). One imaju visoku čvrstoću i na povišenim i na sobnoj temperaturi. Zato se primjenjuju za izradu glave cilindra, klipova, kućišta prigona itd. [33]

Neke od normiranih legura s izvrsnom čvrstoćom pri temperaturama do 200 °C su: AlSi6Cu4, AlSi5Cu3Mg, AlSi5Cu3Mn, AlSi9Cu3(Fe)(Zn) itd.

Još neke legure i njihove namjene navedene su u tablici 5.

Tablica 5. Al-Si Legure za rad pri povišenim temperaturama i njihova namjena [33]

OZNAKA LEGURE I STANJA	**SVOJSTVA/NAMJENA**
AlSi6Cu4	Široka namjena, pogotovo za rad pri povišenim temperaturama.
AlSi6Cu4(Fe)	
AlSi8Cu3	
AlSi8Cu3(Fe)	
AlSi12	Tankostjeni odljevci široke upotrebe. Za srednja opterećenja, dobra kemijska postojanost.
AlSi12(Fe)	
AlSi10Mg	Isto kao AlSi12, pa i za veća opterećenja; veća tvrdoća.
AlSi10Mg(Fe)	
AlMg3Si1	Dobra livljivost i postojanost na povišenim temperaturama.
AlMg5Si	Za odljevke visoke tvrdoće, postojanost na morsku vodu

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj rada bio je ispitati utjecaj legirnih elemenata Cu, Ni i Mg na AlSi12 leguru te usporediti njihove mikrostrukture i mehanička svojstva.

Iz legure AlSi12CuNiMg lijevan je odljevak iz kojeg su se izradili uzorci i epruvete potrebni za sljeća ispitivanja:

- metalografsko ispitivanje na optičkom mikroskopu
- mehanička ispitivanja na kidalici
- radiografsko ispitivanje
- kemijsku analizu.

6.1. Izrada odljevaka

Odljevci potrebni za ispitivanja izrađeni su u Laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Izrađeni su sljedeći odljevci:

- šipka od AlSi12 legure
- šipka od AlSi12CuNiMg legure.

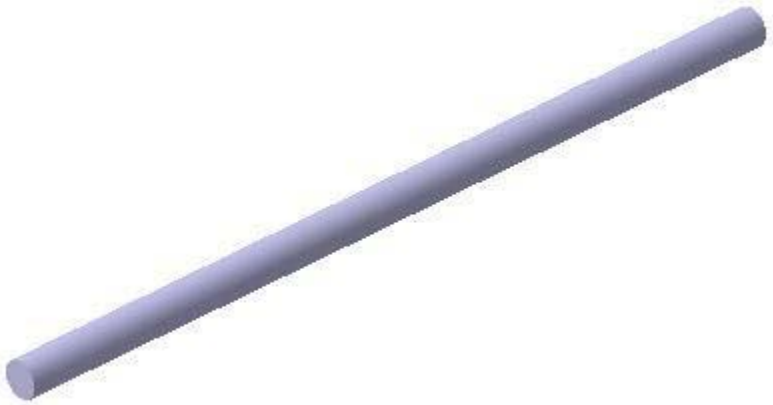
6.1.1. Model odljevaka

Za izradu oba odljevka korišten je isti model za izradu kalupa.

Dimenzije modela su sljedeće:

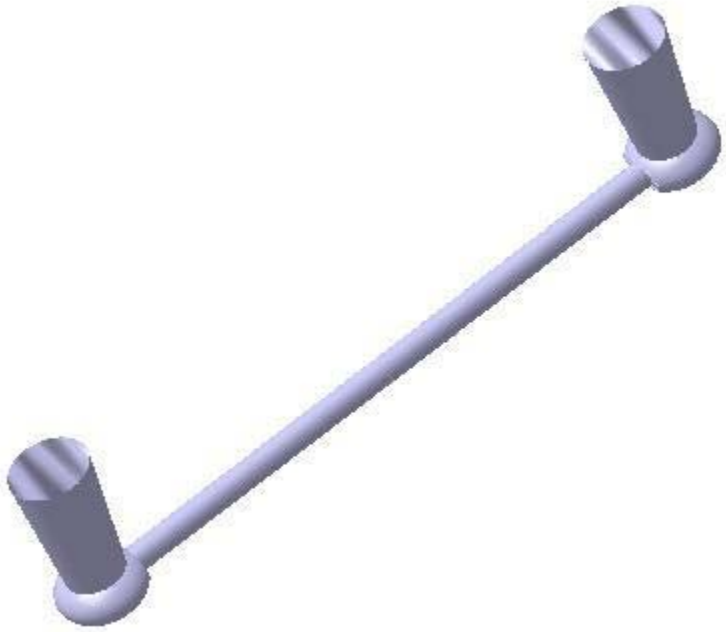
- šipka: Φ20 x 450 mm
- pojilo: Φ45 x 100 x Φ60 mm
- spust: Φ45 x 100 x Φ60 mm.

Računalni model odljevka koji je potrebno izraditi prikazan je na slici 22.



Slika 22. Model odljevka

Računalni model odljevka s pojilom i spustom prikazan je na slici 23.



Slika 23. Računalni model odljevka s pojilom i spustom

6.1.2. Izrada kalupa

Postupak lijevanja vršio se u dva kalupa izrađena na isti način.

Najprije se izrađivala donja polovica kalupa (donjak). Model se postavio u okvir donjaka te se kalupna mješavina nasipavala na model. Prvo se nasipavao modelni pijesak prikazan na slici 24, koji osigurava točnost oblika odljevka. Na njega se kalup nadopunio pijeskom prikazanim na slici 25, koji je već ranije korišten za izradu pješčanog kalupa. Nakon popunjavanja kalupa slijedi sabijanje kalupne mješavine prikazano slikom 26.

Slika 24. Nasipavanje modelnog pijeska

Slika 25. Nasipavanje već korištenog pijeska

Slika 26. Sabijanje kalupne mješavine donjaka

Nakon izrade donjaka, slijedi izrada gornje polovice (gornjaka). Donjak se okreće za 180 ° te se na njega postavlja okvir gornjaka. U gornjak se postave modeli za spust i pojilo prikazani na slici 27. Ponovno se nasipava kalupna mješavina na isti način kao i za donjak. Nakon popunjavanja gornjaka, slijedi sabijanje kalupne mješavine prikazano slikom 28, te uklanjanje modela spusta i pojila.

Slika 27. Postavljanje modela spusta i pojila

Slika 28. Sabijanje kalupne mješavine gornjaka

Nakon uklanjanja modela, potrebno je oblikovati spust prikazan slikom 29.

Slika 29. Donjak nakon oblikovanja spusta

Konačan izgled gornjaka prikazan je na slici 30.

Slika 30. Gornjak

Sklapanjem donjaka i gornjaka dobije se gotov jednokratni pješčani kalup prikazan na slici 31.

Slika 31. Jednokratni pješčani kalup

6.1.3. Lijevanje odljevaka

Taljenje legura vršilo se u elektrootpornoj peći prikazanoj na slici 32. Tako zagrijane taljevine prenosile su se lijevačkim loncem do kalupa gdje su se ulijevale u kalupnu šupljinu. Prvo se talila legura AlSi12, a potom AlSi12CuNiMg.

Slika 32. Peć za taljenje

6.1.3.1. Prvi odljevak

U ljevački lonac (kapaciteta ~1,2 L) stavljaju se blokovi AlSi12 legure prikazani na slici 33. Lonac se stavlja u elektrootpornu peć gdje se legura grije i tali, što je prikazano na slici 34. Nakon što taljevina dosegne temperaturu od 660 ˚C, spremna je za lijevanje. Uređaj za mjerenje temperature naziva se pirometar i prikazan je na slici 35.

Slika 33. Blokovi AlSi12 legure

Slika 34. Taljevina AlSi12 legure u peći

Slika 35. Mjerenje temperature pirometrom

Obzirom da je udaljenost između peći i kalupa dosta velika, postoji mogućnost da se legura previše ohladi. Zato se neposredno prije ulijevanja ponovno mjeri temperatura taljevine, što prikazuje slika 36.

Slika 36. Mjerenje temperature taljevine neposredno prije ulijevanja u kalup

Nakon što se utvrdi zadovoljavajuća temperatura, taljevina se ulijeva u kalup, što je prikazano slikom 37.

Slika 37. Ulijevanje taljevine u kalup

6.1.3.2. Drugi odljevak

U lonac se stavljaju komadi AlSi12CuNiMg legure te se lonac umeće u elektrootpornu peć, što prikazuje slika 38. Ponovno se pirometrom mjeri temperatura taljevine. Izmjerena temperatura u ovom slučaju malo je viša od temperature koju je nakon grijanja imala AlSi12 legura. Izmjerena temperatura od 697 °C prikazana je na slici 39.

Slika 38. Umetanje lonca u elektrootpornu peć

Slika 39. Očitavanje temperature taljevine

Ulijevanje taljevine u kalup prikazano je na slici 40.

Slika 40. Ulijevanje rastaljene AlCuMgSi legure u kalup

Slika 41 prikazuje kalup ispunjen taljevinom.

Slika 41. Kalup ispunjen taljevinom

6.1.4. Vađenje odljevaka

Nakon hlađenja taljevine u kalupu, potrebno je rastresavanje kalupa. Postupak rastresavanja prikazan je slikom 42.

Slika 42. Rastresavanje kalupa

Nakon rastresavanja dobiven je odljevak kojeg je potrebno mehanički obraditi kako bi se dobio željeni oblik šipke. Mehanički neobrađen odljevak nakon lijevanja prikazan je na slici 43.

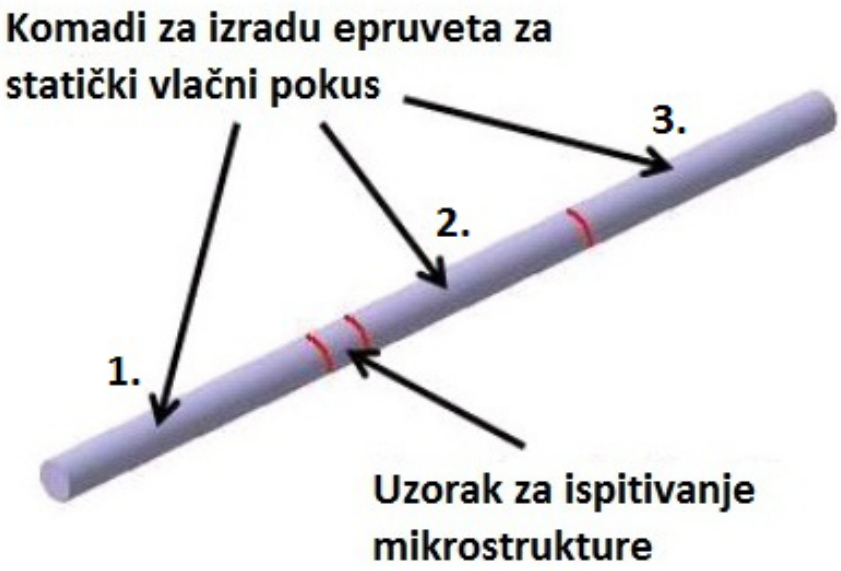
Slika 43. Odljevak

6.2. Metalografska ispitivanja

Metalografska ispitivanja svjetlosnim mikroskopom izvršena su u Laboratoriju za metalografska ispitivanja, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

6.2.1. Priprema uzoraka

Nakon što su uklonjeni spust i pojilo strojnom obradom, iz odljevaka su izdvojeni uzorci za mehaničko i metalografsko ispitivanje. Slika 44 prikazuje dijelove koji se izdvajaju za mehaničko i metalografsko ispitivanje.



Slika 44. Dijelovi izdvojeni za pojedino ispitivanje;
1. prvi uzorak, 2. drugi uzorak, 3. treći uzorak

Za ispitivanje mikrostrukture koristi se uzorak prikazan na slici 45.

Slika 45. Uzorak za ispitivanje mikrostrukture (Φ20 x 10 mm)

Kako bi se uzorci zaštitili od vanjskih utjecaja, čuvaju se u posebnim posudama prikazanima na slici 46.

Slika 46. Posude za zaštitu uzoraka

Standardni postupak pripreme uzoraka:

- brušenje
- poliranje
- nagrizanje.

Brušenje uzoraka izvršeno je na stroju „Phoenix Alpha – grinder/polisher“ proizvođača Buehler. Brušenje je izvedeno vodootpornim brusnim papirima sa brusnim zrnima od silicijevih karbida u četiri koraka sa izmjenama papira: P320, P600, P1200 i P2400. Stroj za brušenje prikazan je na slici 47, a brusni papir na slici 48.

Slika 47. Stroj za brušenje ispitnih uzoraka

Slika 48. Brusni papir

Nakon svake izmjene papira, uzorci su zakretani za 90° radi uklanjanja tragova prethodnog brušenja.

Brušenje je izvršeno pri 300 min^{-1}, a kao sredstvo za hlađenje korištena je voda.

Prije poliranja, uzorci su očišćeni u ultrazvučnoj čistilici prikazanoj na slici 49.

Slika 49. Ultrazvučna čistilica

Poliranje ispitnih uzoraka obavljeno je uređajem „Struers DAP-V“ prikazanim na slici 50, pri brzini 150 okr^{-1}. Uzorci su polirani dijamantnim pastama prikazanim na slici 51. Za poliranje se koristila tkanina „MD-MOL“, a kao sredstvo za hlađenje tekućina „DP-Lubricant-Red“ prikazana na slici 52.

Slika 50. Uređaj za poliranje

Slika 51. Dijamantne paste

Slika 52. Sredstvo za hlađenje pri poliranju

Nagrizanje uzoraka u trajanju od 15 sekundi po uzorku, vršeno je u smjesi kiselina:

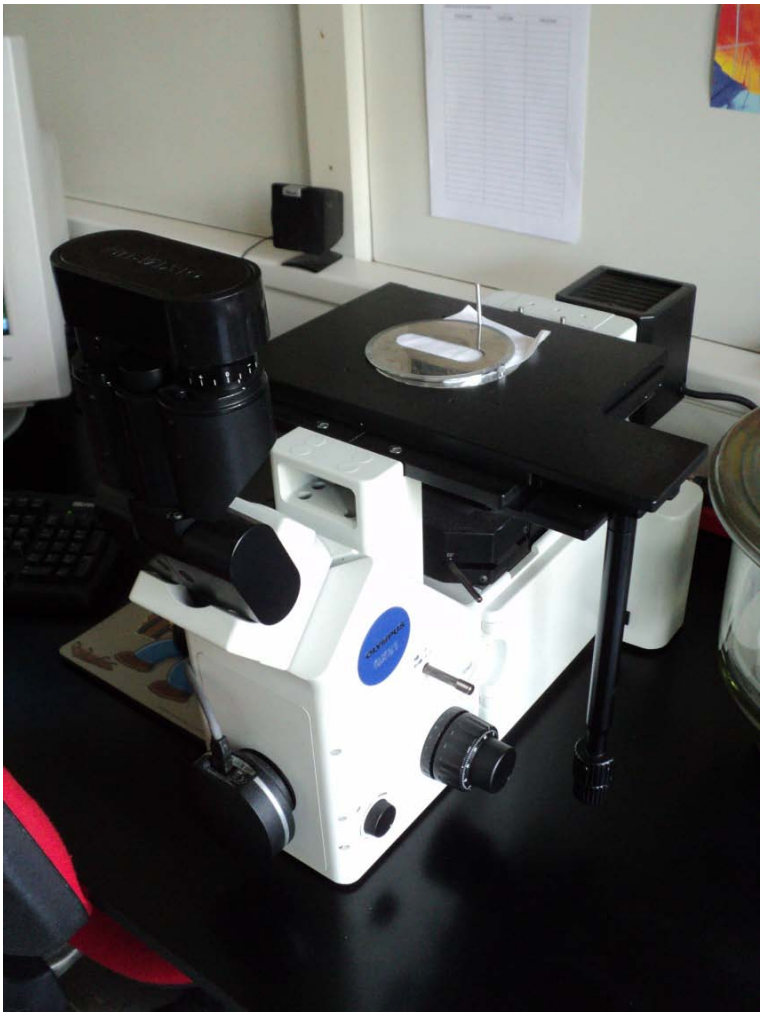
- 1 ml HF
- 3 ml HCl
- 5 ml HNO3
- 191 ml H2O.

Na slici 53 prikazan je odjeljak s kemikalijama Laboratorija za materijalografiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

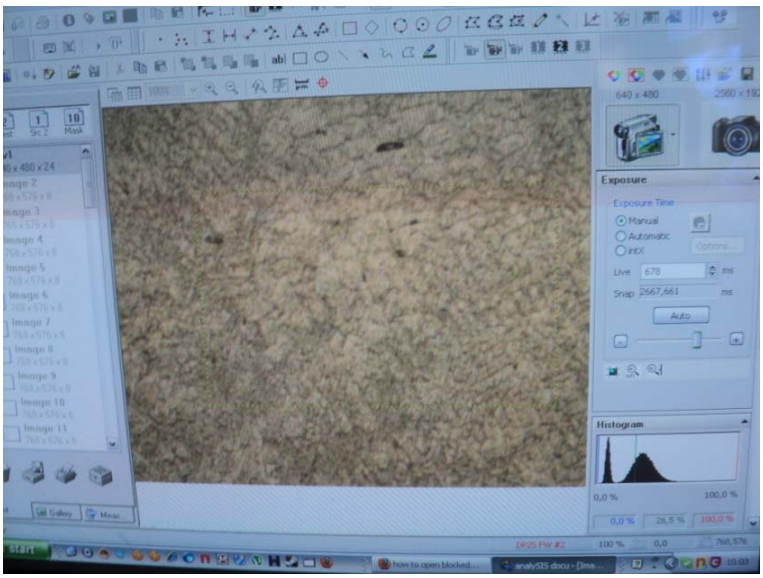
Slika 53. Odjeljak s kemikalijama

6.2.2. Ispitivanje mikroskopom

Na slici 54 prikazan je svjetlosni mikroskop „Olympus 6X S1“ koji je korišten za metalografska ispitivanja. Opremljen je kamerom i povezan s računalom pa je mikrostrukturu moguće vidjeti i na računalu, što prikazuje slika 55.



Slika 54. Svjetlosni mikroskop



Slika 55. Prikaz mikrostrukture na računalu

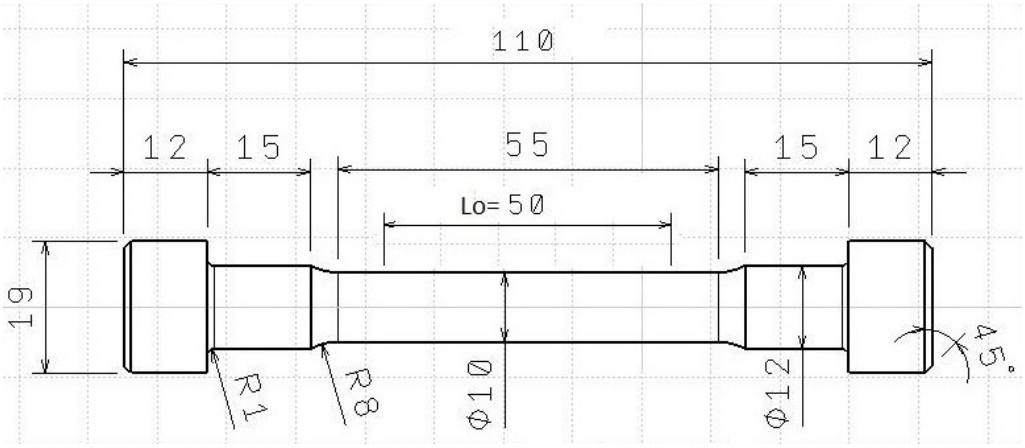
6.3. Mehanička ispitivanja na kidalici

Mehanička ispitivanja na kidalici provedena su u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

6.3.1. Izrada epruveta

Epruvete potrebne za provedbu statičkog vlačnog pokusa na kidalici izrađene su strojnom obradom iz izdvojenih komada odljevaka prikazanih na slici 44. Iz odljevka od AlSi12 legure izrađene su dvije epruvete, a iz odljevka od AlSi12CuNiMg legure tri epruvete. Epruveta za vlačna ispitivanja prikazana je na slici 56, a njene dimenzije na slici 57.

Slika 56. Epruveta za vlačna ispitivanja na kidalici



Slika 57. Dimenzije epruvete za vlačna ispitivanja

6.3.2. Ispitivanja na kidalici

Mehanička ispitivanja provedena su na hidrauličkoj kidalici „WEB WPM“, nazivne sile 400 kN. Mjerni sustav kidalice je pretvornik sile. Kidalica je povezana s računalom, gdje je moguće vidjeti rezultate ispitivanja. Hidraulička kidalica prikazana je na slici 58.

Slika 58. Hidraulička kidalica

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

- dvije epruvete AlSi12 legure
- tri epruvete AlSi12CuNiMg legure.

Pozicija epruvete na kidalici prikazana je slikom 59.

Slika 59. Pozicija epruvete na kidalici

Mjesto loma druge ispitne epruvete od AlSi12CuNiMg legure prikazan je na slici 60.

Slika 60. Mjesto loma druge ispitne epruvete od AlSi12CuNiMg legure

6.4. Radiografska ispitivanja

Radiografsko ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Bilo je potrebno ispitati valjanost uzoraka obzirom na poroznost u strukturi materijala.

6.5. Kemijska analiza

Kvantitativna kemijska analiza napravljena je u Laboratoriju za analizu metala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Rezultati su dobiveni metodom optičke emisijske spektroskopije na uređaju GDS 850A, proizvođača Leco.

7. REZULTATI I RASPRAVA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati kemijske analize te rezultati metalografskih, radiografskih i mehaničkih ispitivanja nad legurama AlSi12 i AlSi12CuNiMg. Nadalje su rezultati objašnjeni te izvedeni zaključci.

7.1. Rezultati kemijske analize

Kemijskom analizom AlSi12 legure ustanovljen je sljedeći sastav:

- 88,43 % Al
- 11,38 % Si
- 0,164 % Fe
- 0,02 % Cu.

Rezultati kemijske analize AlSi12 legure prikazani su slikom 61.

LECO Corporation - GDS

AlSi12 -04.07.2012

Name: AlSi12 Type: SMP

Calc Mode: Concentration Date: 07/04/12 11:30:46

Analytes	AVG	STD	RSD	Burn 1	Burn 2	Burn 3
Al (%)	88.43	0.007	0.008	88.43	88.42	88.43
Si (%)	11.38	0.007	0.062	11.38	11.38	11.37
Fe (%)	0.164	0.004	2.925	0.159	0.167	0.167
Cu (%)	0.02	0.001	2.739	0.02	0.02	0.02
Mn (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg (%)	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00
Ni (%)	0.00	0.002	54.275	0.01	0.00	0.00
Zn (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sn (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ti (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr (%)	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00
Vacuum	3.046	0.003	0.130	3.051	3.044	3.044
Voltage	1198	0.065	0.005	1198	1198	1198
Current	44.876	0.000	0.000	44.876	44.876	44.876

Slika 61. Rezultati kemijske analize AlSi12 legure

Rezultati kemijske analize AlSi12CuNiMg legure dobiveni iz Laboratorija za analizu metala prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Rezultati kemijske analize AlSi12CuNiMg legure

Uzorak	%								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Al
AlSi12CuNiMg	11,2	0,75	1,19	0,05	1,04	0,01	0,83	0,07	ostatak

U tablici 7 prikazan je maseni udio pojedinih elemenata u AlSi12CuNiMg leguri prema normi EN1706 .

Tablica 7. Maseni udjeli pojedinih elemenata u AlSi12CuNiMg leguri prema normi EN1706

Legirna grupa			AlSiCuNiMg
Legirna oznaka	**Numerička oznaka**		EN AC-48000
	Kemijski simbol		EN AC-AlSi12CuNiMg
Kemijski sastavi izraženi u masenim udjelima (%)	Si		10,5 – 13,5
	Fe		0,7 (0,6)
	Cu		0,8 – 1,5
	Mn		0,35
	Mg		0,8 – 1,5 (0,9 – 1,5)
	Cr		-
	Ni		0,7 – 1,3
	Zn		0,35
	Pb		-
	Sn		-
	Ti		0,25 (0,2)
	Druge primjese	pojedinačno	0,05
		ukupno	0,15
	Aluminij		ostatak

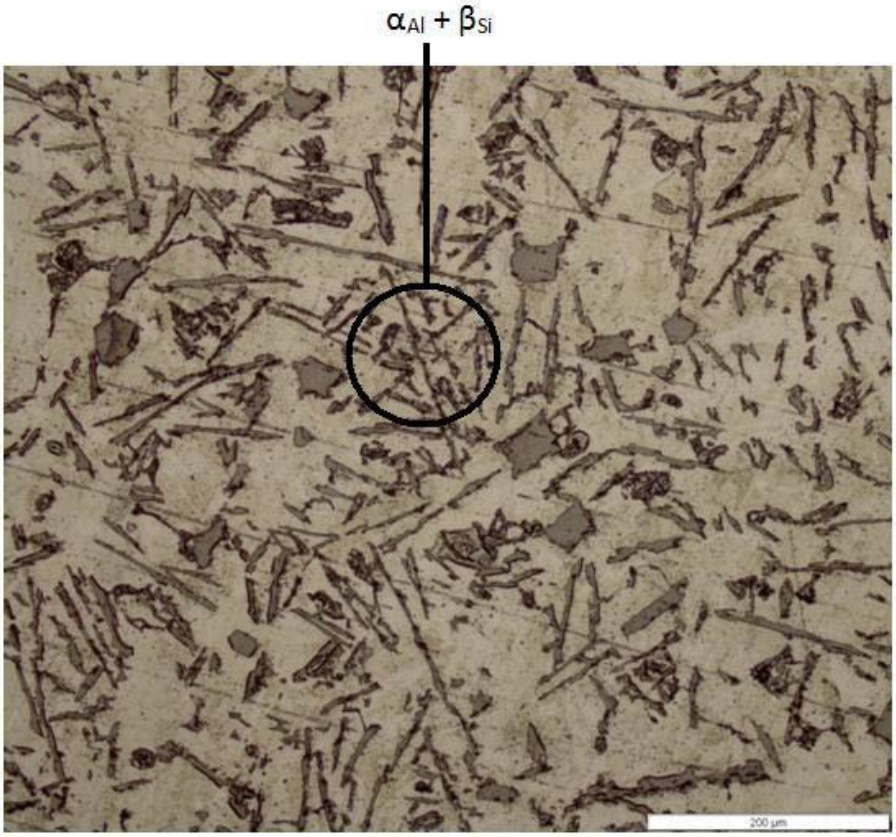
Uspredivši kemijske sastave dobivene kemijskom analizom s onima prikazanima u normi EN1706, može se uočiti da ispitivana AlSi12CuNiMg legura:

- sadržava puno manji maseni udio mangana (Mn) i cinka (Zn)
- sadržava povećani maseni udio željeza (Fe)
- sadržava neznatan maseni udio kroma (Cr)
- uopće ne sadržava maseni udio titana (Ti)

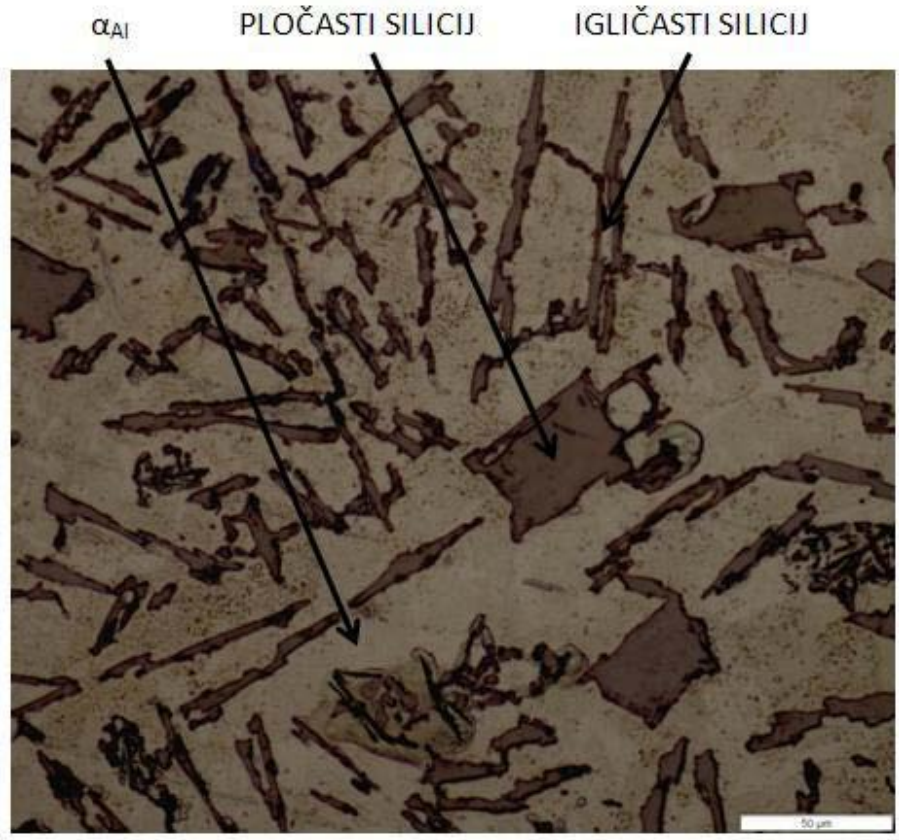
Ostali maseni udjeli zadovoljavaju normu EN1706.

7.2. Rezultati metalografskih ispitivanja

Pregledom ispitnih uzoraka svjetlosnim mikroskopom, dobivena mikrostruktura AlSi12 legure prikazana je na slikama 62 i 63.



Slika 62. Mikrostruktura AlSi12 legure (povećanje 200x)



Slika 63. Mikrostruktura AlSi12 legure (povećanje 500x)

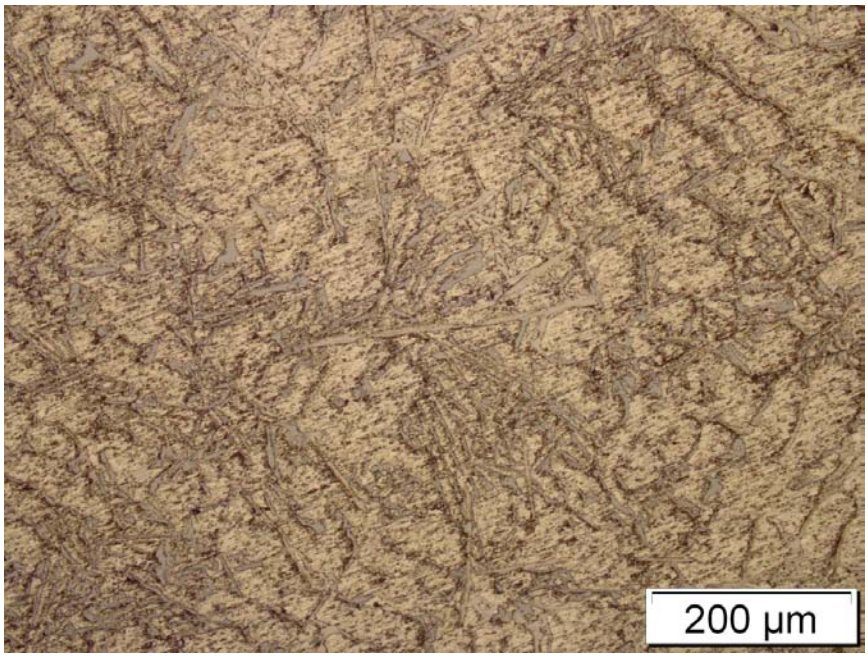
Na snimci mikrostrukture nemodificirane AlSi12 legure (slike 60 i 61) mogu se uočiti:

- eutektik ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$)
- primarni aluminij α_{Al}
- igličasti eutektički silicij
- primarni pločasti silicij.

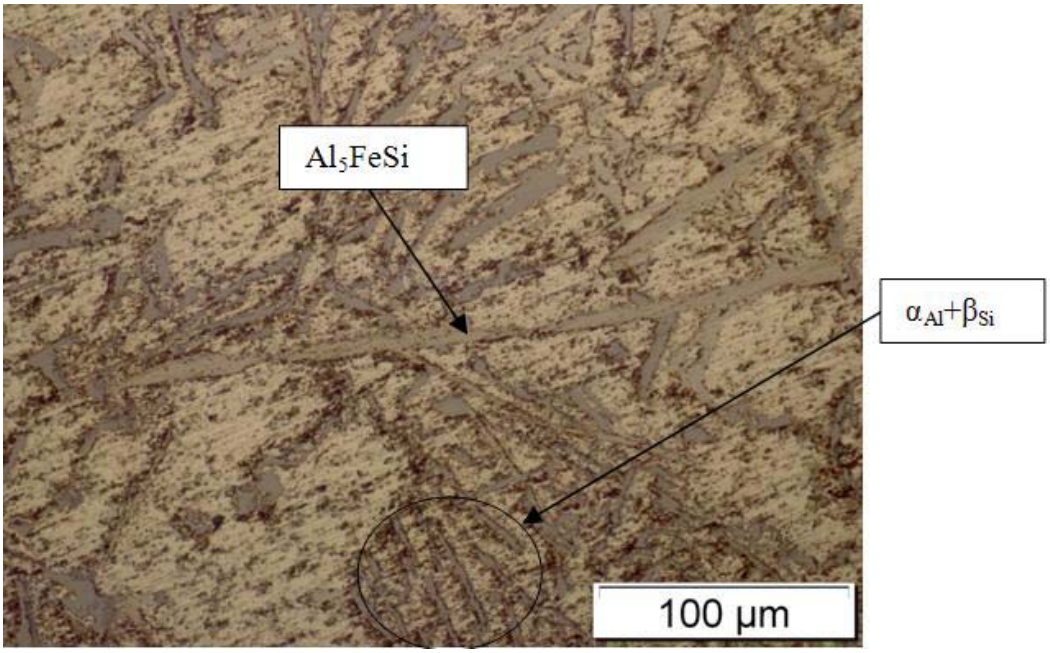
Primarni aluminij je na slikama svijetle smeđe boje, a silicij je tamnije smeđe-sive boje. Eutektički silicij u morfologiji nemodificirane AlSi12 legure je krupan i igličast, što je nepovoljno po mehanička svojstva legure.

Mikrostruktura AlSi12CuNiMg legure ispitivala se na istom uzorku na dva različita mjesta i prizakana je na slikama 64-67.

Prvo mjesto snimanja

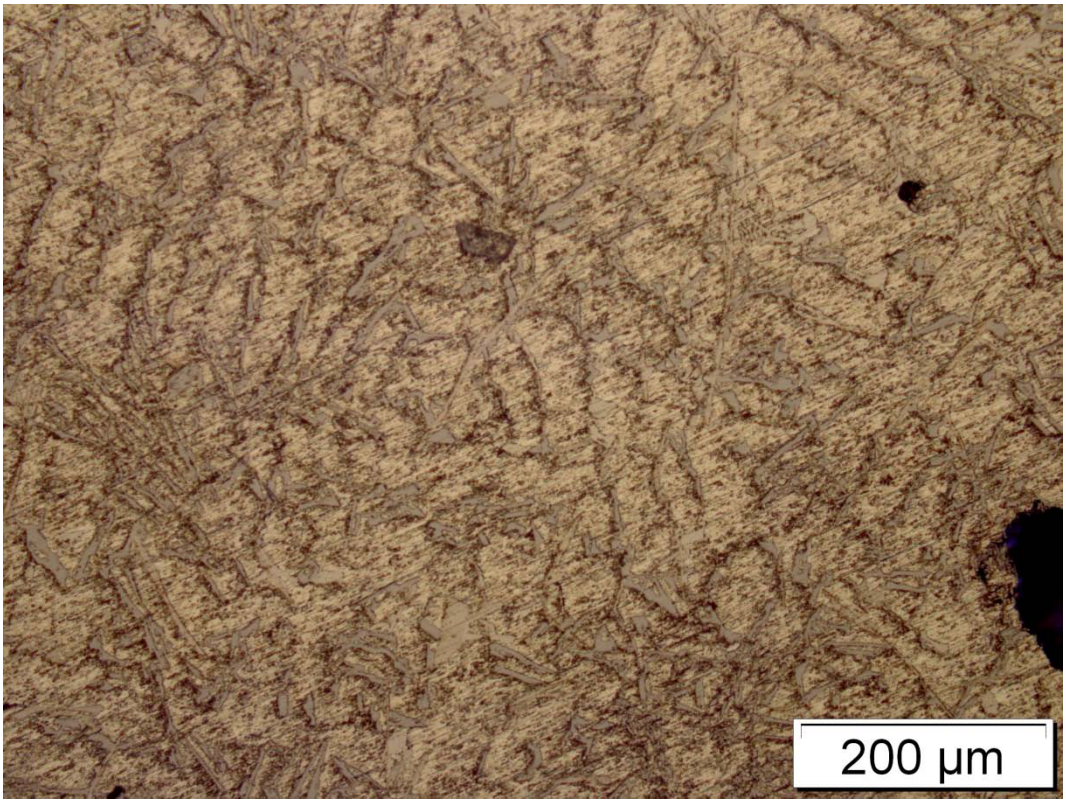


Slika 64. Mikrostruktura AlSi12CuNiMg legure (povećanje 200 x) – prvo mjesto snimanja

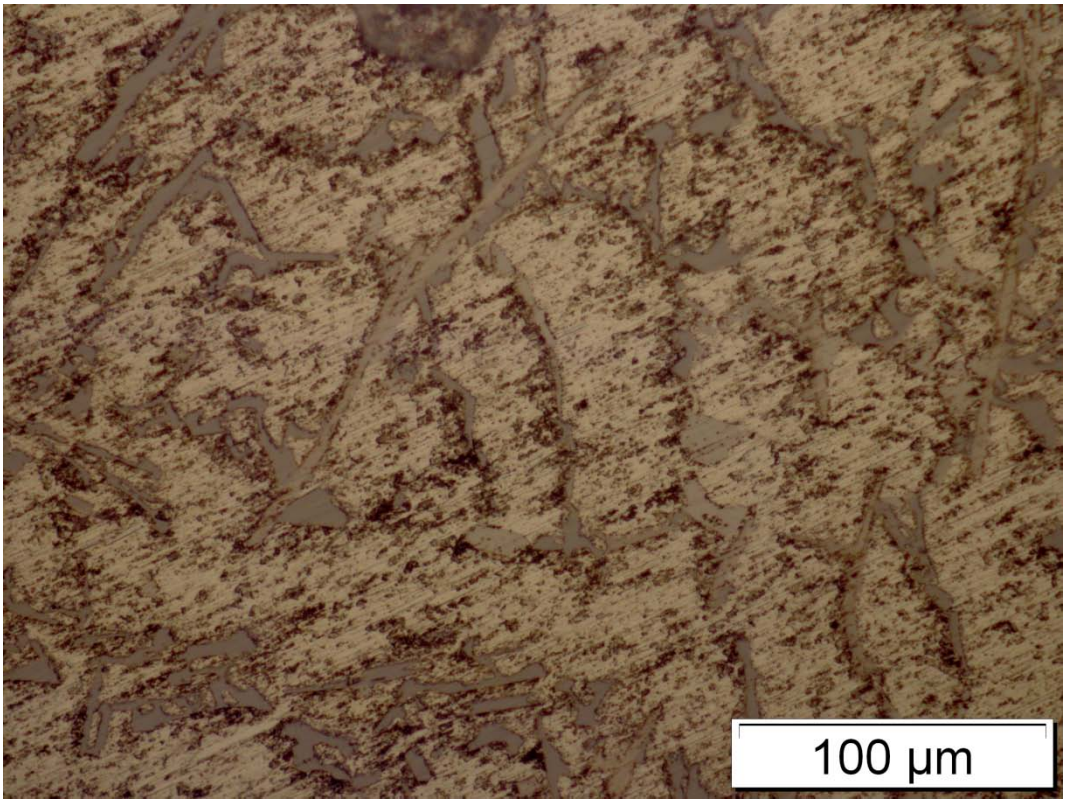


Slika 65. Mikrostruktura AlSi12CuNiMg legure (povećanje 500 x) – prvo mjesto snimanja

Drugo mjesto snimanja



Slika 66. Mikrostruktura AlSi12CuNiMg legure (povećanje 200 x)



Slika 67. Mikrostruktura AlSi12CuNiMg legure (povećanje 500 x)

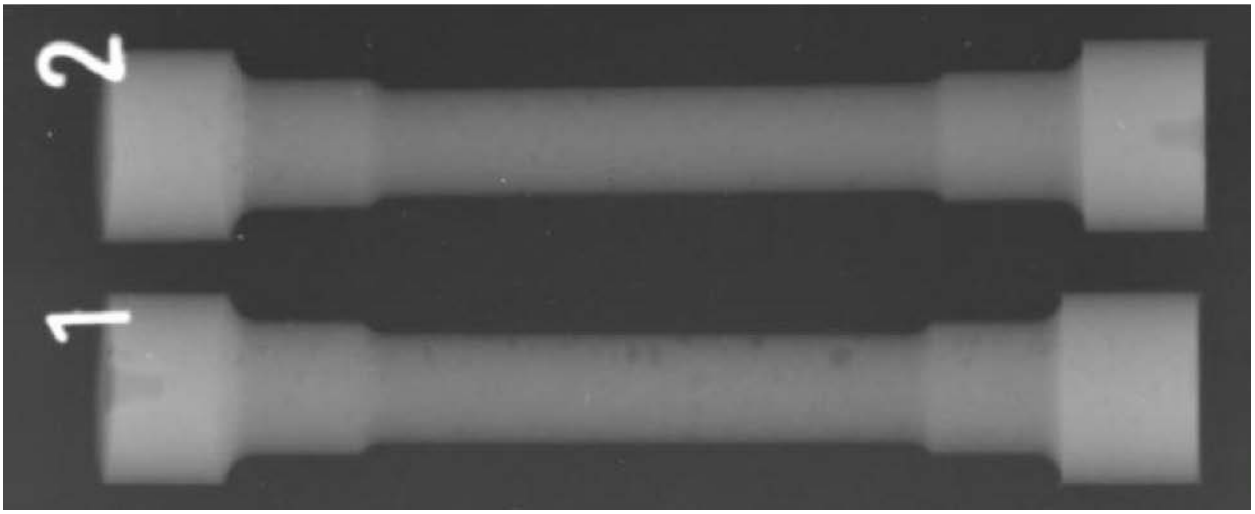
Iz slika 64 – 67 moguće je vidjeti sljedeće faze prisutne u ispitanoj AlSi12CuNiMg leguri:

- α_{Al}
- $\alpha_{Al}+\beta_{Si}$
- Al_5FeSi

Trebale bi biti prisutne i magnezijeve faze po granama zrna (crne nakupine) i/ili bakrene faze (bijele grozdaste nakupine), koje se na slikama ne vide zbog prenagriženosti uzoraka.

7.3. Rezultati radiografskog ispitivanja

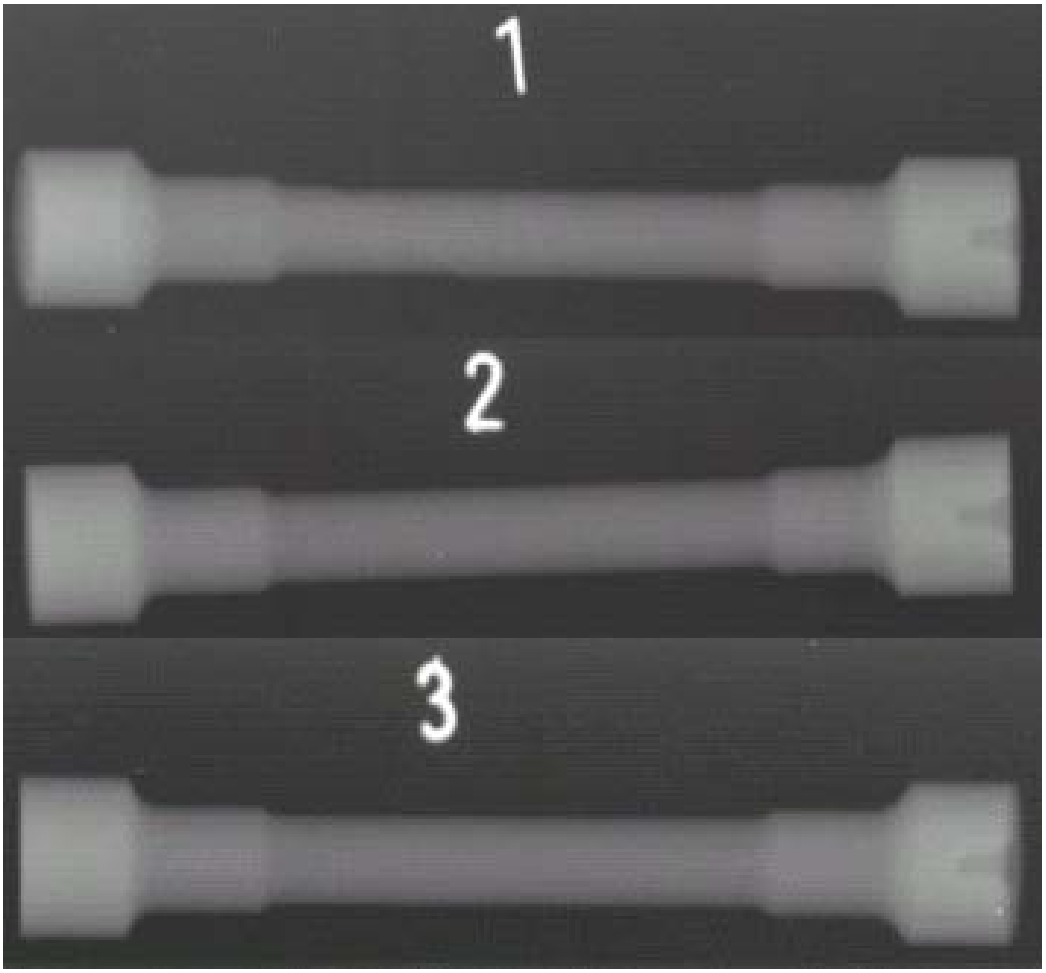
Radiografskom kontrolom ispitnih epruveta za mehanička ispitivanja dobiveni radiogram AlSi12 legure prikazan je na slici 68.



Slika 68. Radiogram epruveta od AlSi12 legure

Iz radiograma AlSi12 legure mogu se vidjeti male tamne pjege zacrnjenja koje predstavljaju poroznost u materijalu. Uzrokovane su ulaskom plinova prilikom taljenja ili lijevanja u kalup.

Radiogram AlSi12CuNiMg legure prikazan je slikom 69.



Slika 69. Radiogram epruveta od AlSi12CuNiMg legure

Iz radiograma epruveta od AlSi12CuNiMg legura (slika 69) ne vide se nikakve poroznosti unutar materijala, što znači da je tehnika lijevanja ispravna te izradak zadovoljava potrebe daljnjeg ispitivanja.

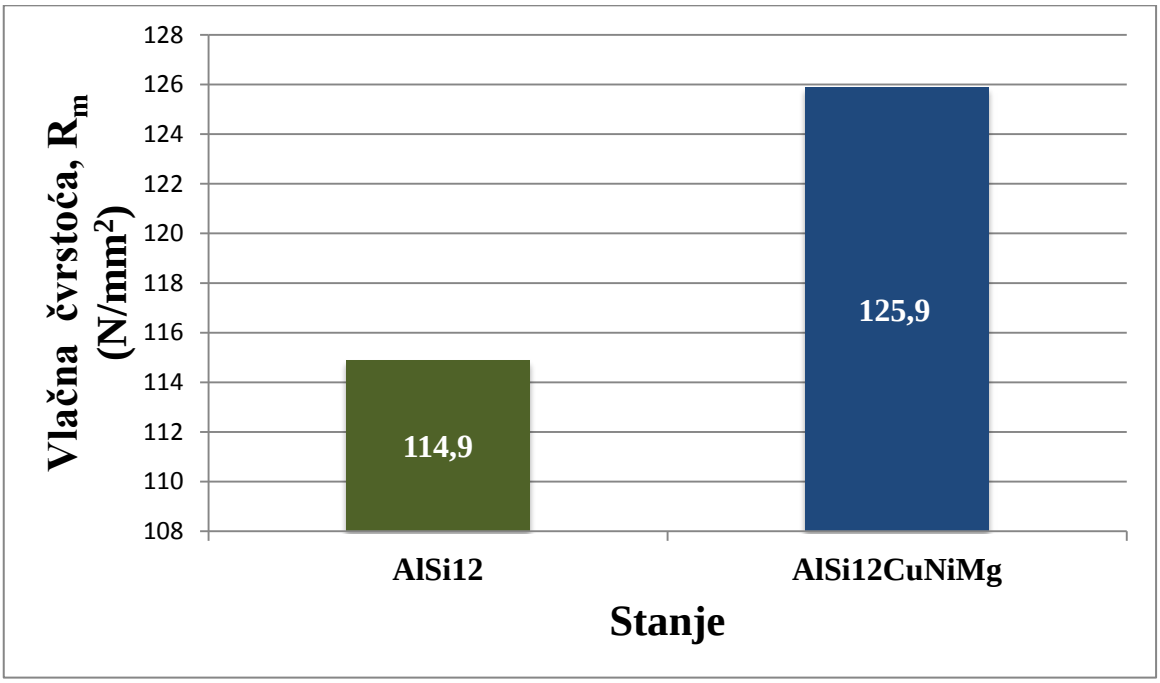
7.4. Rezultati mehaničkih ispitivanja

Provedbom statičnog vlačnog pokusa na ispitnim epruvetama dobiveni su rezultati u tablici 8.

Tablica 8. Vlačne čvrstoće i istezljivosti AlSi12 i AlSi12CuNiMg legura

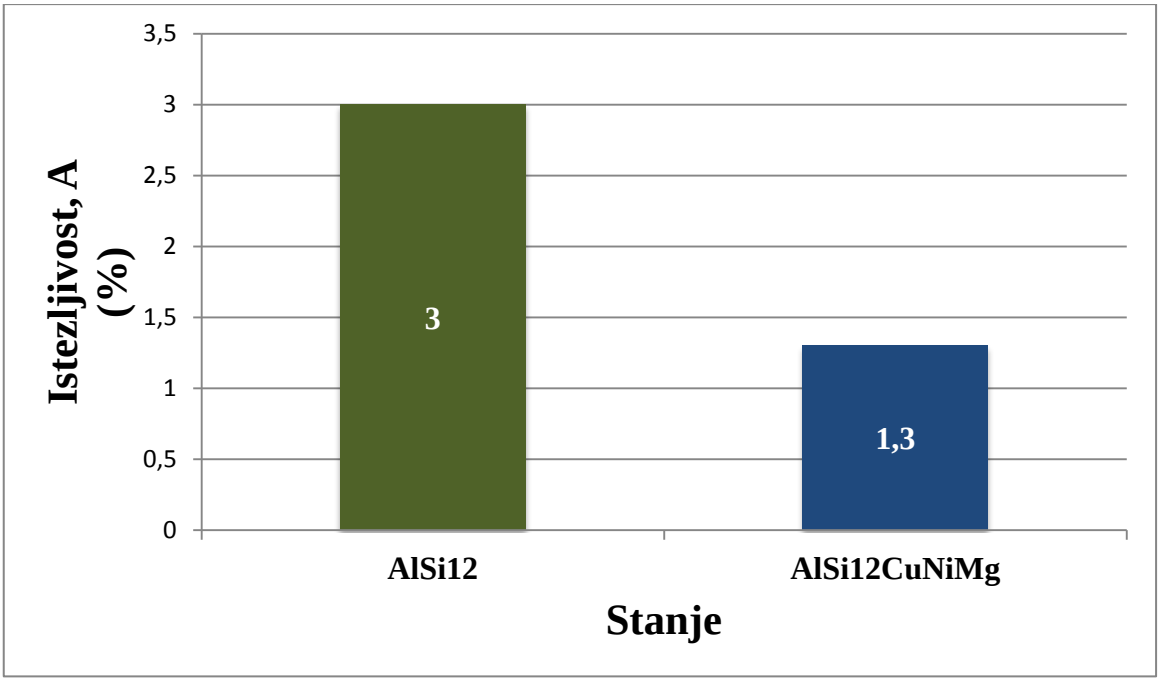
Stanje	**Epruveta**	**Vlačna čvrstoća, R_m (N/mm^2)**	**Istezljivost, A (%)**	**Srednje vrijednosti**	
				$R_{m\text{-}srednje}$ (N/mm2)	**$A_{srednje}$ (%)**
AlSi12 legura	1.1	115,5	3,4	114,9	3
	1.2	114,3	2,6		
AlSiCuNiMg legura	7.1	125,8	1,4	125,9	1,3
	7.2	125,3	1,2		
	7.3	126,6	-		

Na slici 70 nalazi se grafički prikaz srednjih vrijednosti vlačnih čvrstoća ispitivanih legura.



Slika 70. Grafički prikaz srednjih vrijednosti vlačnih čvrstoća ispitivanih legura

Na slici 71 nalazi se grafički prikaz srednjih vrijednosti istezljivosti ispitanih legura.



Slika 71. Grafički prikaz srednjih vrijednosti istezljivosti ispitivanih legura

Na temelju rezultata dobivenih statičkim vlačnim pokusom, može se zaključiti da ispitana legura AlSi12CuNiMg legura obzirom na AlSi12 leguru ima:

- veću vlačnu čvrstoću za 11 N/mm^2
- puno manju istezljivost (za 1,7 %)

8. ZAKLJUČAK

Aluminijske legure za rad pri povišenim temperaturama najviše su zastupljene u automobilskoj industriji za izradu dijelova motora sa unutarnjim izgaranjem (blokovi motora, klipovi, košuljice cilindara itd.). Svojom malom gustoćom, toplinskom otpornosti i malom toplinskom rastezljivosti postaju idealna zamjena za odljevke od željeznih lijevova.

U radu su uspoređene: osnovna legura za kokilni lijev (AlSi12) i legura za izradu klipova (AlSi12CuNiMg). Usporedba je izvršena na temelju mikrostrukture i mehaničkih svojstava.

U mikrostrukturi AlSi12 legure javljaju se faze: eutektik (α_{Al} + β_{Si}), primarni aluminij (α_{Al}), igličasti eutektički silicij i primarni pločasti silicij. U mikrostrukturi AlSi12CuNiMg legure javljaju se faze: primarni aluminij (α_{Al}), eutektik (α_{Al} + β_{Si}), intermetalna faza Al_5FeSi te magnezijeve i bakrene faze. Magnezijeve i bakrene faze nisu vidljive na snimci uzorka zbog prenagriženosti uzorka.

Mehanička ispitivanja pokazala su povećanje vlačne čvrstoće te znatno smanjenje istezljivosti prilikom legiranja aluminijskih legura bakrom, niklom i magnezijem. Dodatkom navedenih elemenata, osim na sobnoj temperaturi, dobra mehanička svojstva zadržavaju se i na povišenim temperaturama do ~ 200 °C.

LITERATURA

[1] Bonačić Mandinić, Z.; Budić, I.: *Osnove tehnologije kalupljenja*, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2001.

[2] Dostupno na: http://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/15_02_2010__11943_ljevarstvo-proiz-post-2009.pdf (27.8.2012.)

[3] Dostupno na: http://www.kupres.de/novosti/2004/zvona/lijevanje_bronze_u_kalup.jpg (27.8.2012.)

[4] Dostupno na: http://image.made-in-china.com/2f0j00dBIElpPgHCbH/Auto-Parts-Casting-Vehicle-Car-Parts.jpg (27.8.2012.)

[5] Dostupno na: http://www.btinternet.com/~bodgerjim/stat/found19.jpg (28.8.2012.)

[6] Dostupno na: http://i1221.photobucket.com/albums/dd474/darkoford1/k2.jpg (28.8.2012.)

[7] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1982.

[8] Brcko, B.: *Modifikacija eutektičkog silica u Al-Si legurama*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

[9] Dostupno na: http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zm/pdf/nastava/tehnologija_obrade_I/podloge/Tehnologija%20obrade%20I-Podloge-3.dio.pdf (28.8.2012.)

[10] Ljevački priručnik, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, 1985.

[11] Glavaš, Z.: *Analiza grešaka na odljevcima*, Metalurški fakultet, Sisak, 2009.

[12] Dostupno na: http://www.saunalahti.fi/animato/3003/PICT0084.JPG (29.8.2012.)

[13] Dostupno na: http://hr.wikipedia.org/wiki/Aluminij

[14] Dostupno na: http://www.scribd.com/doc/64729283/28/Svojstva-aluminija-i-aluminijskih-legura (29.8.2012.)

[15] Dostupno na: http://images-of-elements.com/aluminium-2.jpg (29.8.2012.)

[16] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2002.

[17] Dostupno na: http://bs.wikipedia.org/wiki/Boksit (3.9.2012.)

[18] Dostupno na: http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/spojevi.html (3.9.2012.)

[19] Dostupno na: http://3.bp.blogspot.com/-spD-0o4bdr8/T_a5kFyRw7I/AAAAAAAAAJs/TQYe_hR32u8/s1600/aluminum.jpg (3.9.2012.)

[20] Dostupno na: http://www.southampton.ac.uk/~engmats/xtal/crystal/crystal.html (3.9.2012.)

[21] Dostupno na: http://earth911.com/wp-content/uploads/2008/09/soda-can.jpg (3.9.2012.)

[22] Dostupno na: http://mmg.materials.drexel.edu/wiki/images/c/ce/Al-Mg_phase_diagram.png (3.9.2012.)

[23] Dostupno na: http://v.castelhano.free.fr/probatoire/e_dur_structural_fichiers/image002.gif (4.9.2012.)

[24] Dostupno na: http://www.globalsino.com/micro/1/images/1micro9989.gif (4.9.2012.)

[25] Dostupno na: http://hr.wikipedia.org/wiki/Precipitacijsko_o%C4%8Dvr%C5%A1%C4%87ivanje (5.9.2012.)

[26] M.Galić, *Proizvodnja metalnih odljevaka*, HULJ, Zagreb, 2008.

[27] D.A. Porter, K.E. Easterling: *Phase Transformations in Metals and Alloys*, Chapman&Hall, Second Edition, London, 1992.

[28] I. Mihalic, I. Mance, I. Kramer, B. Bauer: *Aluminijske legure za rad na povišenim temperaturama*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska

[29] D. Stanić, Z. Zovko Brodarac, F. Unkić, *Mikrostrukturna i mehanička svojstva kokilno lijevanih uzoraka AlSi7Mg legure*, 9th International foundrymen conference, Opatija, 2009.

[30] Z. Asghar, G. Requena, F. Kubel, The role of Ni and Fe aluminides on the elevated temperature strenght of AlSi alloy, *Materials Science and Engineering A* 527 (2010), 5691-5698.

[31] J. Jorstad, D. Apelian, Hypereutectic Al-Si alloys: *Practical casting considerations*, International Journal of Metalcasting, 6 (2009), 13-36.

[32] T. Kvackaj: *Aluminium alloys, theory and application*, InTech, 2011.

[33] Tufegdžić, Đ.: *Aluminijum i legure aluminijuma*, Savez inženjera i tehničara Jugoslavije, 1988.

[34] J.G. Kaufman, E.L. Rooy, Aluminum alloy castings- Properties, Processes and Applications, ASM International, Materials Park, Ohio, 2005.