

# Određivanje sklonosti toplim pukotinama aluminijskih legura metodom lijevanja prstena

---

**Marasović, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski 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:235:035495>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-15**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**DIPLOMSKI RAD**

Ivan Marasović

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

Ivan Marasović

Zagreb, 2012.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Branku Baueru na pruženoj stručnoj pomoći i savjetima pri pisanju rada te pri analizi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se mag. ing. Ivani Mihalic na pomoći pri izradi rada, svjetima te pomoći oko pronalaženja tražene literature.

Posebno zahvala mojoj obitelji na svestranoj pomoći.

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

Ivan Marasović

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. SKRUĆIVANJE METALA I LEGURA.....	2
2.1. Nukleacija.....	4
2.1.1. Homogena nukleacija .....	4
2.1.2. Heterogena nukleacija .....	5
2.2. Rast kristala.....	6
2.2.1. Razvoj dendritne mikrostrukture.....	7
2.2.2. Razvoj eutektičke mikrostrukture.....	9
2.3. Skrućivanje odljevaka od podeutektičkih Al-Si legura .....	11
3. ALUMINIJ .....	13
3.1. Primjena aluminija .....	14
3.2. Aluminijske legure .....	15
3.2.1. Označavanje legura aluminija prema HRN [24] .....	16
3.2.2. Al-Si legure .....	16
3.2.2.1. Podeutektičke Al-Si legure .....	16
3.2.2.2. Eutektičke Al-Si legure .....	17
3.2.2.3. Nadeutektičke Al-Si legure.....	18
3.2.3. Aluminij-magnezij (Al-Mg) .....	19
3.2.4. Aluminij-bakar (Al-Cu).....	21
3.2.5. Trokomponentni legirni sustavi .....	22
Legure Al-Zn-Si .....	22
4. TOPLE PUKOTINE .....	23
4.1. Mehanizam nastanka.....	24
4.2. Čimbenici koji utječu na sklonost legure tvorbi toplih pukotina .....	25
4.2.1. Kemijski sastav legure.....	26
4.2.2. Veličina zrna.....	26
4.2.3. Temperatura uljevanja.....	27
4.2.4. Brzina ohlađivanja.....	27
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	28
5.1. Kemijski sastav legura .....	28
5.2. Priprema istraživanja .....	29
5.3. Izrada modela prstena, jezgri i hladila .....	32
5.4. Izrada kalupa.....	33

---

5.4.1. Izrada kalupa za pretpokus .....	33
5.4.2. Izrada kalupa za pokus .....	36
5.5. Lijevanje .....	37
5.5.1. Pretpokus sa legurama AlSi12 i AlMg1 .....	37
5.5.1.1. Lijevanje legure AlSi12 .....	37
5.5.1.2. Lijevanje legure AlMg1 .....	38
5.5.2. Pokus sa legurama AlSi9Mg i AlMg1 .....	39
5.5.2.1. Lijevanje legure AlSi9Mg .....	39
5.5.2.2. Lijevanje legure AlMg1 .....	40
5.6. Vađenje odljevka .....	40
6. REZULTATI I RASPRAVA .....	42
6.1. Vizualni pregled odljevaka .....	42
6.2. Simulacija lijevanja i skrućivanja .....	45
6.2.1. Parametri korišteni u simulaciji .....	45
6.2.2. Lijevanje legure AlMg1 sa hladilima .....	47
7. ZAKLJUČAK .....	50
8. LITERATURA .....	51

## POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz krivulje hlađenja i skrućivanja čistog metala [3].....	3
Slika 2. Shematski prikaz krivulje hlađenja i skrućivanj binarne legure [3].....	3
Slika 3. Shematski prikaz skrućivanja metala: (a) nukleacija kristala u taljevini metala, (b) i (c) rast kristala s napredovanje skrućivanja, (d) skrućivanje je završeno (vide se pojedine granice zrna [4].....	4
Slika 4. Shematski prikaz krivulje hlađenja čistog metala s pothlađenjem [5].....	5
Slika 5. Heterogena nukleacija na pukotini zida kalupa, pri kutu močenja $\theta=90^\circ$ (a) kritična veličina klice; (b) gornja klica ne može rasti iz pukotine dok donja može. [6]. ....	6
Slika 6. Shematski prikaz granične površine kruto /tekuće: (a) atomski gruba (hrapava) ili difuzna granična površina; (b) glatka granicna površina [7].....	7
Slika 7. Shematski prikaz probijanja početnog ravnog fronta u ćelije [8] .....	7
Slika 8. Shematski prikaz: (a) i (b) toplinskih polja dendritne legure [8] i (c) nastalih zona u kalupu [3].....	8
Slika 9. Shematski prikaz: (a) Morfologije pravilnog lamelnog dvofaznog eutektika koji raste u jednom smjeru u pozitivnom temperaturnom gradijentu [9]; (b) Rasta nepravilnog eutektika: grananja fasetirane faze kod zaustavljanja kod i odgovarajući oblik granične površine kruto/tekuće [12].....	10
Slika 10. Shematski prikaz tipova nestabilnosti planarne eutektičke granične površine .....	10
Slika 11. Prikaz tri moguća modela (mehanizma) stvaranja eutektika u podeutektičkim Al-Si legurama [14].....	11
Slika 12. Primjer primjene aluminija pri izradi loga [19].....	14
Slika 13. Fazni dijagram binarne Al-Si legure s podeutektičkom .....	19
Slika 14. Dijagram stanja Al-Mg [23].....	20
Slika 15. Dijagram stanja Al-Cu [26] .....	21
Slika 16. Topla pukotina na odljevku [28].....	23
Slika 17. Topla pukotina na odljevku sa (slike 3.13.) povećanje 300X [7] .....	23
Slika 18. Shematski prikaz načina skrućivanja legura sa širokim intervalom skrućivanja.....	25
Slika 19. Princip rad uređaja GDS 850 Leco .....	28
Slika 20. Mehanizam pobude uređaja GDS 850 Leco .....	28
Slika 21. Princip određivanja elemenata .....	29
Slika 22. Konstrukcija kalupa za određivanje sklonosti toplim pukotinama. 1-spust, 2-odljevak, 3-metalna jezgra promjenjivog promjera, 4-hladilo, R-promjenjiva širina prstena ...	30
Slika 23. Plazma rezač Vanad za vrijeme izrezivanja jezgri. ....	33
Slika 24. Nasipavanje kalupne mješavine.....	34
Slika 25. Sabijanje kalupne mješavine .....	34
Slika 26. Namješten okvir gornjaka na donjak te pozicionirani modeli .....	35
Slika 27. Odstranjivanje viška kalupne mješavine .....	35
Slika 28. Prikazuje pozicionirane jezgre .....	35
Slika 29. Spojeni gornjak i donjak .....	36
Slika 30. Prikaz pozicioniranog okvira donjaka i hladila .....	36
Slika 31. Donjak sa hladilima .....	37
Slika 32. Peć za taljenje aluminija .....	38
Slika 33. Mjerenje temperature prije ulijevanja taljevine u kalup.....	38



---

Slika 34. Mjerenje temperature prije lijevanja u kalup.....	39
Slika 35. Prikaz mjerenja temperature legure u peći.....	39
Slika 36. Mjerenje temperature prije lijevanja u kalup.....	40
Slika 37. Prikaz istresanja odljevka iz kalupa.....	41
Slika 38. Odljevci raspoređene po brojevima.....	41
Slika 39. Topla pukotina na odljevku broj 4 širine prstena R=11, legura AlMg1.....	42
Slika 40. Tople pukotine kod legure AlMg1 za sve širine prstenova.....	44
Slika 41. Prikaz detalja pukotina prstenova širine.....	44
Slika 42. Generiranje mreže i mjesta uljevanja.....	45
Slika 43. Dimenzioniranje kalupa.....	46
Slika 44. Zatvoreni kalup.....	46
Slika 45. Prikaz punjenja kalupa.....	47
Slika 46. Prikaz mjesta zadnjeg skrućivanja, nakon 3,23 s.....	48
Slika 47. Mjesta poroznosti.....	48
Slika 48. Simulacija položaja pukotine na solidus liniji, legura AlMg1 sa hladilima, R-širina prstena, t-vrijeme proteklo od početka skrućivanja.....	49

## SAŽETAK

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

U teorijskom dijelu detaljno je opisan proces skrućivanja aluminijske legure i njegovih mehanizama nastanka toplih pukotina.

Tople pukotine su česta i ozbiljna greška u ljevarskim legurama te jedan od glavnih pokazatelja koji definiraju sposobnost lijevanja neke legure. Pukotine nastaju u zadnjoj fazi skrućivanja u temperaturnim područjima blizu solidusa, a nalaze se unutar ili na površini odljevka. Na sklonost određene legure prema nastanku toplih pukotina utječu razni čimbenici, među kojima svakako valja izdvojiti kemijski sastav legure, veličinu zrna, temperaturu ulijevanja te brzinu ohlađivanja.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada provedeno je ispitivanje sklonosti Al-legura prema nastanku toplih pukotina metodom prstenova različitih širina  $R$ . Legure su lijevane u jednokratne pješčane kalupe. Kalupna mješavina sastojala se od osnovnog materijala (kvracni pijesak), veziva (bentonit), vode i dodataka. Eksperimentalni dio rada proveden je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u Laboratoriju za ljevarstvo.

Cilj ovog rada bio je ispitati legure AlSi12, AlSi9Mg i AlMg1. Ispitivanje je provedeno lijevanjem četiri prstena različitih unutarnjih promjera za svaku leguru. Vanjski promjer je bio isti, a varirana je širina prstena  $R$ , promjenom unutarnjeg radijusa. Nakon lijevanja provedena je simulacija punjenja kalupa i skrućivanja odljevka.

Rezultati pokazuju da je legura AlMg1 vrlo sklona nastanku toplih pukotina i ne smije se lijevati u kalupe koji ne dopuštaju slobodno stezanje legure prilikom skrućivanja. Legure AlSi12 i AlSi9Mg nisu sklone nastanku toplih pukotina.

## 1. UVOD

Lijevanje je jedna od tehnologija oblikovanja predmeta od metala kojom se rastaljeni metal (talina) oblikuje ulijevanjem u kalupe. Metal poprima oblik i dimenzije kalupne šupljine i zadržava ga nakon skrućivanja. [1]

Lijevanje metalnih predmeta je jako star postupak. Prvi poznati metalni predmeti izrađeni lijevanjem stari su oko 6500 godina. U početku proizvodnje metalnih odljevaka ljudi nisu dovoljno znali o tome šta se točno zbiva unutar kalupa, odnosno o procesima koji se zbivaju tijekom lijevanja i skrućivanja odljevaka. Danas ljudi znaju mnogo više o tim procesima, iako se sam postupak lijevanja ne razlikuje mnogo od onog, starog nekoliko tisuća godina. Široka primjena tehnologije lijevanja polazi upravo od toga da se vrlo efikasno proizvode proizvodi različitih oblika, veličina i kompleksnosti. Visoka produktivnost i laka mogućnost izrade replika čine je iznimno pogodnom za serijsku i masovnu proizvodnju. [2]

Proizvodnja metalnih predmeta lijevanjem zbog svoje kompleksnosti može dovesti do različitih rezultata, kako povoljnih tako i nepovoljnih. Bitno je uvijek težiti ka tome da se postigne visoka razina kvalitete odljevka uz što niže troškove izrade. Na konačnu kvalitetu i svojstva odljevka utječe čitav niz varijabli koje se mora uzeti u obzir. Najznačajnije su: kvaliteta odabranih materijala, proces taljenja, metalurško stanje i obrada taljevine, temperatura i brzina lijevanja, kvaliteta kalupa, te uljevni sustav i sustav napajanja odljevaka. Uljevni sustav i sustav napajanja odljevaka možda su i najvažniji jer većina grešaka na odljencima proizlazi upravo iz njihova pogrešnog dimenzioniranja i konstruiranja. Također, za postizanje dobre kvalitete odljevka je važna kvaliteta i struktura uloženog materijala za agregat u kojem se proizvodi taljevina željenog kemijskog sastava. [2]

Glavni cilj je postizanje konzistentne visoke kvalitete i zahtijevanih svojstava odljevaka uz što je moguće niže proizvodne troškove. Međutim, lijevanje metala je vrlo kompleksan proces i često može rezultirati neočekivanim rezultatima jer obuhvaća vrlo velik broj varijabli koje se moraju strogo kontrolirati. [2]

## 2.SKRUĆIVANJE METALA I LEGURA

Skrucivanje ili kristalizacija je fazni prijelaz taljevine u krutinu. Uvjeti pri kojima se odvija skrucivanje određuju strukturu, utječu na fizikalna i mehanička svojstva, veličinu i raspored nastalih faza, stupanj segregiranja, te određuju postupke daljnje obrade.

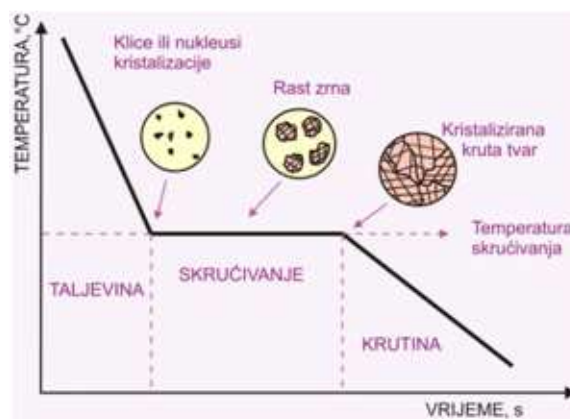
Do skrucivanja metala ili legura dolazi kada su ispunjeni sljedeći uvjeti:

*-pothlađenost taline*

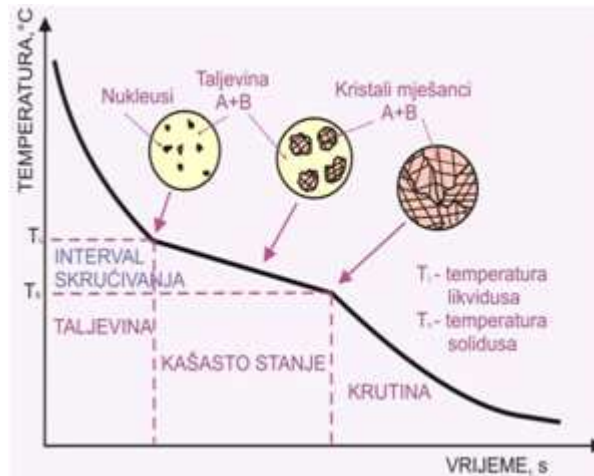
*-prisustvo klica*

*-odvođenje topline iz sustava.*

Prijelaz iz tekućeg u kruto stanje popraćeno je oslobađanjem latentne topline skrucivanja. Latentna topline skrucivanja je količina topline koja se oslobodi kada tvar, odnosno taljevina promijeni svoje agregatno stanje iz kapljevito u kruto, pri konstantnoj temperaturi. Tijekom ovog procesa potrebno je odvesti toplinu. Ona se odvodi zračenjem, kondukcijom i konvekcijom. Brzina skrucivanja proporcionalna je brzini odvođenja topline. Na slici 1 shematski je prikazana krivulja hlađenja i skrucivanja čistog metala, a na slici 2 krivulja hlađenja i skrucivanja binarne slitine. Na obje slike uočava se zastoj (plato) na krivulji hlađenja, koji predstavlja latentnu toplinu skrucivanja. Plato je na slici 2 strm. Razlog tome nalazi se u činjenici da se skrucivanje binarnih legura odvija u temperaturnom intervalu ( $T_L-T_S$ ), dok kod skrucivanja čistih metala, skrucivanje započinje i završava na istoj temperaturi. Nakon što sva taljevina prijeđe u kruto stanje više se ne razvija latentna topline. Brzina skrucivanja proporcionalna je brzini odvođenja topline.



Slika 1. Shematski prikaz krivulje hlađenja i skrućivanja čistog metala [3]



Slika 2. Shematski prikaz krivulje hlađenja i skrućivanj binarne legure [3]

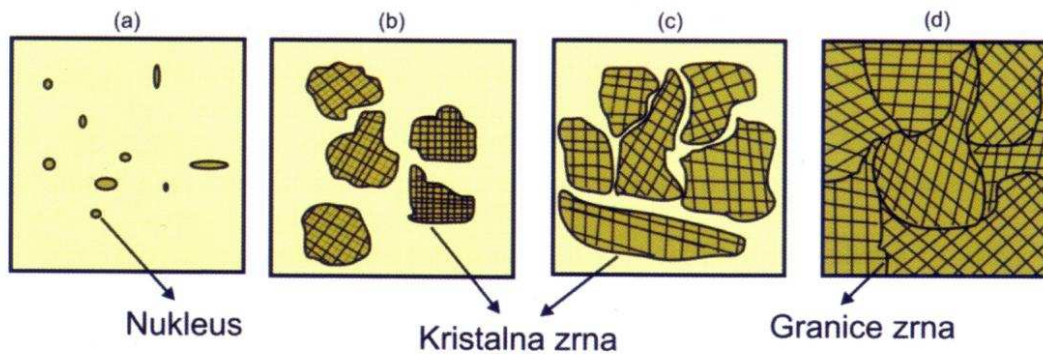
Skrućivanje se odvija u dvije faze:

- prvo se odvija **nukleacija** (fizikalni proces stvaranja nove faze u materijalu)
- zatim **rast kristala** (transport atoma iz taljevine na graničnu površinu kruto/tekuće)

Na slici 3 prikazan je tijek skrućivanja. Uočava se da prvo nastaju klice iz kojih se razvijaju kristalna zrna. Različito orijentirana kristalna zrna (orijentacija ovisi o smjeru odvođenja topline i o kristalnoj strukturi metala) vežu se jedna na druge. Kristali rastu sve dok se ne sudare, nakon čega se njihov rast nastavlja, između njih javljaju se nepravilne granice površine koje nazivamo granicama zrna. Proces skrućivanja je završen kada nestane taljevine. Izuzetak kod skrućivanja je rast monokristala, gdje se rast omogućava samo jednom zrnju. Postupci proizvodnje monokristala strogo su kontrolirani. Proizvodi dobiveni na ovaj način imaju specijalna svojstva koja nije moguće postići kod skrućivanja polikristaličnih metala (metala s velikim brojem zrna). Skrućivanje čistih metala rijetko se susreće u praksi. Kod skrućivanja legura utječu tri osnovna faktora: kemijski sastav, brzina rasta i temperaturni gradijent ispred fronta skrućivanja kruto/tekuće.

Skrućivanje legura dijeli se na:

- skrućivanje jednofaznih primarnih kristala** (skrućivanje jednofazne legure, ćelijasto i ćelijasto dendritno skrućivanje, te dendritno skrućivanje)
- skrućivanje višefaznih legura** (eutektičko i peritektičko skrućivanje).



Slika 3. Shematski prikaz skrućivanja metala: (a) nukleacija kristala u taljevini metala, (b) i (c) rast kristala s napredovanjem skrućivanja, (d) skrućivanje je završeno (vide se pojedine granice zrna [4])

## 2.1. Nukleacija

Nukleacija je početna faza procesa skrućivanja, odnosno proces nastajanja klica. Skrućivanje započinje nukleacijom, a dalje se nastavlja rastom kristala u taljevini i stvaranjem kristalnih zrna. Postoje tri vrste nukleacije: homogena, heterogena, dinamička

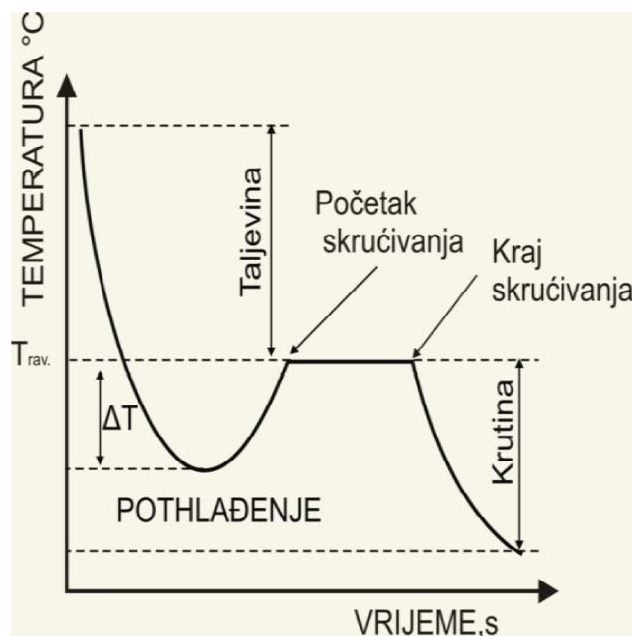
### 2.1.1. Homogena nukleacija

Homogena nukleacija prisutna je kod izrazito čistih metala. U realnim uvjetima skrućivanja ne dolazi do homogene nukleacije, zbog prisustva stranih čestica u taljevini i stijenci kalupa. Ovo je najteži put stvaranja klica i kristala jer je potrebno prevladati energetska barijeru granične površine klica/taljevina. Za prevladavanje te energetske barijere potrebno je veliko pothlađenje (razlika između ravnotežne i stvarne temperature skrućivanja).

Homogena nukleacija je dominantna i spontana kod čistih metala. Prema nekim istraživanjima do homogene nukleacije teško dolazi zbog utjecaja gravitacije [5]. U realnim uvjetima skrućivanja ne dolazi do homogene nukleacije, zbog prisustva stranih čestica u taljevini i stijenci kalupa.

Fazna transformacija tekućeg u kruto stanje popraćena je toplinskim promjenama odnosno pothlađenjem  $\Delta T$ . Pothlađenjem (slika 4) se naziva razlika između ravnotežne i stvarne temperature skrućivanja  $T$ . Termodinamički gledano pothlađenje

taljevine predstavlja pokretačku silu nukleacije, što je ono veće, veća je vjerojatnost spontane nukleacije. U taljevini se iznad ravnotežne temperature skrućivanja nalaze nakupine slabo povezanih atoma i molekula koje nazivamo klasterima. Klasteri lako nastaju u taljevini, ali se lako i otapaju u taljevini. Da bi došlo do nastanka stabilnog nukleusa, klaster mora prijeći energetska barijeru (energiju granične površine nukleant/taljevina) odnosno mora prerasti veličinu kritičnog radijusa  $r_{kr}$ . Na smanjenje kritičnog radijusa utječe pothlađenje (kritični radijus se smanjuje s povećanjem pothlađenja). Utvrđeno je da je za prevladavanje energetske barijere potrebno pothlađenje od  $0,18-0,20T_{rav}$



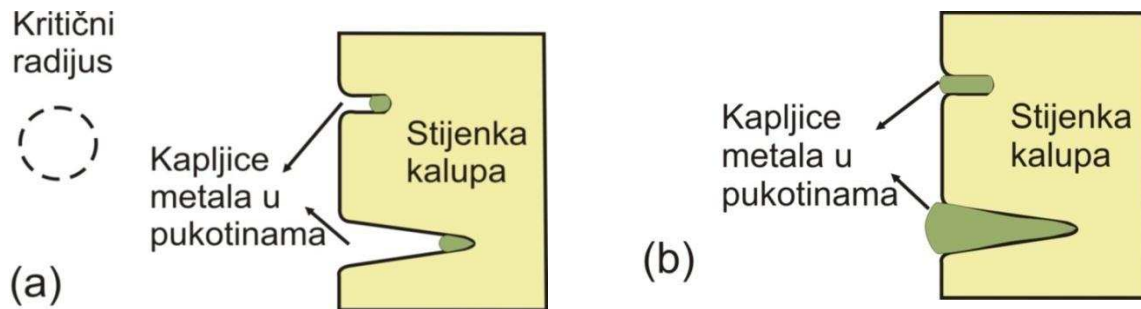
Slika 4. Shematski prikaz krivulje hlađenja čistog metala s pothlađenjem [5]

### 2.1.2. Heterogena nukleacija

Heterogena nukleacija odvija se u realnim uvjetima pri skrućivanju metala i legura uz vrlo malo pothlađenje. Nukleacija se odvija uz prisustvo stranih čestica, a to su uključci, nečistoće, oksidni filmovi i stjenke kalupa. Strane čestice već imaju neku postojeću graničnu površinu, te se na taj način smanjuje energetska barijera koju treba prevladati da bi nastala klica. U industrijskoj praksi heterogena nukleacija potpomaže se dodatkom sredstava za usitnjavanje zrna u taljevini.

Realne stjenke kalupa pune su mikroskopskih pukotina i pora. Veličina tih pukotina

mora biti dovoljno velika da bi one mogle djelovati kao djelotvorna nukleacijska mjesta. Prema shematskom prikazu na slici 5 klica nastaje u korijenu pukotine pri velikom kutu močenja  $\theta$  ( $\theta$  ovisi o naprezanjima na graničnim površinama) i malom stupnju pothlađenja. Da bi pukotina bila učinkovito mjesto za nukleaciju, njezin otvor ne smije biti manji od veličine kritičnog radijusa  $r$ .



Slika 5. Heterogena nukleacija na pukotini zida kalupa, pri kutu močenja  $\theta=90^\circ$  (a) kritična veličina klice; (b) gornja klica ne može rasti iz pukotine dok donja može. [6].

## 2.2. Rast kristala

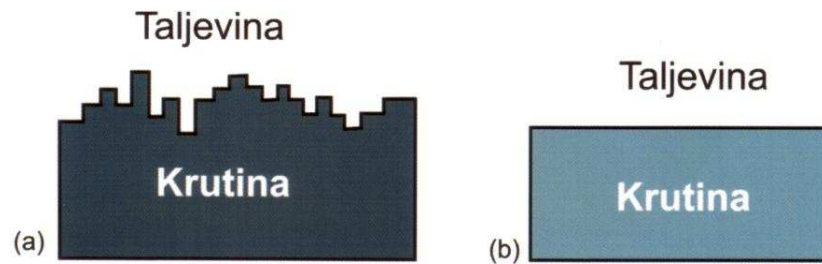
Daljnijim odvođenjem topline, nakon što je započeo proces nukleacije, dolazi do rasta kristala. Ovaj stadij skrućivanja traje sve dok ne nestane taljevine. Nukleus raste i stvara kristale. Rast kristala ovisi o kristalnoj rešetki koja nastaje na međufaznoj granici kruto/tekuće i o temperaturi. Najveći utjecaj na brzinu rasta kristala ima temperatura. Temperatura međufazne granice kruto/tekuće mora biti manja od ravnotežne temperature da bi kristal mogao rasti. Način odvođenja topline utječe na konačnu strukturu krutine i određuje mehanizam rasta. Proizlazi da su dva čimbenika bitna za rast kristala, struktura granične površine i kinetika priključenja atoma na graničnu površinu kruto/tekuće (difuzija, prijenos mase i topline).

Postoje dvije vrste međufazne granične površine kruto/tekuće kako je prikazano slikom 6:

-*hrapava ili difuzna granična površina kruto/tekuće (nefasetirana)*

-*glatka granična površina kruto/tekuće (fasetirana)*



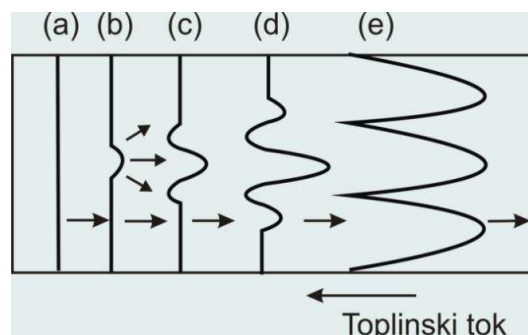


Slika 6. Shematski prikaz granične površine kruto /tekuće: (a) atomski gruba (hrapava) ili difuzna granična površina; (b) glatka granicna površina [7]

### 2.2.1. Razvoj dendritne mikrostrukture

Skrucivanje pri kojem nastaju ćelijaste i ćelijasto-dendritne strukture imaju brzinu hlađenja veću od kritične, te im front skrucivanja nije ravan. Pretpostavlja se da ćelije i dendriti nastaju zbog konstitucijskog pothlađenja. Konstitucijsko pothlađenje uzrokuje nestabilnost ravnog fronta i stvaranje stabilnih izbočina na frontu koje se ne mogu rastaliti u taljevini (temperatura izbočina je manja od likvidus temperature). Shematski prikaz na slici 7 ukazuje da na stabilnost izbočina utječe i kritični gradijent. Temperaturni gradijent ispred granične površine ne smije biti strmiji od kritičnog gradijenta, u protivnom dolazi do otapanja izbočine.

Slika 7 opisuje nastanak ćelijaste strukture. Smanjenjem temperaturnog gradijenta ispod kritične vrijednosti ispred početne granične površine, dolazi do nastanka ćelijaste strukture. Prva izbočina nastaje bočnim odbacivanjem otopljene komponente i njenim gomilanjem u korijenu izbočine (slika 7 b)). Nastanak izbočine uzrokuje smanjenje temperature skrucivanja i stvaranje udubina (slika 7 c)). Nastale udubine stvaraju druge izbočine (slika 7 d)). Izbočine se razvijaju u druge grane ili ćelije (slika 7 e)). Rast ćelija i grana je suprotan od smjera odvođenja topline.



Slika 7. Shematski prikaz probijanja početnog ravnog fronta u ćelije [8]

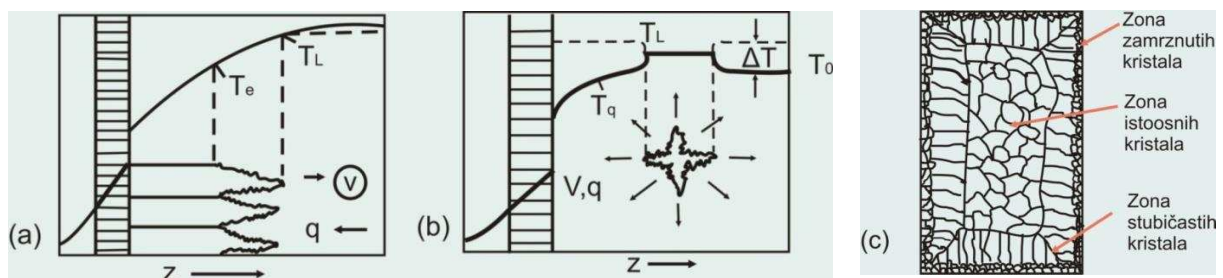
Ćelijske strukture se javljaju kod razrijeđenih legura odnosno legura s uskim intervalom skrućivanja.

Prva metastabilna izbočina na ravnoj fronti skrućivanja nastaje uz pothlađenje.

**Konstitucijsko pothlađenje** u taljevini je pokretačka snaga stvaranja prve stabilne izbočine. Do konstitucijskog pothlađenja dolazi zbog djelovanja kemijskog sastava ili konstitucije legure. Zbog difuzije otopljenog elementa u taljevini ispred fronta skrućivanja mijenja se njegova koncentracija, a time i ravnotežna temperatura skrućivanja.

Porast konstitucijskog pothlađenja uzrokuje postepenu promjenu ćelija u dendrite. Dendriti su razgranate kristalne tvorevine, koje omogućavaju djelotvorniji odvod topline i povećavaju brzinu skrućivanja. Kada brzina granične površine premaši ćelijasto-dendritni režim nastaje dendritna struktura [8]. Pretpostavlja se da je prijelaz iz ćelija u dendrite povezan s konstitucijskim pothlađenjem u taljevini između ćelija, koje stvara nestabilnu graničnu površinu u suprotnom pravcu. Razmak između dendritnih grana smanjuje konstitucijsko pothlađenje odnosno dendritne grane odvođe toplinu i smanjuju konstitucijsko pothlađenje. Dendritne grane mogu biti vrlo razgranate s bočnim sekundarnim i tercijarnim granama, te imaju usmjeren rast.

Ako se toplina odvodi suprotno od smjera rasta dendrita govorimo o prinudnom rastu dendrita, a ako se toplina odvodi od kristala u taljevinu govorimo o slobodnom rastu dendrita. U prvom slučaju govorimo o stubičastom ili usmjerenom skrućivanju (slika 8 a)), a u drugom slučaju o istoosnom skrućivanju (slika 8 b)). Unutar kalupa tijekom skrućivanja taljevine prisutno je i stubičasto skrućivanje (zona uz stijenke kalupa) i istoosno skrućivanje (u centru kalupa). Ekvivalentno tipovima skrućivanja prisutne su unutar kalupa stubičasta i istoosna zona (slika 8 c)).



Slika 8. Shematski prikaz: (a) i (b) toplinskih polja dendritne legure [8] i (c) nastalih zona u kalupu [3]

### **2.2.2. Razvoj eutektičke mikrostrukture**

Aluminijske legure se skrućuju eutektičkim načinom. Proces eutektičkog skrućivanja sastoji se od:

- stvaranja klica iz dijela taljevine eutektičkog sastava, te razvitka kristala na tim klicama koji dalje rastu,*
- eutektičko skrućivanje započinje na mjestu dodira dva rastuća kristala,*
- izlučivanja jedne od krutih faza na granici taljevina/kristal, a potom druge krute faze.*

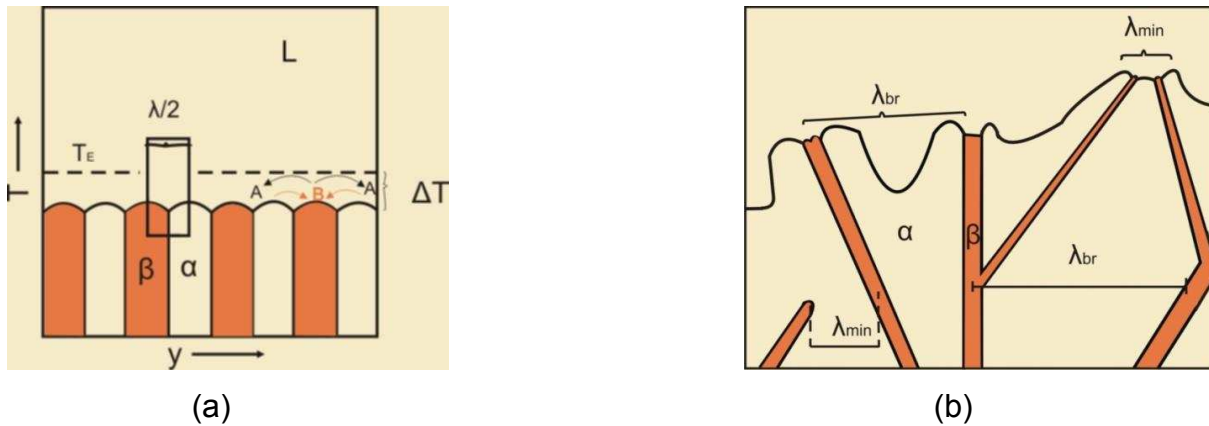
Eutektik je smjesa sastavljena od dvije ili više faza koje imaju niže talište od svake čiste komponente. Eutektička točka najniža je temperatura na kojoj eutektička faza može postojati u tekućem stanju i u njoj je sastav taljevine i krute faze jednak. Eutektike možemo klasificirati na osnovi kinetike granične površine sastavnih faza eutektika [9]:

**Pravilni eutektici** (slika 9 a)) (nefasetirani/nefasetirani eutektici):

Pravilna morfologija ovih eutektika proizlazi iz činjenice da su obje faze nefasetirane, odnosno granična površina kruto/tekuće u atomskom mjerilu je hrapava [10]. Lamelle obje faza ( $\alpha$  i  $\beta$ ) tokom skrućivanja rastu u smjeru odvođenja topline i okomite su na graničnu površinu kruto/tekuće. Utjecaj na pravilnu eutektičku strukturu ima difuzija otopljenog elementa (nastoji smanjiti razmak) i kapilarnost (nastoji povećati razmak između lamela).

**Nepravilni i kompleksni pravilni eutektici** (slika 9 b)) (nefasetirani/fasetirani eutektici):

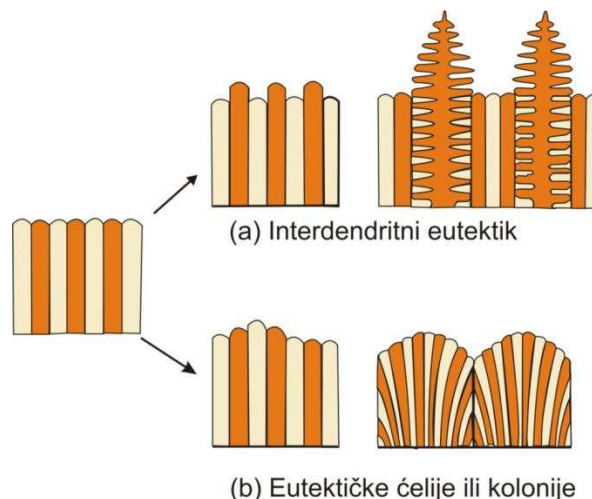
Nepravilna morfologija ovih eutektika uzrokovana je rastom fasetirane faze, koja ima glatku graničnu površinu kruto/tekuće [8], u smjeru koji je određen specifičnom orijentacijom slaganja atoma, tako da dolazi do niza različitih lamelarnih razmaka. Ako dvije lamelle konvergiraju jedna od njih prestaje rasti, a lamelle koje divergiraju kada dosegnu kritični lamelarni razmak prestaju rasti.



Slika 9. Shematski prikaz: (a) Morfologije pravilnog lamelnog dvofaznog eutektika koji raste u jednom smjeru u pozitivnom temperaturnom gradijentu [9]; (b) Rasta nepravilnog eutektika: grananja fasetirane faze kod zaustavljanja kod i odgovarajući oblik granične površine kruto/tekuće [12].

Pravilni, nepravilni i kompleksni eutektici mogu biti povezani ili razdvojeni, ovisno o tome da li obje eutektičke faze rastu zajedno i dolazi li do difuzije otopljenog elementa između  $\alpha$  i  $\beta$  eutektičkih faza [9].

U realnim višekomponentnim tehničkim legurama, prisutni su i brojni legirajući elementi koji mijenjaju morfologiju eutektika, odnosno granična površina kruto/tekuće postaje nestabilna. U tom slučaju nastaje morfologija koja se sastoji od dendrita i eutektika. Tu pojavu nazivamo **konkurentni rast dendrita i eutektika**, što je prikazano na slici 10 [13].

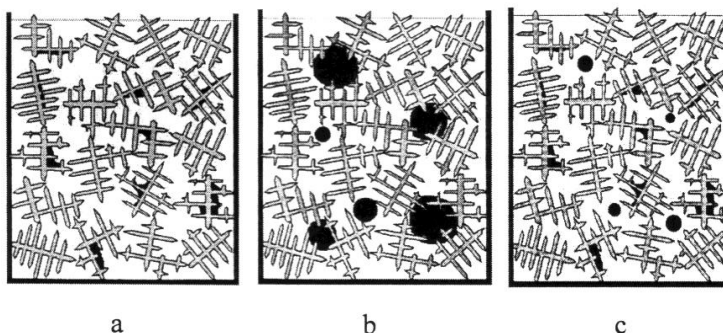


Slika 10. Shematski prikaz tipova nestabilnosti planarne eutektičke granične površine kruto/tekuće: (a) nestabilnost jedne faze rezultira nastajanjem dendrita jedne faze i interdendritnog eutektika; (b) nestabilnost dviju faza rezultira nastajanjem eutektičkih ćelija ili kolonija u prisustvu trećeg legirajućeg elementa [13]

### 2.3. Skrućivanje odljevaka od podeutektičkih Al-Si legura

Podeutektičke Al-Si ljevačke legure koje sadrže između 7 i 11 % Si najčešće su primjenjivane legure. Mehanička svojstva tih legura su pod izravnim utjecajem načina na koji nastaje Al-Si binarni eutektik. Način nastanka eutektičke ( $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$ ) reakcije određuje iznos količinu, veličinu i morfologiju eutektičke faze, raspodjelu čestica eutektičkog silicija, nivo mikroporoznosti u mikrostrukturi. Poznato je da primarni  $\alpha_{Al}$  dendriti aluminijski nemaju veliku mobilnost i da se međusobno isprepliću i rezultiraju dendritnom mrežom. Naknadno se, u točki dendritne koherencije dendriti međusobno sudare. Zbog toga se transport mase, radi kompenzacije volumnog stezanja odvija putem interdendritnog napajanja. Način nukleacije i rasta eutektičke ( $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$ ) faze, unutar dendritne mreže, značajno će utjecati na specifičnu površinu krute mreže, što će u pravilu, djelovati na napajanje tijekom posljednjih stadija skrućivanja.

Obično se pretpostavlja da nukleacija i rast Al-Si binarnog eutektika započinje na dendritima primarnog aluminijskog ( $\alpha_{Al}$ ) i da eutektička ( $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$ ) zrna imaju istu kristalnu orijentaciju kao i kolonije Al dendrita. Čistoća taljevine utječe na veličinu i morfologiju eutektičkih zrna, tj. filtrirana taljevina proizvodi grublja i štapićasta eutektička ( $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$ ) zrna. Utvrđeno je da veličina eutektičkih ( $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$ ) ćelija značajno utječe na napajanje. Tvrdi se da eutektička silicijska faza nukleira na postojećim nečistoćama. Predložena su tri moguća mehanizma eutektičkog ( $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$ ) skrućivanja za podeutektičke Al-Si legure : prvi mehanizam je da eutektik ( $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$ ) nukleira direktno s površine primarnih  $\alpha$  dendrita aluminijskog (slika 11 a)); drugi mehanizam je da eutektik ( $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$ ) nukleira na postojećim supstratima čestica u taljevini (slika 11 b)); i treći mehanizam je kombinacija prva dva mehanizma (slika 11 c)).



Slika 11. Prikaz tri moguća modela (mehanizma) stvaranja eutektika u podeutektičkim Al-Si legurama [14]

Ako eutektik ( $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$ ) nukleira na površini primarnih  $\alpha$  dendrita aluminija, aluminij bi tada u eutektiku imao istu kristalografsku orijentaciju kao i primarni  $\alpha_{Al}$  dendriti. Ako eutektik ( $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$ ) nukleira s drugih nukleusa u taljevini, aluminij bi u eutektičkom zrnju imao drugačiju kristalografsku orijentaciju od susjednih kolonija aluminijevih  $\alpha_{Al}$  dendrita, prouzrokujući tako dualnu mikrostrukturu.

S povećanjem elemenata u tragovima i nivoom nečistoća u nemođificiranim legurama, neka eutektička zrna, nukleirana sa supstrata induciranih nečistoćama, zapažena su u centralnim područjima mikrostrukture, premda je većina eutektičkih zrna nukleirala s Al dendrita.

Postoje dva osnovna mehanizma nukleacije eutektičke faze: jedan je da eutektik ( $\alpha_{Al} + \beta_{Si}$ ) nukleira direktno na primarnim  $\alpha_{Al}$  dendritima, a drugi je mehanizam da nukleira na postojećim supstratima čestica u taljevini. Prvi mehanizam tipično se pojavljuje kod nemođificiranih legura, a ovaj drugi je djelotvoran kod mođificiranih legura. Međutim, ovaj posljednji može se također pojaviti i kod nemođificiranih legura, ovisno o nivou pratećih elemenata i nečistoća u taljevini. Dodatak sredstva za mođifikaciju eutektika, poput npr. Sr, mijenja, ne samo mehanizam rasta, već i mehanizam nukleacije eutektika.

### 3. ALUMINIJ

Aluminij je kemijski element koji se označava simbolom Al. Aluminij ima atomski broj 13 i atomsku težinu 26,98154. Aluminij je srebrno-bijeli metal. Čisti aluminij je mekan i savitljiv i niske čvrstoće, ali se može legirati s drugim elementima čime mu se bitno poboljšavaju mehanička svojstva. Legure aluminija su lagane, čvrste i lako se oblikuju mnogim metaloprerađivačkim postupcima. Lako se spajaju, lijevaju, strojno obrađuju, uz mogućnost postizanja mnogobrojnih estetskih i funkcionalnih površinskih efekata. Zbog brojnih povoljnih fizičkih, kemijskih i metalurških svojstava, aluminij je postao najprošireniji ne-željezni metal.

Tri su glavna svojstva koja određuju primjenu aluminija kao inženjerskog materijala:

*-povoljan omjer čvrstoće i gustoće ( $Rm/\rho$  je tzv. specifična čvrstoća), posebno kad se koristi u obliku neke od svojih legura. Gustoća aluminija je oko jedne trećine gustoće čelika, pa se aluminij i njegove legure prvenstveno koriste u proizvodnji zrakoplova i vozila, ali i za druge namjene. Legiranjem i precipitacijskim očvrnućem mogu se proizvesti legure koje imaju specifičnu čvrstoću kao i mnogi čelici.*

*-omjer električne vodljivosti i gustoće najpovoljniji je među svim metalima. Zbog toga aluminij istiskuje bakar iz uporabe za prijenos električne energije.*

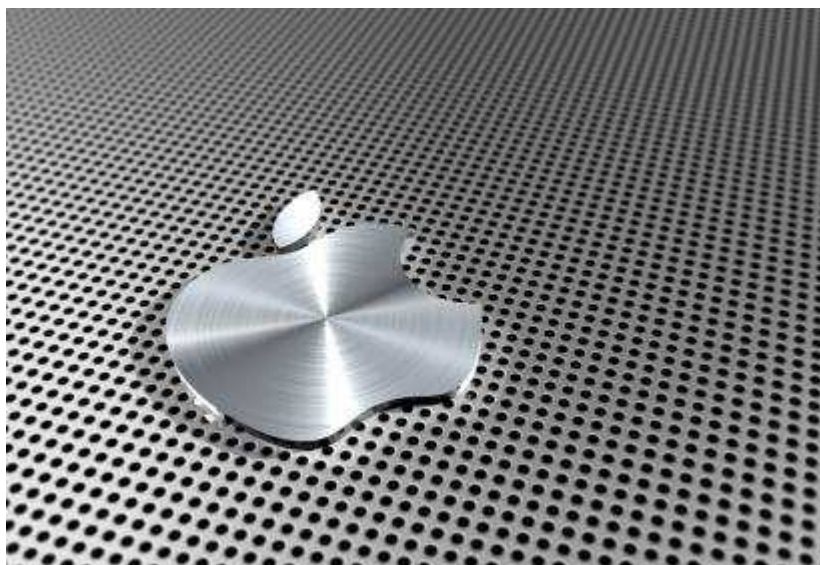
*-aluminij ima velik afinitet prema kisiku, a korozijska postojanost mu je ipak relativno velika i na njoj se osniva široka primjena aluminija u graditeljstvu.*

Aluminij je najrašireniji metal u Zemljinoj kori (8,13%), ali se u prirodi nikada ne nalazi samostalno već najčešće u stijinama u obliku minerala aluminij silikata (grupa  $Al_2SiO_5$ ). Osnovna sirovina za proizvodnju aluminija je boksit. Tipični boksit koji se koristi za proizvodnju aluminija sadrži od 40 do 60 % ukupnog aluminija ( $Al_2O_3$ ), od 1 do 15 % silicija ( $SiO_2$ ), od 7 do 30 %  $Fe_2O_3$ , od 1 do 5 % titana ( $TiO_2$ ) i od 12 do 30 %  $H_2O$ . Aluminij se izdvaja skupim elektrolitskim postupkom. Zbog vrlo velikog utroška energije pri proizvodnji aluminija, a i iz ekoloških razloga, nastoji se u što je moguće većoj mjeri iskoristiti otpadni materijal - aluminij i njegove legure koje su već bile u uporabi ili otpatke od primarne proizvodnje (strugotina od obrade i sl.). Pretaljivanjem otpadnog materijala dobiva se tzv. sekundarni aluminij, čiji se ingoti pretežno koriste kao sirovina za izradu odljevaka. Sekundarni aluminij je nepovoljniji od primarnog jedino u slučajevima kada se od materijala prvenstveno očekuju dobra električna

vodljivost i antikoroziivnost. Aluminijske smjese izrađuju se svim metodama poznatim metalurgiji i komercijalno su dostupne u obliku: odljevaka; u izrađenim formama proizvedenim valjanjem, istiskivanjem, kovanjem ili izvlačenjem; u kompaktnim i sinteriranim oblicima pripremljenim od praha; te u ostalim monolitnim formama pripremljenim u širokom spektru procesa. Kako je aluminij relativno mekan s niskom vlačnom čvrstoćom, za inženjersku primjenu upotrebljava ga se u pravilu u legiranom stanju.[17]

### 3.1 .Primjena aluminija

Zahvaljujući navedenim svojstvima aluminij ima široku primjenu u mnogim proizvodnim granama. Koristi se u sve većoj mjeri u proizvodnji dijelova za automobile, zrakoplove, kamione, željezničkih vozila, plovila, bicikle. Također se koriste u građevinarstvu za izradu prozora, vrata, fasada zgrada, ograda, rasvjetnih stupova i sl. Obuhvaća i širok raspon kućanskih aparata, predmeta i posuđa. U elektrotehnici aluminij služi za izradu dalekovodnih i telefonskih vodova, za zaštitne oplata raznih namjena, podloške električnih žarulja. Svakodnevnu primjenu aluminija prepoznajemo po aluminijskim limenkama za tekućinu, hranu i sl. [18]. Na slici 12 prikazana je limenka kao primjer korištenja aluminija za gotove proizvode.



Slika 12.Primjer primjene aluminija pri izradi loga [19]



### 3.2. 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 očvršnućem, 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 [20].

Najvažniji legirni elementi su:

-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 [20].

Utjecaj legirnih elemenata na mikrostrukturu prikazuje se u dijagramima stanja. Iz njega se može vidjeti tijekom 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 [20].

### 3.2.1. Označavanje legura aluminija prema HRN [24]

Prema važećim hrvatskim normama i DIN-u oznaka je slovno brojčana, a sastoji se od:

**X.GY<sub>1</sub>B<sub>1</sub>Y<sub>2</sub>B<sub>2</sub>Y<sub>n</sub>B<sub>n</sub>.Z<sub>1</sub>Z<sub>2</sub>**

**X** - slova koja govore o načinu proizvodnje i primjene

**G, Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>,.....Y<sub>n</sub>** - kemijski simboli za glavni element, legirne i ostale dodane elemente

**B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>n</sub>** - brojevi koji govore o kemijskom sastavu

**Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>** - znakovi za stanje i svojstva materijala

Tablica 1. Primjer oznake za aluminij i njegove slitine prema hrvatskim normama i DIN-u [24]

SKUPINA METALA	VRSTA METAL A	OZNAKA NA PRVOM MJESTU		OZNAKA STANJA I PRIMEJENE
		VAŽEĆA HRN	DIN	
ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE		<b>D</b> -ZA DODAVANJE <b>S</b> -ZA SPAJANJE <b>P</b> -LIJEVANA U PIJESAK <b>K</b> -LIJEVANA U KOKILU <b>T</b> -TLAČNO LIJEVANA <b>C</b> -CENTRIFUGALNI LIJEV	<b>V</b> -PREDLEGURE ZA DODAVANJE <b>GI</b> -ZA LEŽAJE <b>L</b> -ZA LEMLJENJE <b>S</b> -DODATNI MATERIJAL ZA ZAVARIVANJE <b>G</b> -OPĆENITO LIJEVANO <b>GK</b> -LIJEVNO U KOKILU <b>GD</b> -TLAČNO LIJEVANO <b>GZ</b> -CETRIFUGALNO LIJEVANO	<b>0</b> -PRIMARNO NEOBRAĐENO STANJE <b>1</b> -MEKO STANJE <b>2</b> -HLADNO DEFORMIRANO <b>3</b> -DJELOMIČNO ODŽARENO <b>4</b> -TOPLINSKI OBRĐENO <b>5</b> -TOPLINSKI OBRADENO I HLADNO DEFORMIRANO <b>6</b> -POPUSTENO STANJE <b>7, 8</b> -SLOBODNO <b>9</b> -POSEBAN STANJA

### 3.2.2. Al-Si legure

#### 3.2.2.1. Pedeutektičke Al-Si legure

Glavne značajke :

-izvrsna livljivost

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

Najčešće se primjenjuju legure sa 7-11 % Si (slika 13). Ostali se legirni elementi dodaju ovisno o zahtijevanim mehaničkim svojstvima. Ovakve legure moguće je dodatno poboljšati modifikacijom ili usitnjavanjem zrna [22].

Binarne podelutektske legure se vrlo rijetko primjenjuju. Uglavnom se legiraju i drugim elementima pa im se i mikrostruktura mijenja. Tako ne postoje samo primarni dendriti aluminija ( $\alpha_{Al}$ ) 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 [22].

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 °C). Također je moguće dodati i male količine nikla i željeza koji povećavaju čvrstoću pri povišenim temperaturama, a ne smanjuju žilavost. [26]

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 prisutstvo 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 [22].

### 3.2.2.2. Eutektske Al-Si legure

Glavne značajke eutektskih Al-Si legura :

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

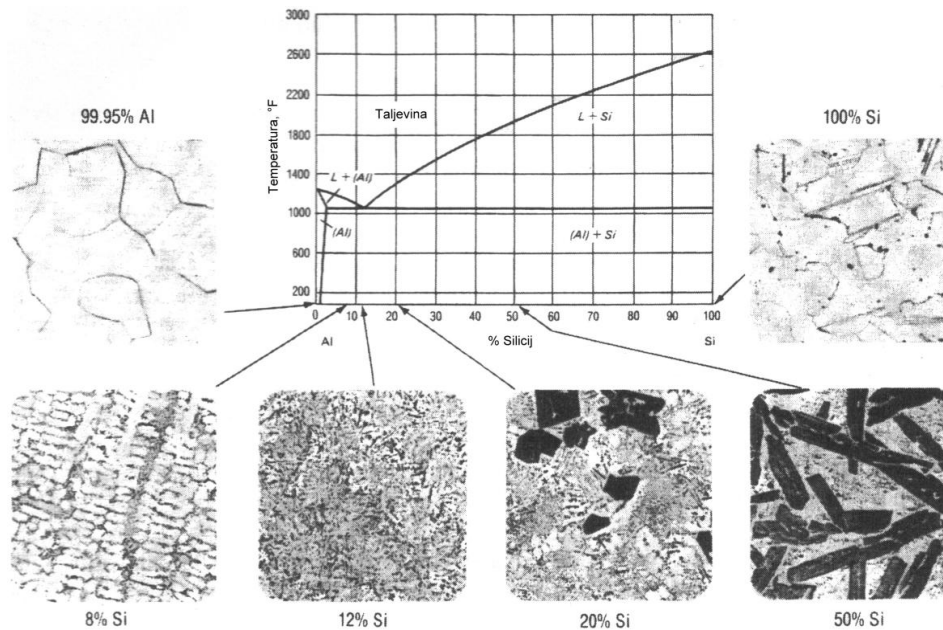
Eutektičke Al-Si legure se također primjenjuju za proizvodnju dijelova namijenjenih za rad pri povišenim temperaturama, posebice u automobilske industriji za izradu klipova i ventila. Legure za izradu klipova moraju podnositi temperature više i od 350 °C te toplinski umor između sobne temperature i 300 °C. Moraju imati visoku toplinsku vodljivost, povišenu čvrstoću te toplisku stabilnost [22].

Ove legure imaju izvrsna mehanička svojstva zbog niske točke taljenja i uskog temperaturnog intervala skrućivanja. Eutektik se sastoji od vrlo žilavog primarnog aluminijskog  $\alpha_{Al}$  (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. [20]

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). [22]

### 3.2.2.3. *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 13. [22]



Slika 13. Fazni dijagram binarne Al-Si legure s pondeutektičkom i nadeutektičkom mikrostrukturom [23]

Silicijski kristali su najtvrdža faza u bilo kojoj lijevačkoj 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 zrna Si kristala. [27]

Nadeutektičke 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. [22]

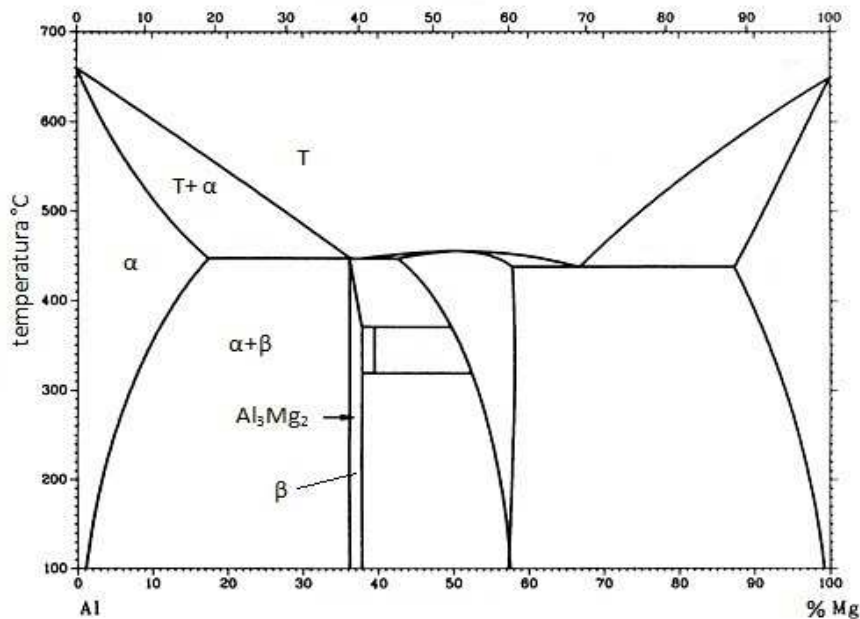
Obzirom na sve veće zahtjeve za legurama s većom otpornošću na trošenje te većim modulom elastičnosti, sve se više proučavaju i ispituju nadeutektičke Al-Si legure. Tako se zaključilo da je moguće poboljšati i ostala mehanička svojstva, kao što su duktilnost i čvrstoća. Povećanim udjelom silicija (preko 14 %) moguće je povećati modul elastičnosti te sniziti koeficijent toplinskog rastezanja. [22]

### 3.2.3. Aluminij-magnezij (Al-Mg)

Najbolju kombinaciju čvrstoće i žilavosti ima legura s 10 % Mg, no nažalost ona je jedna od najteže livljivih legura zbog pojave poroznosti, stvaranja troske i loše

žitkosti. Zbog toga su najčešće u uporabi legure s 3 – 5 % Mg. Glavna značajka ovih legura je dobra korozijska postojanost zbog čega se kod ovih legura može postići visoki sjaj. Neke od njih su i otporne na udarce pa se mogu upotrebljavati u pomorstvu, uz veliku otpornost na morsku vodu. Dobro se zavaruju i često se koriste za dekorativne potrebe. [18]

Iz slike 14 vidi se da aluminij i magnezij pri 37,5 % Mg tvore intermetalni spoj  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  ( $\beta$ ).



Slika 14. Dijagram stanja Al-Mg [23]

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.*

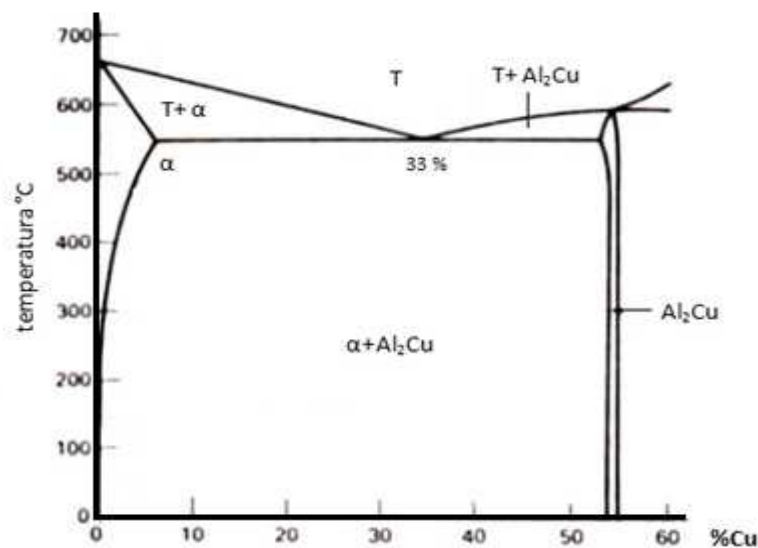
Čvrstoću legura moguće je povisiti povećanjem udjela otopljenog magnezija u kristalu mješancu. Zbog smanjene topivosti se ispod eutektičke temperature izlučuje  $\beta$ -faza, no njezin utjecaj na očvršnuće nije značajan. Intermetalni spoj  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  izlučuje se po granicama zrna u obliku krupnih čestica.

Treba biti oprezan pri korištenju legura s više od 7 %Mg. Naime, kod takvih legura oko aluminijskih zrna može nastati mreža precipitata  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  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  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ , ove legure nisu pogodne za lijevanje.

### 3.2.4. Aluminij-bakar (Al-Cu)

Toplinski očvrstljive legure s osrednje visokom čvrstoćom, srednjom ili slabom udarnom otpornošću, dobro otporne na visoke temperature i dobre rezljivosti. Slabe su livljivosti, a korozijska otpornost im je najslabija od svih aluminijevih legura. Pri skrućivanju dolazi do pogrubljanja zrna zbog čega se dodaje magnezij ili titan. Podnose radne temperature do 300 °C. [20]



Slika 15. Dijagram stanja Al-Cu [26]

Iz slike 15 vidljivo je nastajanje intermetalnog spoja  $\text{Al}_2\text{Cu}$  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 očvršnuće aluminijevih legura.

### **3.2.5. Trokomponentni legirni sustavi**

#### *Al – Si – Mg legura*

Legure su precipitacijski očvrstljive uz dodatak od 0,2 – 0,5 % Mg. Odlikuju se dobrom livljivošću koja se pogoršava smanjenjem silicija [20]. Imaju uzak temperaturni interval skrućivanja, do 30 °C i malo linearno skupljanje, do 1%. Pješčani odljevci mogu se zavarivati, kokilni odljevci djelomično, dok tlačni odljevci nikako zbog većeg sadržaja plinova. Radna temperatura odljevaka od ove legure je do 200 °C.

#### *Al – Si – Cu legura*

Legura kojoj je dodan bakar radi poboljšavanja čvrstoće i rezljivosti, uz gubitak livljivosti i otpornosti na koroziju smanjenjem udjela silicija i povećanjem udjela bakra. Čvrstoća i tvrdoća mogu se dodatno poboljšati rastvornim žarenjem i precipitacijom. Dodavanjem titana postiže se sitno zrnata struktura i zato ova legura ima dobru žilavost, otpornost na udarce i dobru sposobnost obrade odvajanjem čestica. [20]

#### *Legure Al-Zn-Si*

Ove legure imaju dobru livljivost, ne lijepe se za kalup, dobro se poliraju, imaju povećanu gustoću i samozakaljive su.



## 4. TOPLE PUKOTINE

Tople pukotine su česta i ozbiljna greška u ljevarskim legurama te jedan od glavnih pokazatelja koji definiraju sposobnost lijevanja neke legure. To su pukotine koje nastaju u zadnjoj fazi skrućivanja u temperaturnim područjima blizu solidusa, a nalaze se unutar ili na površini odljevka.

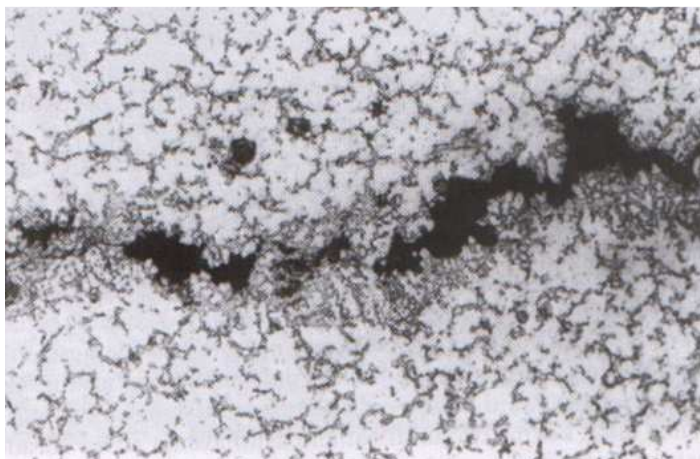
Tople pukotine su međukristalna razdvajanja materijala. Pukotine koje se često protežu kroz cijeli presjek odljevka, uzduž primarno skrutnutih kristalita, a mjestimice mogu poprimiti razgranat oblik. [28]

Tople pukotine vidljive su golim okom, a valjano se dokazuju na metalografskom izbrusku. Prikaz toplih pukotina dan je na slikama 16 i 17.

Tople se pukotine javljaju u obliku kanalića s hrapavom i oksidiranom površinom te se u strukturi prijelomne površine lako može uočiti dendritna morfologija.



Slika 16. Topla pukotina na odljevku [28]



Slika 17. Topla pukotina na odljevku sa (slike 3.13.) povećanje 300X [7]

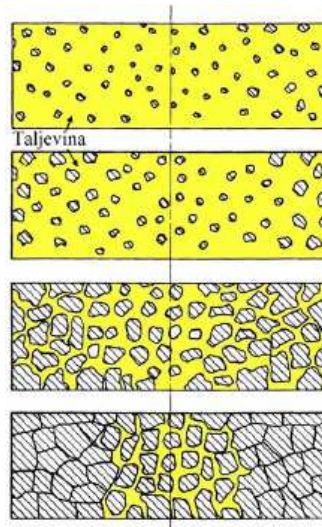
#### 4.1. Mehanizam nastanka

Tople pukotine se počinju stvarati u posljednjoj fazi skrućivanja u temperaturnom području u blizini solidusa, a glavni uzrok njihova nastanka su zaostala naprezanja u odljevku koja nastaju gdje kalup ne dozvoljava skupljanje odljevka prilikom skrućivanja, a nastaju uslijed nedostatne deformabilnosti dendritne mreže te nedovoljnog i neadekvatnog međudendritnog napajanja u širokoj kašastoj zoni. Mjesta njihova nastanka u pravilu su granice dendritnih zrna obavijene tankim filmom rastaljenog metala (slika 18).

Tople pukotine su greške tipične za legure sa širokim intervalom skrućivanja (slika 18). Naime, kod skrućivanja legura sa širokim intervalom skrućivanja otežan je razvoj usmjerenog skrućivanja, te se ono odvija preko cijelog presjeka odljevka. Ovakav način skrućivanja rezultira nastankom velikog broja tankih filmova rastaljenog metala po granicama dendritnih zrna koji u posljednjoj fazi skrućivanja pogoduju stvaranju toplih pukotina.

Prilikom ohlađivanja rastaljenog metala u kalupu dolazi do skrućivanja, zbog povećanja gustoće uslijed ugradnje atoma u kristalnu rešetku, dolazi do diskontinuiranog smanjenja volumena. Skrućivanje započinje pri likvidus temperaturi, pri kojoj se iz rastaljenog metala počinju izlučivati prvi dendriti. Daljnjim skrućivanjem udio dendrita je sve veći, nastali dendriti rastu zbog čega dolazi do njihovog međusobnog povezivanja. Skrućivanje završava pri solidus temperaturi, pri kojoj sav rastaljeni metal prelazi u kruto stanje, odnosno pri kojoj nastane koherentna dendritna mreža [29]. Kako je skrućivanje popraćeno stezanjem odljevka, to se u kasnijim fazama skrućivanja tijekom stezanja razvijaju sve veća naprezanja što dovodi do toga da se nastajuća mreža dendrita uslijed tih naprezanja sve više deformira [30]. Stezanjem se razvijaju vlačna naprezanja koja u kasnijim fazama skrućivanja induciraju deformaciju dendritne mreže nastale tijekom skrućivanja.

Na slici 18 dan je shematski prikaz skrućivanja legura sa širokim intervalom skrućivanja.



Slika 18. Shematski prikaz načina skrućivanja legura sa širokim intervalom skrućivanja

Do pojave toplih pukotina dolazi kada se tokom procesa deformacije zbog nedovoljne međusobne povezanosti dendrita, dendriti obavijeni filmom rastaljenog metala uslijed djelovanja koncentracije zaostalih naprezanja počinju odmicati jedan od drugoga [30, 31]. Zbog daljnjeg djelovanja koncentriranih naprezanja dendritna mreža nema dovoljnu deformabilnost pa takvo odmicanje u konačnici rezultira pucanjem veza između dendrita te nastajanjem pukotine. No, ukoliko je omogućen dotok rastaljenog metala na to mjesto sprječava se nastanak toplih pukotina. Čak se i već nastala topla pukotina uspijeva popuniti ako u područje razdvajanja može dotjecati ostatak rastaljenog metala. No, ukoliko je to onemogućeno jednom nastala topla pukotina, zbog zareznog djelovanja i koncentracije naprezanja, može dalje rasti i širiti se, čak i u područje ispod solidus temperature. Bitno je još naglasiti da se popravljena pukotina može naknadno ponoviti (sekundarna pukotina) jer skrnuti ostatak rastaljenog metala koji je dotekao, zbog segregacije i mogućih uključaka u sebi, može imati loša svojstva čvrstoće [32].

#### 4.2. Čimbenici koji utječu na sklonost legure tvorbi toplih pukotina

Na sklonost određene legure prema nastanku toplih pukotina utječu razni čimbenici, među kojima svakako valja izdvojiti kemijski sastav legure, veličinu zrna, temperaturu ulijevanja te brzinu ohlađivanja [33].

#### **4.2.1. Kemijski sastav legure**

Kemijski sastav legure uvelike utječe na njezinu sklonost prema nastanku toplih pukotina, jer utječe na povećanje, odnosno smanjuje intervala skrućivanja. Što je interval skrućivanja veći, to je veća sklonost legure prema nastanku toplih pukotina jer se ona duže vrijeme zadržava u kašastoj zoni gdje postoje svi preduvjeti za nastanak toplih pukotina. Posljednje područje intervala skrućivanja TFR „Terminal Freezing Range“ od odlučujućeg je značaja za nastanak pukotina. Veliki TFR znači veliku razliku u temperaturi između 90 i 100% skrutnute legure, a uzrokuje kompleksnu dendritnu mrežu i povećanu osjetljivost na nastanak toplih pukotina. TFR se izračunava pomoću Thermocalc-Classic-Softvera. Svakoj se leguri dodatkom određenih legirnih elemenata može povećati, odnosno smanjiti interval skrućivanja, a time i sklonost prema nastanku toplih pukotina. Osim samog kemijskog sastava na sklonost legure prema nastanku toplih pukotina utječu i međusobne reakcije pojedinih komponenata kojima nastaju određene faze. Također, nastanak intermetalnih niskotaljivih faza i segregacija zbog prisustva različitih uključaka i nečistoća utječe na sklonost legure prema nastanku toplih pukotina. Kod Al-Si i Al-Cu legura na njihovu sklonost prema nastanku toplih pukotina uvelike utječe i količina tekućeg eutektika prisutna tijekom posljednje faze skrućivanja. Visoki udio eutektika potpuno okružuje primarne kristale u mikrostrukturi, te je sklonost pukotinama mala. Eutektički film između zrna olakšava gibanje zrna. Ako nastanu pukotine, napajanje eutektikom će ih popuniti. Ako je premalo eutektika, popunjavanje pukotina nije moguće [33, 34].

#### **4.2.2. Veličina zrna**

Što je zrno sitnije to je manja sklonost legure prema nastanku toplih pukotina. U nekim slučajevima finija zrna mogu i potpuno spriječiti nastanak toplih pukotina. Finije zrno poboljšava međudendritno napajanje te ima veću duktilnost zbog koje uslijed djelovanja zaostalih naprezanja ne dolazi do odvajanja zrna [34]. Eutektička faza je ravnomjernije raspoređena. Sitno zrno postiže se sredstvima za usitnjavanje ili velikom brzinom ohlađivanja.

### **4.2.3. Temperatura uljevanja**

Previsoka temperatura uljevanja uglavnom povećava sklonost legure prema nastanku toplih pukotina. Najčešći su razlozi to što zbog previsoke temperature uljevanja nastaju gruba zrna, te što se povećava vrijeme prisustva tankog filma rastaljenog metala u kašastoj zoni. Temperatura uljevanja ima najmanji utjecaj na sklonost legure nastanku toplih pukotina od navedenih čimbenika.

### **4.2.4. Brzina ohlađivanja**

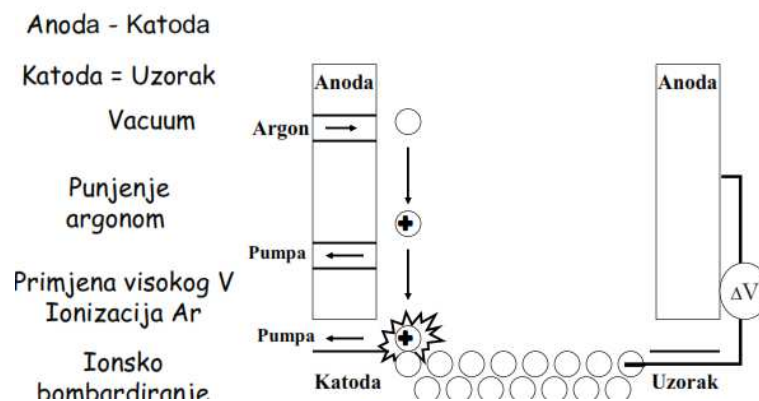
Brzina ohlađivanja direktno utječe na mikrostrukturu odljevka, a time i na njegova mehanička svojstva. Također, ima značajan utjecaj i na sklonost legure prema nastanku toplih pukotina. Manja brzina ohlađivanja smanjuje sklonost legure prema nastanku toplih pukotina. Tijekom sporijeg ohlađivanja stvara se čvršće povezana mreža, a film rastaljenog metala je deblji te omogućava bolje i duže međudendritno napajanje. Takav film omogućuje i naknadno popunjavanje pukotina ukoliko one nastanu.

Sama brzina ohlađivanja određena je vrstom kalupa, zbog čega se određene legure mogu lijevati u pijesak, dok za lijevanje u kokile ne dolaze u obzir zbog velike sklonosti prema nastanku toplih pukotina.

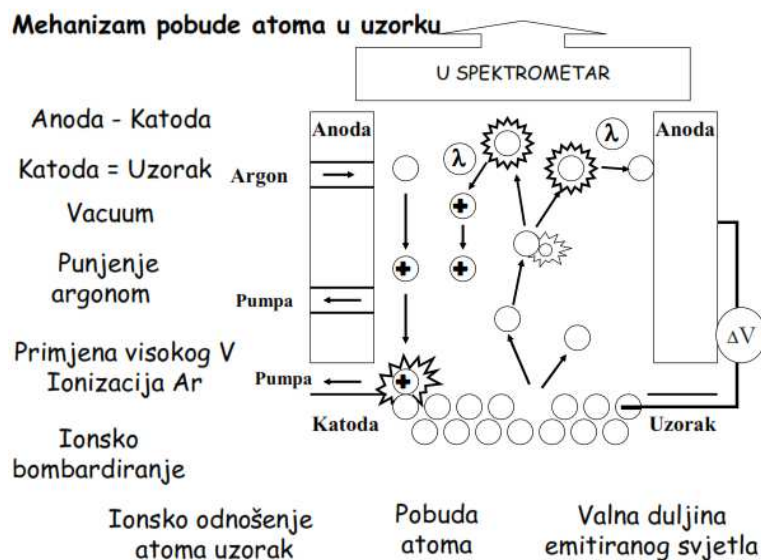
## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

### 5.1. Kemijski sastav legura

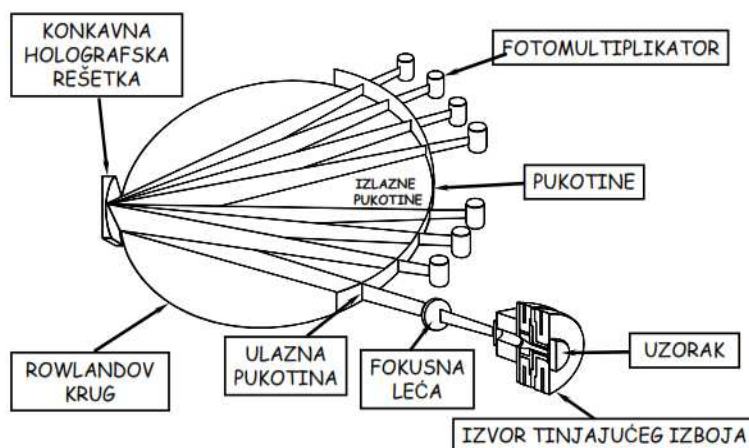
Za kemijsku analizu korišten je uređaj GDS 850 Leco. Uređaj koristi tehniku optičke emisijske spektrometrije s tinjajućim izbojem. Princip rada stroja prikazan je na slikama 19, 20, 21.



Slika 19. Princip rad uređaja GDS 850 Leco



Slika 20. Mehanizam pobude uređaja GDS 850 Leco



Slika 21. Princip određivanja elemenata

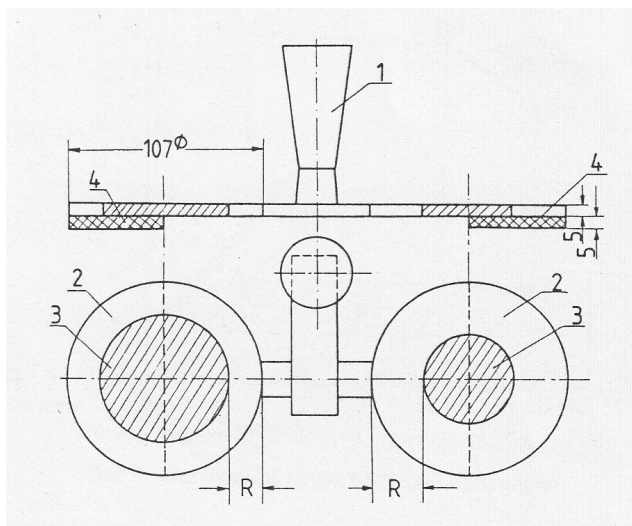
Tablica 2. Prikazan je kemijski sastav ispitivanih legura

UZORAK	%									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
1	9.30	1.25	0.75	0.09	1.40	0.07	0.08	0.46	0.054	ostatak
3	0.49	0.07	0	0.006	1.17	0.005	0.006	0.008	0.003	ostatak
5	9.10	1.25	0.72	0.09	1.30	0.06	0.08	0.41	0.054	ostatak
7	0.82	0.15	0.02	0.015	1.20	0.015	0.008	0.02	0.004	ostatak

Na temelju kemijske analize radi se o legurama AlMg1 (uzorci 3 i 7) i AlSi9Mg (uzorci 1 i 5) sa povećanim udjelom željeza.

## 5.2. Priprema istraživanja

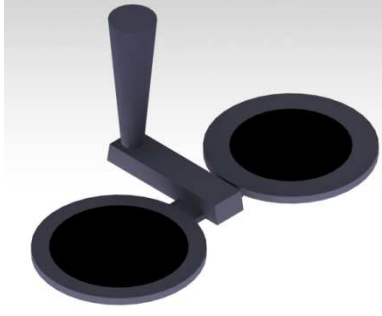

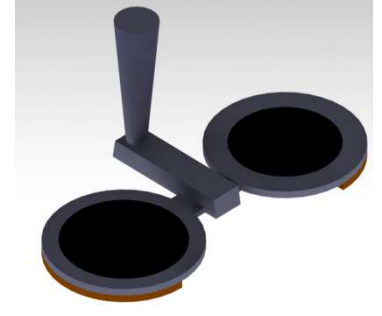
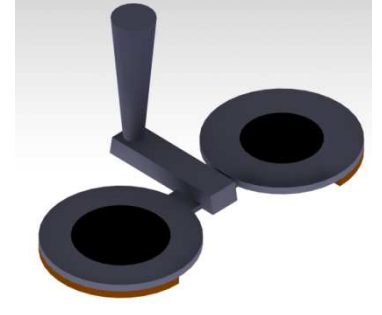
Modeli su nacrtani pomoću CATIA v5 softvera. Četiri su različita modela od kojih dva s hladilom, dva bez. Svaki model (slika 22) se sastoji od dva prstena, ušća, razvodnika, spusta. Svi prstenovi su vanjskog promjera 107 mm razlika je u unutarnjim promjerima koji su redom dimenzija 55 mm, 65 mm, 75 mm, 85 mm Hladila su polovice valjaka promjera 107 mm i nalaze se s donje strane prstena suprotno od ušća. Prsten i hladila su debljine 5 mm. U tablicama 3 i 4 prikazan je plan istraživanja.



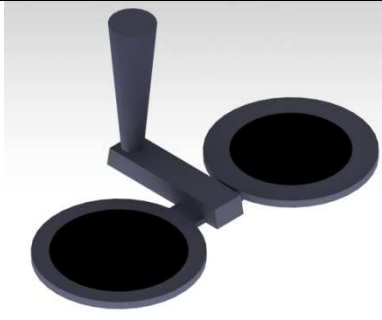

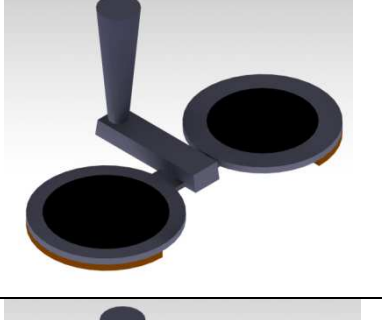
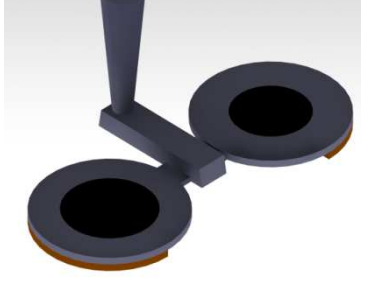
Slika 22. Konstrukcija kalupa za određivanje sklonosti toplim pukotinama. 1-spust, 2-odljevnik, 3-metalna jezgra promjenjivog promjera, 4-hladilo, R-promjenjiva širina prstena



Tablica 3. Plan istraživanja-pretpokusa

	R.br.	SASTAV LEGURE	MODEL	ŠIRINA PRSTENA (R)		
				LIJEVO	DESNO	
PRETPOKUS	1	AlSi12		11 mm	16 mm	BEZ HLADILA
	2			21 mm	26 mm	
	3	AlMg1		11 mm	16 mm	
	4			21 mm	26 mm	

Tablica 4. Plan istraživanja-pokus

	R.br.	SASTAV LEGURE	MODEL	ŠIRINA PRSTENA (R)		
POKUS	5	AlSi9Mg		11 mm	16 mm	HLADILA
	6			21 mm	26 mm	
	7	AlMg1		11 mm	16 mm	
	8			21 mm	26 mm	

### 5.3. Izrada modela prstena, jezgri i hladila

Čelične jezgre i hladila izrezane su iz lima debljine 5 mm na plazma rezačici marke Vanad slika 23. Jezgre su valjkastog oblika redom promjera 55 mm, 65 mm, 75 mm,

85 mm, te dva puta model prstena 107 mm. Izrezana su četiri hladila koja čine polovinu valjkaste jezgre najvećeg promjera 107 mm.



Slika 23. Plazma rezač Vanad za vrijeme izrezivanja jezgri.

Model uljavnog sustava izrađen je od drveta prema podacima iz nacрта na slici 22.

## 5.4. Izrada kalupa

### 5.4.1. Izrada kalupa za pretpokus

Izrađena su 4 jednokratna pješčana kalupa

Izrada donjaka:

-nasipavanje kalupne mješavine, slika24

-sabijanje kalupne mješavine, slika 25

-okretanje donjaka za 180°.



Slika 24. Nasipavanje kalupne mješavine



Slika 25. Sabijanje kalupne mješavine

Izrada gornjaka:

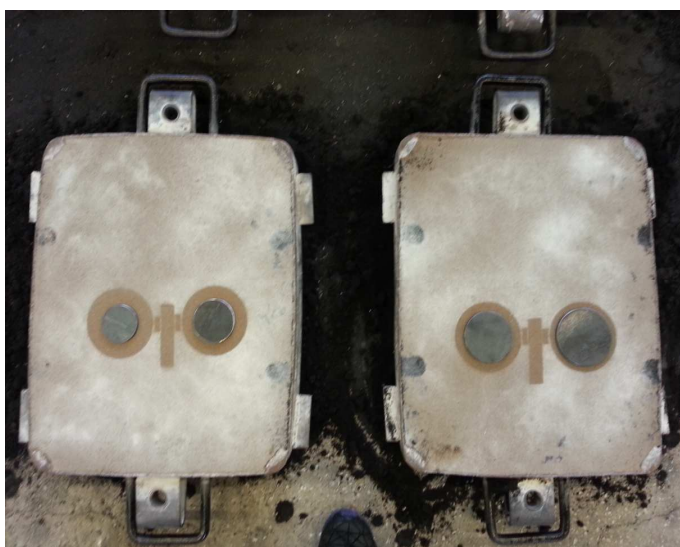
- postavljanje okvira gornjaka na donjak
- postavljanje modela spusta, razvodnika i ušća, slika 26
- nasipavanje kalupne mješavine
- sabijanje kalupne mješavine te odstranjivanje viška, slika 27
- uklanjanje modela spusta i pojila
- umetanje jezgri, slika 28
- sklapanje kalupa, slika 29.



Slika 26. Namješten okvir gornjaka na donjak te pozicionirani modeli



Slika 27. Odstranjivanje viška kalupne mješavine



Slika 28. Prikazuje pozicionirane jezgre



Slika 29. Spojeni gornjak i donjak

#### **5.4.2. Izrada kalupa za pokus**

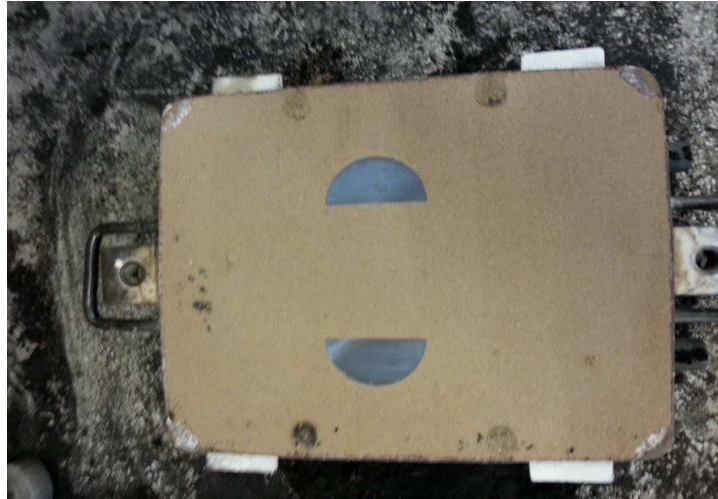
Razlika pretpokusa i pokusa kod izrade kalupa je u primjeni hladila u donjaku, slika 30. Ostali koraci su isti kao u točki 5.4.1.

Izrada donje kalupne ploče:

- postavljanje hladila u donjak*
- nasipavanje kalupne mješavine na model*
- sabijanje kalupne mješavine*
- okretanje donjaka za 180°, slika 31*



Slika 30. Prikaz pozicioniranog okvira donjaka i hladila



Slika 31. Donjak sa hladilima

## 5.5. Lijevanje

### 5.5.1. Pretpokus sa legurama AlSi12 i AlMg1

#### 5.5.1.1. Lijevanje legure AlSi12

Provedeno je lijevanje legure AlSi12 . Legura se talila u električnoj peći na slici 32 na temperaturi od 770°C. Rastaljenoj leguri u peći izmjerena je temperatura od 757°C. Rastaljeni metal prenesen je od peći do kalupa u malom metalnom loncu koji je prethodno predgrijan plinskim plamenom. Također je premazan zaštitnim premazom da se legura ne bi naljepila. Temperatura ulijevanja iznosila je  $T_u=681^{\circ}\text{C}$  što je vidljivo na slici 33.



Slika 32. Peć za taljenje aluminija



Slika 33. Mjerenje temperature prije ulijevanja taljevine u kalup

#### 5.5.1.2. Lijevanje legure AlMg1

Provedeno je lijevanje legure AlMg1. Legura se talila u električnoj peći na slici 32 na temperaturu od 770°C. Rastaljenoj leguri u peći izmjerena je temperatura od 754°C. Rastaljeni metal prenesen je od peći do kalupa u malom metalnom loncu koji je



prethodno predgrijan plinskim plamenom. Temperatura ulijevanja iznosila je  $T_u=709^\circ\text{C}$  što je vidljivo na slici 34.



Slika 34. Mjerenje temperature prije lijevanja u kalup

### **5.5.2. Pokus sa legurama $\text{AlSi9Mg}$ i $\text{AlMg1}$**

#### **5.5.2.1. Lijevanje legure $\text{AlSi9Mg}$**

Provedeno je lijevanje legure  $\text{AlSi9Mg}$ . Legura se talila u električnoj peći na slici 32 na temperaturu od  $770^\circ\text{C}$ . Rastaljenoj leguri u peći izmjerena je temperatura od  $735^\circ\text{C}$  što se vidi na slici 35. Rastaljeni metal prenesen je od peći do kalupa u malom metalnom loncu. Temperatura ulijevanja iznosila je  $T_u=690^\circ\text{C}$ .



Slika 35. Prikaz mjerenja temperature legure u peći

### 5.5.2.2. Lijevanje legure AlMg1

Provedeno je lijevanje legure AlMg1. Legura se talila u električnoj peći na slici 32 na temperaturu od 770°C. Rastaljenoj leguri u peći izmjerena je temperatura od 754°C. Rastaljeni metal prenesen je od peći do kalupa u malom metalnom loncu koji je prethodno predgrijan plinskim plamenom. Također je premazan zaštitnim premazom da se legura ne naljepljuje na njega. Temperatura ulijevanja iznosila je  $T_u=709^\circ\text{C}$  što je vidljivo na slici 36.



Slika 36. Mjerenje temperature prije lijevanja u kalup

Vrijeme ulijevanja iznosilo je približno 2 sekunde u svim pokusima i pretpokusima.

### 5.6. Vađenje odljevka

Nakon ulijevanja i popunjavanja uslijedilo je hlađenje u trajanju od 5-7 minuta. Nakon hlađenja uslijedilo je istresanje odljevka i čišćenje od ostatka pijeska što se vidi na slici 37. Slika 38 prikazuje odljevke složene po redu lijevanja.



Slika 37. Prikaz istresanja odljevka iz kalupa



Slika 38. Odljevci raspoređene po brojevima

## 6. REZULTATI I RASPRAVA

### 6.1. Vizualni pregled odljevaka

Svi odljevci su detaljno pregledani, te su uočene tople pukotine u pretpokusu i pokusu. U pretpokusu topla pukotina se pojavila na odljevku broj 4 legure AlMg1 i to kod prstena s najmanjom širinom  $R = 11$  mm što se vidi na slici 39. Pukotina je na najužem prstenu mala i uočljiva, a nalazi se točno kod ušća, slika 39. Širi se u radijalnom smjeru i ne prolazi po cijeloj širini prstena.



Slika 39. Topla pukotina na odljevku broj 4 širine prstena  $R=11$ , legura AlMg1

Na prstenima širine 16, 21 i 26 mm nisu se pojavile tople pukotine. Najmanja širina prstena predstavlja najstrožu probu jer je stezanje na jezgru najveće. Kod legure AlSi12 nije došlo do pojave toplih pukotina kod ni jedne širine prstena, što upućuje da legura AlSi12 nije sklona toplim pukotinama. Taj podatak u skladu je s literaturom, zbog čega u samom pokusu ova legura nije više ispitivana. Prema podacima iz literature legura AlMg1 sklona je nastanku toplih pukotina što je pokazao i rezultat pretpokusa.

S ciljem pooštavanja uvjeta ispitivanja u pokusu su uvedena hladila. Svrha hladila je usmjeravanje skrućivanja prema ušćima, kako bi na ušću dobili toplo mjesto eng. "hot

spot“ koje će zadnje skrutnuti. Ako je legura sklona nastanku toplih pukotina na mjestima zadnjeg skrućivanja pojaviti će se topla pukotina.

Na temelju rezultat pretpokusa za pokus je izabrana legura AlMg1 i legura AlSi9Mg sa povećanim sadržajem željeza koja nam je bila na raspolaganju u Laboratoriju.

U pokusu, tople pukotine pojavile su se kod legure AlMg1 kod svih širina prstena R slika 40. Kod legure AlSi9Mg nije došlo do pojave tople pukotine.

Tople pukotine pojavile su se bliže hladilu, a ne na području ušća kao što je očekivano i kao što je to bio slučaj u pretpokusu. Kod prstenova širine 16 i 26 mm pojavila se jedna pukotina, dok je kod prstenova širine 11 i 21 mm došlo do pucanja prstena s obje strane. Uvjeti za nastanak pukotine su se pojavili prije dosezanja toplog mjesta u blizini ušća. Rezultati pokazuju da je legura AlMg1 vrlo sklona nastanku toplih pukotina i ne smije se lijevati u kalupe koji ne dopuštaju slobodno stezanje legure prilikom skrućivanja.

Na slici 41 prikazani su detalji pukotina prstena širine 11 i 21 mm.



a) R=26 mm

b) R=21mm



c) R=16 mm

d) R=11 mm

Slika 40. Tople pukotine kod legure AlMg1 za sve širine prstenova



a) R=21

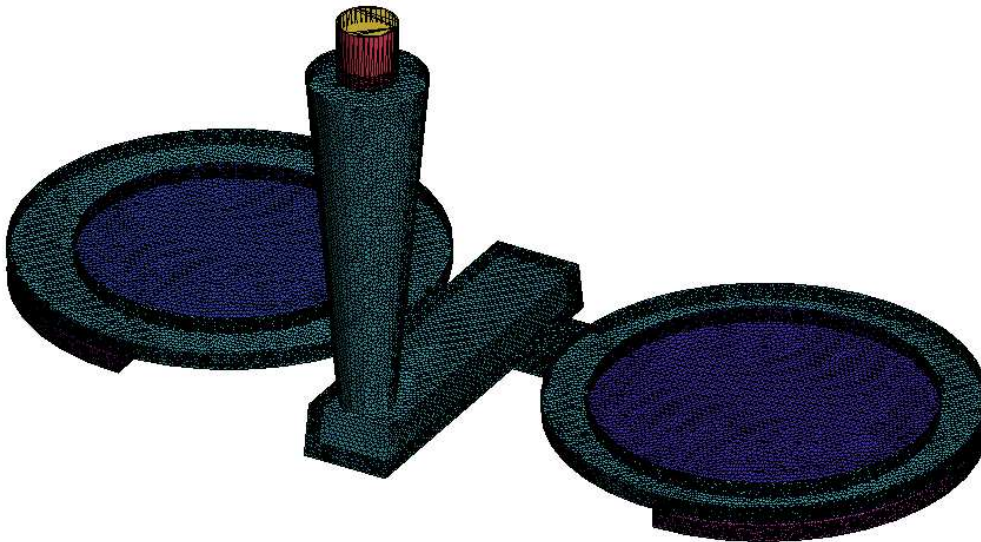


b) R=21mm

Slika 41. Prikaz detalja pukotina prstenova širine

## 6.2. Simulacija lijevanja i skrućivanja

Za simulaciju lijevanja i skrućivanja korišten je program QuikCast. Izrada simulacije počinje učitavanjem STL datoteke i generiranjem mreže, slika 42. Zatim se dimenzionira kalup, slika 43 i generira mreža kalupa s odljevkom, slika 44.



Slika 42. Generiranje mreže i mjesta uljevanja.

### 6.2.1 Parametri korišteni u simulaciji

Broj ćelija u simulaciji: 2.071.968

Hidraulički parametri:

Brzina uljevanja: uži prstenovi 0,498 m/s ; širi prstenovi 0,481 m/s

Vrijeme uljevanja: 1,2 s ; 1,5 s

Permeabilnost:

GF index: 120

Prosječna debljina kalupa: 10 cm

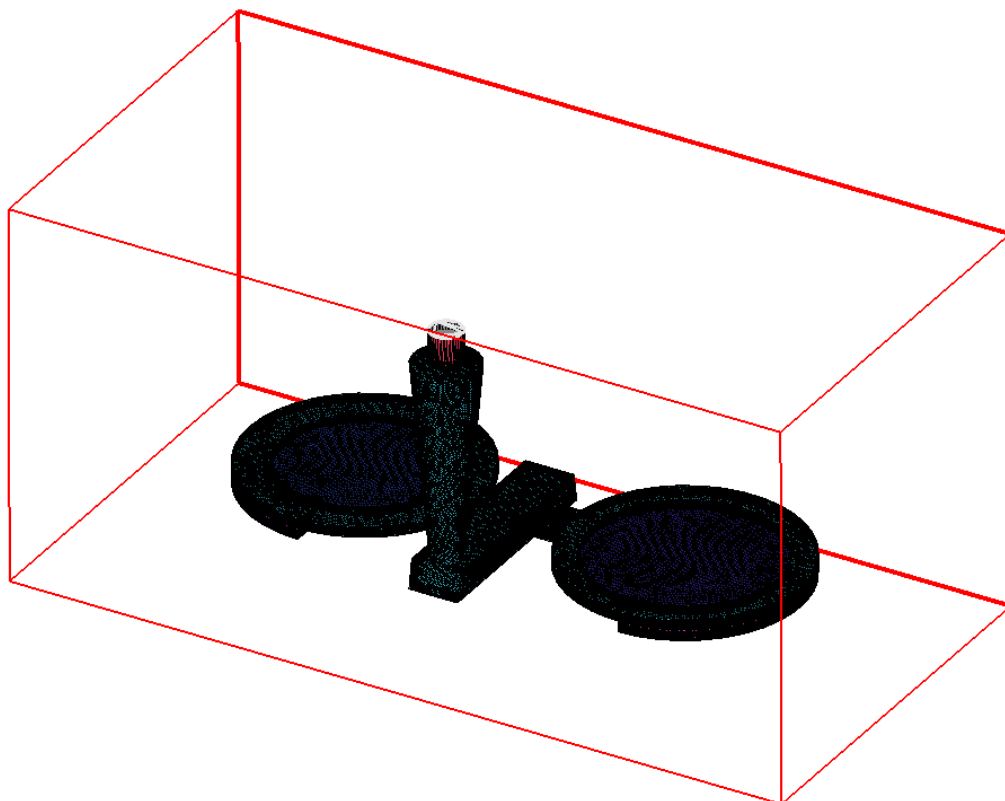
Index hrapavosti: 0,05 (za pješčane kalupe)

Toplinski parametri:

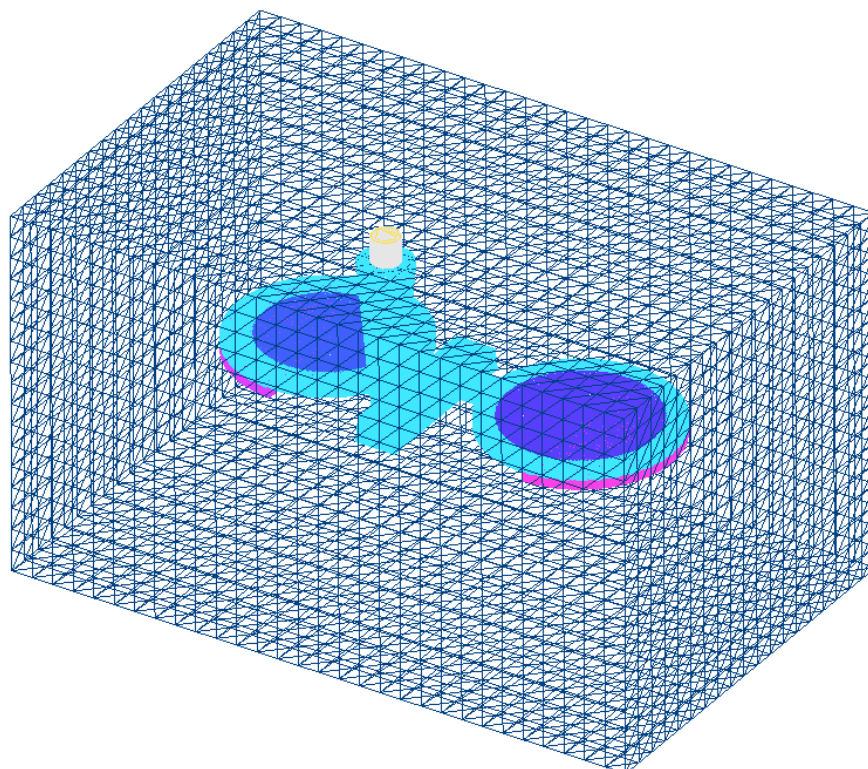
Temperatura uljevanja: AlMg1 709°C ; AlSi9Mg 690°C

Koeficijent emisivnosti: 0,9 (za pješčane kalupe)

Početna temperatura kalupa: 20°C



Slika 43. Dimenzioniranje kalupa

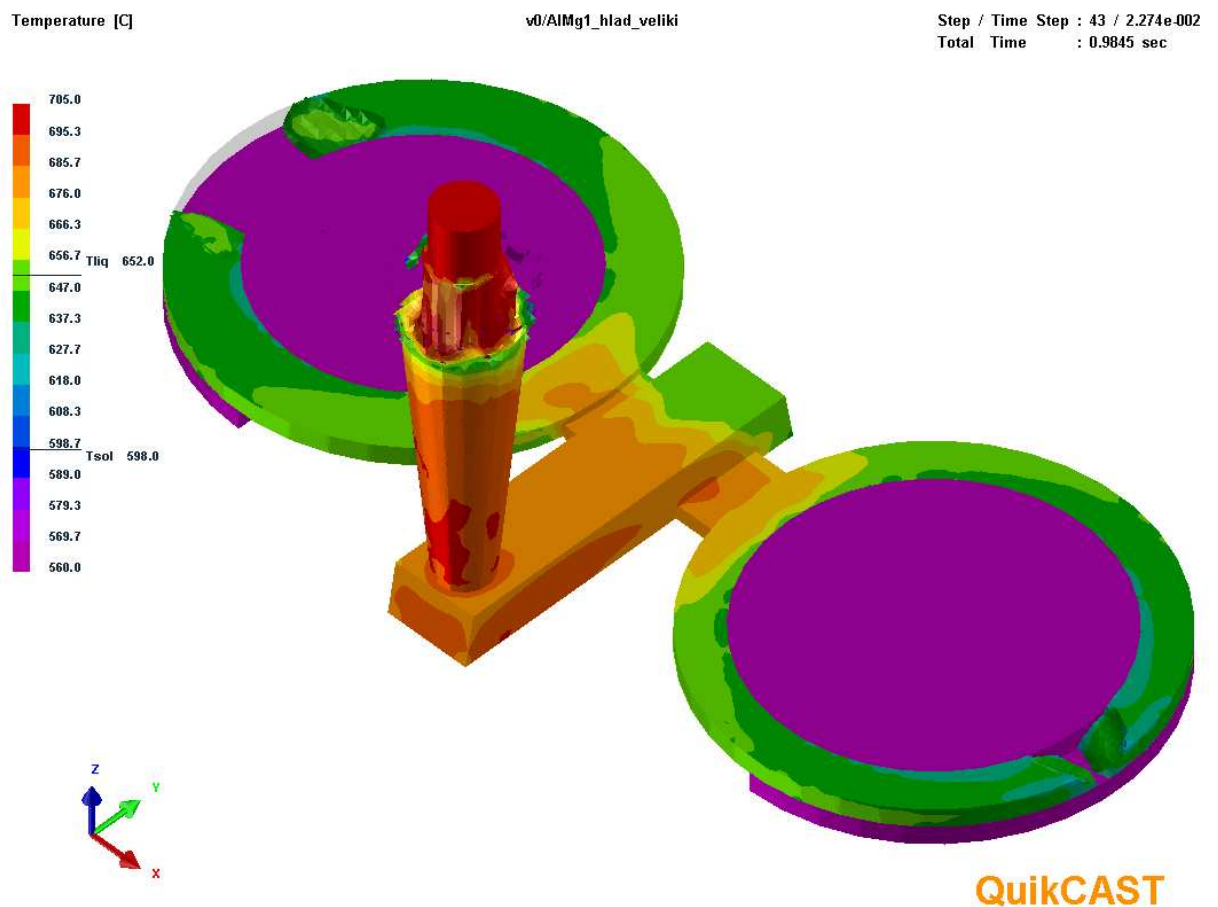


Slika 44. Zatvoreni kalup

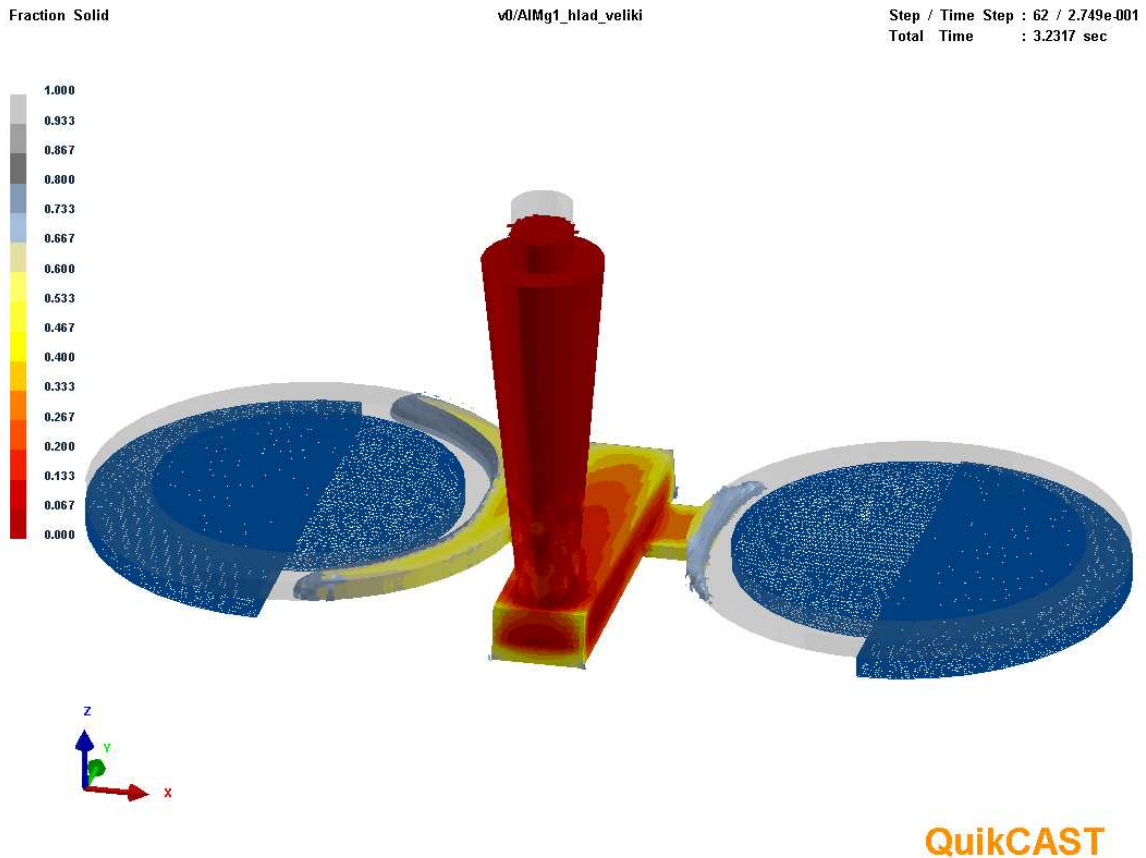


### 6.2.2 Lijevanje legure AlMg1 sa hladilima

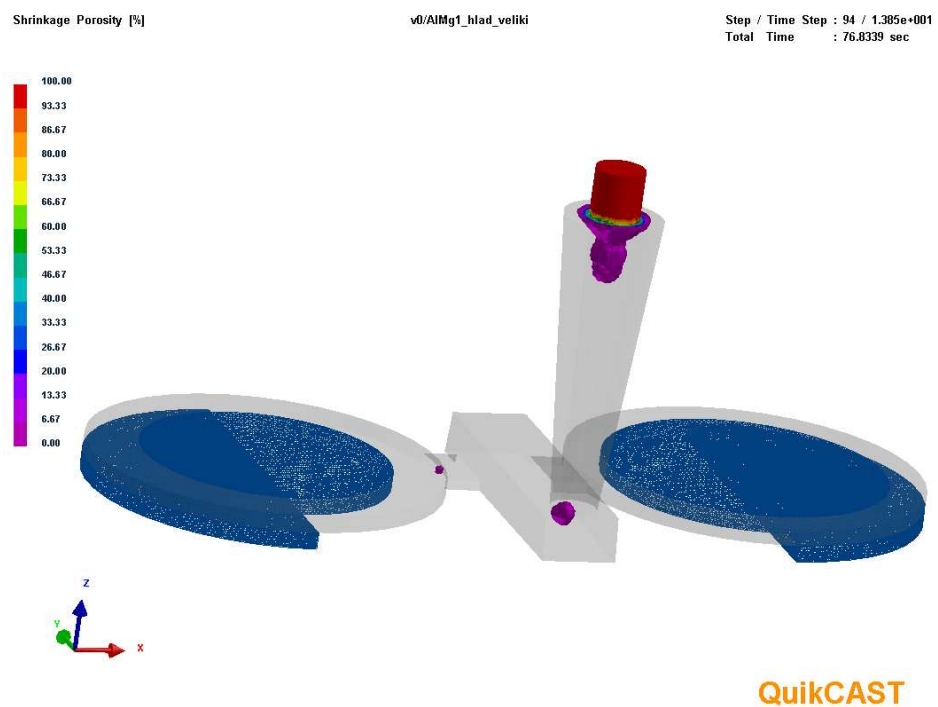
Prikazom punjenja kalupa (slika 45) možemo vidjeti najtoplija mjesta tijekom ulijevanja ('hot spot'). Ujedno se može pretpostaviti da će se na tim mjestima odljevak zadnje skrutnuti. To znači da je najveća vjerojatnost da će se na tim mjestima pojaviti topla pukotina. Prikazima mjesta zadnjeg skrućivanja, slika 46 nadalje dokazujemo da se na tim mjestima odljevak zadnje skrućuje. Na tim mjestima vidi se i pojava poroznosti skupljanja, slika 47.



Slika 45. Prikaz punjenja kalupa

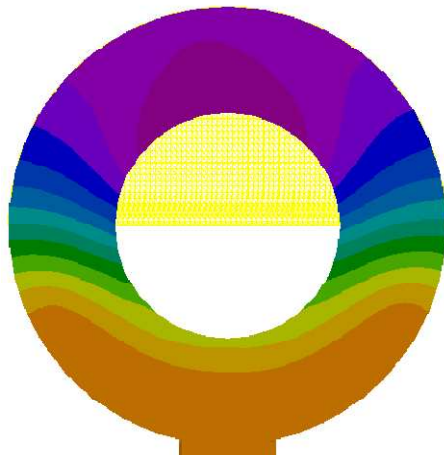
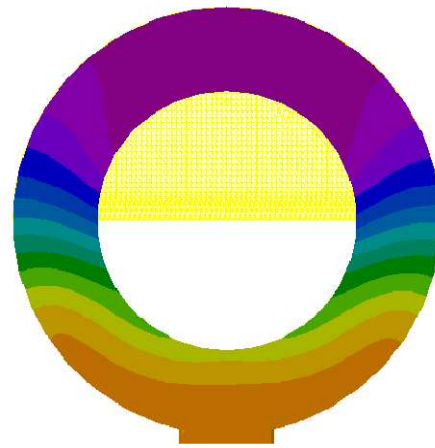
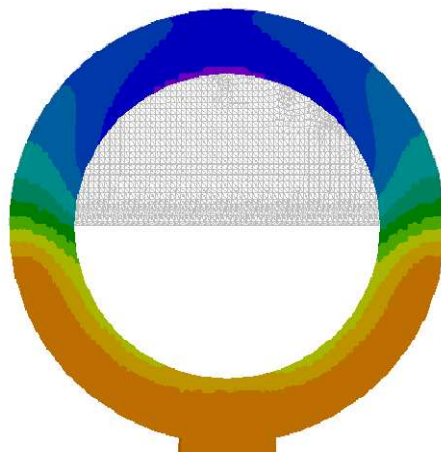
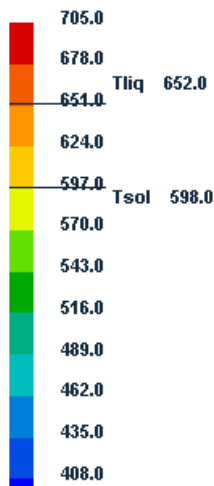
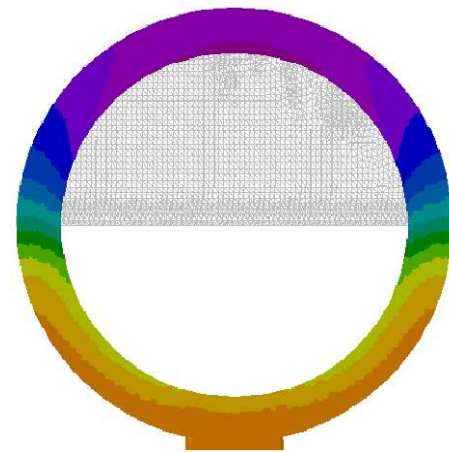


Slika 46. Prikaz mjesta zadnjeg skrućivanja, nakon 3,23 s.



Slika 47. Mjesta poroznosti.

Na slici 48 prikazana je simulacija skrućivanja prstenova od legura AlMg1. Na temelju položaja pukotina dobivenih pokusom određeno je vrijeme nastanka pukotine. Pretpostavljeno je pucanje pri solidus temperaturi te je položaj solidus temperature na simulaciji vizualno usklađen sa položajem pukotine u pokusu. Zatim je očitano vrijeme proteklo od početka skrućivanja  $t$ . Širi prstenovi sporije se hlade pa je vrijeme do nastanka pukotine duže.

a)  $R=26$  mm,  $t=4.4$  s.b)  $R=21$  mm,  $t=4.4$  s.c)  $R=16$  mm,  $t=2.03$  s.d)  $R=11$  mm,  $t=2.03$  s.

Slika 48. Simulacija položaja pukotine na solidus liniji, legura AlMg1 sa hladililima,  $R$ -širina prstena,  $t$ -vrijeme proteklo od početka skrućivanja

## 7. ZAKLJUČAK

U radu je provedno ispitivanje sklonosti nastanku toplih pukotina aluminijevih legura AlSi12, AlMg1 i AlSi9Mg. Korištena je metoda prstenova kod koje se koristi metalna jezgra za dobivanje šupljine u prstenu. Prstenovi se stežu oko metalne jezgre što izaziva zaostala naprezanja. Ukoliko je materijal sklon toplim pukotinama dolazi do loma. Vanjski promjer prstena je konstantan a mijenja se unutarnji promjer prstena. U užem prstenu odnosno prstenu sa većim unutarnjim promjerom javlja se veće naprezanje prilikom hlađenja i skrućivanja. Što je uži prsten to je stroža proba. Još strožija proba postiže se primjenom hladila.

Na temelju vizualnog pregleda prstenova širina 26, 21, 16 i 11 mm, može se zaključiti da legure AlSi12 i AlSi9Mg nisu sklone nastanku toplim pukotinama jer na niti jednom prstenu nije došlo do pojave pukotine.

Legura AlMg1 vrlo je sklona nastanku toplih pukotina što je utvrđeno još u pretpokusu bez hladila gdje se pojavila pukotina na prstenu širine 11 mm. Povećanjem strogosti probe uvođenjem hladila došlo je do pojave pukotina na svim širinama prstena.

Simulacijom je provjereno popunjavanje kalupa i skrućivanje odljevaka te je utvrđeno da su pukotine kod širih prstenova nastale 4.4 s od početka skrućivanja, a kod užih 2.03 s.

Rezultati pokazuju da je legura AlMg1 vrlo sklona nastanku toplih pukotina i ne smije se lijevati u kalupe koji ne dopuštaju slobodno stezanje legure prilikom skrućivanja.

## 8.LITERATURA

- [1] Bonačić Mandinić, Z.; Budić, I.: Osnove tehnologije kalupljenja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2001.
- [2] Unkić, F; Glavaš Z.: Osnove lijevanja metala, Zbirka riješenih zadataka,2009.
- [3] [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_pro\\_strpj/djelatnici/acukor\\_predavanja/](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_pro_strpj/djelatnici/acukor_predavanja/)
- [4][http://www.pfri.uniri.hr/~tomac/TMO/TMO%209%20%204\\_4.07.PDF](http://www.pfri.uniri.hr/~tomac/TMO/TMO%209%20%204_4.07.PDF)
- [5] 44. R.E. Samallman in R.J. Bishop: Modern Physical Metallurgy & Materials Engineering (Sixth Edition), Butterworth-Heinemann ©Reed Educational and Professional Publishing Ltd.,Oxford, 1999.
- [6]D.P. Parton & M.A. Hedges: A Guide to Melt Treatment in the Aluminium Foundry,] ©London & Scandinavian Metallurgical Co. Limited, 1998.
- [7] B. Lux, W. Kurz, Zur Keimbildung beim Erstarren und Schmelzen von Metallen und Legierungen, Z. Metallkde, **63**(1972) 10, p. 594-606.
- [8]D.A. Porter, K.E. Easterling: Phase Transformations in Metals and Alloys, Chapman&Hall, Second Edition, London, 1992.
- [9] J.D. Hunt, K.A. Jackson: Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 236(1966), p. 843.
- [10] M.C. Flemings: Solidification processing, McGraw-Hill, New York, 1974.
- [11]W. Kurz, D.J. Fisher, Fundamentals of Solidification, Trans Tech Publications, Switzerland, 1986.
- [12] D.J. Fisher, W. Kurz: A Theory of Branching Limited Growth of Irregular Eutectics Acta Metallurgica, **28**(1980), p. 777 – 794.
- [13]P. Magnin, W. Kurz: Solidification of Eutectics, Metals Handbook, Ninth Edition, Castings, **15**(1988), p. 119-125.
- [14] Q.G. Wang; D. Apelian, L. Arnberg; S.Gulbrandsen-Dahl; J.Hjelen, Solidification of Eutectic in Hipoeutectic Al-Si Alloy, AFS Transactions 99-149, str.249-256.
- [15] Dostupno na: <http://www.pse.pbf.hr/> (1.9.2012.)
- [16] Galić, M.; Kelava, P.; Ladić, S.; Žura, V.: Ljevarstvo, Zagreb, 1977

- [17] Tarandek Ž.: Utjecaj aluminijskih dijelova na pojavu vodika u mjernom transformatoru, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [18] Savez ljevača Hrvatske: Ljevački priručnik, Zagreb, 1985.
- [19] [http://www.google.hr/imgres?um=1&hl=hr&sa=N&biw=1241&bih=584&tbm=isch&tbnid=6x39f11EZtMs9M:&imgrefurl=http://hercegbosna.org/forum/gospodarstvo/cijene-aluminija-lme-plinovod-plo-e-mostar-plinska-elektrana-t8270.html&docid=U-SMegsNp6DSMM&imgurl=http://www.desktopwallpaper2.com/thumb/2ca28110f411c464b5928ff180f1c1a8.jpg&w=411&h=280&ei=7YeeUMGaOcTAtAb\\_hoGlCg&zoom=1&iact=rc&dur=151&sig=101812333853045135819&page=1&tbnh=163&tbnw=255&start=0&ndsp=18&ved=1t:429,r:2,s:0,i:71&tx=110&ty=55](http://www.google.hr/imgres?um=1&hl=hr&sa=N&biw=1241&bih=584&tbm=isch&tbnid=6x39f11EZtMs9M:&imgrefurl=http://hercegbosna.org/forum/gospodarstvo/cijene-aluminija-lme-plinovod-plo-e-mostar-plinska-elektrana-t8270.html&docid=U-SMegsNp6DSMM&imgurl=http://www.desktopwallpaper2.com/thumb/2ca28110f411c464b5928ff180f1c1a8.jpg&w=411&h=280&ei=7YeeUMGaOcTAtAb_hoGlCg&zoom=1&iact=rc&dur=151&sig=101812333853045135819&page=1&tbnh=163&tbnw=255&start=0&ndsp=18&ved=1t:429,r:2,s:0,i:71&tx=110&ty=55)
- [20] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, Zagreb, 2002.
- [21] Dostupno na: <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/spojevi.html> (3.9.2012.)
- [22] I. Mihalic, I. Mance, I. Kramer, B. Bauer: *Aluminijske legure za rad na povišenim temperaturama*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska
- [23] Molten Aluminum Processing and Casting, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Specialty Handbook, urednik: J. R. Davis, ASM International
- [24] [http://www.etfos.unios.hr/upload/OBAVIJESTI/obavijesti\\_preddiplomski/OZNA%204%20CAVANJE\\_LAKIH\\_I\\_OBOJENIH\\_METALA\\_02-12-2009.pdf](http://www.etfos.unios.hr/upload/OBAVIJESTI/obavijesti_preddiplomski/OZNA%204%20CAVANJE_LAKIH_I_OBOJENIH_METALA_02-12-2009.pdf)
- [25] [http://mmg.materials.drexel.edu/wiki/images/c/ce/AlMg\\_phase\\_diagram.png](http://mmg.materials.drexel.edu/wiki/images/c/ce/AlMg_phase_diagram.png)
- [26] [http://v.castelhano.free.fr/probatoire/e\\_dur\\_structural\\_fichiers/image002.gif](http://v.castelhano.free.fr/probatoire/e_dur_structural_fichiers/image002.gif)
- [27] J. Jorstad, D. Apelian, Hypereutectic Al-Si alloys: *Practical casting considerations*, International Journal of Metalcasting, 6 (2009), 13-36.
- [28] Z. Asghar, G. Requena, F. Kubel, The role of Ni and Fe aluminides on the elevated temperature strength of AlSi alloy, *Materials Science and Engineering A* 527 (2010), 5691-5698.
- [29] Stephan Hasse, Pogreške na odljevcima, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, Zagreb, 2003
- [30] A.B. Phillion, A.B., Cockcroft, S. L., Lee, P.D.: A new methodology for measurement of semi-solid constitutive behavior and its application to examination of as-cast porosity and hot tearing in aluminum alloys, *Materials Science and Engineering*, 491 (2008), pp. 237-247.

- [28] Hatami, N., Babaei, R., Dadashzadeh, M., Davami, P.: Modeling of hot tearing formation during solidification, *Journal of Materials Processing technology*, 205 (2008), pp. 506-513.
- [31] Kamguo Kamga, H., Larouche, D., Bournane, M., Rahem, A.: Hot tearing of aluminium-copper B206 alloys with iron and silicon additions, *Materials Science and Engineering*, 527 (2010), pp. 7413-7423.
- [32] Hasse, S.: *Pogrješke na odljevcima*, HULJ, Zagreb, 2003, pp. 286-295.
- [33] Li, S., Sadayappan, K., Apelian, D.: *Hot Tearing of Aluminium Alloys – a Critical Literature Review*, Ph.d Thesis, Metal Processing Institute, Worcester, 2011.
- [34] Pabel, T., Bozorgi, S., Kneissl, C., Haberl, K., Schumacher, P.: Einfluss von Kupfer- und Magnesiumgehalt auf die Warmrissneigung bei AlSi7MgCu-Legierungen, *Giesserei-Praxis*, 12 (2010), 1-7.