

# Utjecaj povratnog materijala u procesu taljenja na mehanička svojstva aluminijske legure A1Si9Cu

---

**Katarinčić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Istrian University of applied sciences / Istarsko veleučilište - Università Istriana di scienze applicate**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:212:133488>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-05**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)



image not found or type unknown



**Istarsko veleučilište**  
**Università Istriana**  
**di scienze applicate**

**KRATKI STRUČNI STUDIJ POLITEHNIKE**

**ZAVRŠNI RAD**

**UTJECAJ POVRATNOG MATERIJALA U PROCESU TALJENJA NA  
MEHANIČKA SVOJSTVA ALUMINIJSKE LEGURE AISi9Cu**

**Ivan Katarinčić**

**Pula, rujan 2019.**



## **Izjava o samostalnosti izrade završnog rada**

Izjavljujem da sam završni rad na temu UTJECAJ POVRATNOG MATERIJALA U PROCESU TALJENJA NA MEHANIČKA SVOJSTVA ALUMINIJSKE LEGURE AlSi9Cu samostalno izradio uz pomoć mentora dr.sc. Davora Stanića koristeći navedenu stručnu literaturu i znanje stečeno tijekom studiranja.

U Puli, rujan 2019.

Ivan Katarinčić

# **KRATKI STRUČNI STUDIJ POLITEHNIKE**

## **UTJECAJ POVRATNOG MATERIJALA U PROCESU TALJENJA NA MEHANIČKA SVOJSTVA ALUMINIJSKE LEGURE AlSi9Cu**

Student: Ivan Katarinčić

Studijski program: Kratki stručni studij

Kolegij: Tehnologija i proizvodna tehnika

Mentor: pred.dr.sc. Davor Stanić

Pula, rujan 2019.

## **Sažetak:**

U ovom završnom radu opisan je nastanak aluminijske legure AlSi9Cu u ljevaonici tlačnog lijeva i ispitana su mehanička svojstva legure nastale sa različitim postocima povratnog materijala. Kroz završni rad opisan je sam proces taljenja, proces nastanka povratnog materijala i objašnjen je postupak ispitivanja mehaničkih svojstva legure. Na temelju ispitivanja mehaničkih svojstva legura sa različitim postotkom povratnog materijala izvedena je usporedba rezultata ispitivanja i donesen je zaključak o utjecaju povratnog materijala na mehanička svojstva legure AlSi9Cu.

## **Summary:**

In this final paper is described the process of aluminium alloy AlSi9Cu formation in the die pressure casting foundry and there are tested mechanical properties of alloys formed with different percentages of returned material. Throught the final paper is described the melting process, the process of returned material forming and is explained the process of testing for mechanical properties of aluminium alloy. Based on the mechanical properties testings of alloys with different percentages of returned material is done comparison of the test results and is been made conclusion on the impact of the returned material on the mechanical properties of AlSi9Cu alloys.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Opis i definicija problema .....	1
1.2. Cilj i svrha rada.....	1
1.3. Hipoteza.....	1
1.4. Metode rada .....	1
1.5. Struktura rada .....	2
2. PROCES TALJENJA.....	3
2.1. Peći za taljenje Al-legure.....	3
2.1.1. Plinska peć za taljenje Botta .....	4
2.2. Utjecaj taljenja na kemijski sastav legure.....	5
2.3. Utjecaj taljenja na oksidaciju taline.....	6
2.4. Utjecaj taljenja na naplinjenost taline.....	7
2.5. Transport taline u ljevaonici .....	10
2.6. Degazacija na uređaju „FOSECO-tip FDU“ i transport taline na lijevanje.....	11
3. PROCES TLAČNOG LIJEVANJA.....	15
3.1. Tlačni lijev .....	16
3.1.1. Tlačno lijevanje s toplom komorom .....	18
3.1.2. Tlačno lijevanje s hladnom komorom.....	19
3.2. Tehnologije za poboljšanje odljevaka .....	20
3.3. Alati za tlačno lijevanje .....	22
4. METODE KONTROLE ALUMINIJSKE TALINE.....	24
4.1. Vizualna kontrola ingota i taline .....	24
4.2. Kontrola kemijskog sastava i utjecaj pojedinih elemenata.....	25
4.3. DTA (Diferencijalno termička analiza) slitina .....	27
4.4. Kontrola naplinjenosti taline .....	27
4.5. Metalografska kontrola Al-slitina.....	29
4.6. Kontrola mehaničkih svojstva .....	30
4.6.1. Tijek ispitivanja .....	32

4.6.2. Dijagram kidanja $F - \Delta L$ .....	33
4.6.3. Dijagram naprezanje – istežanje $\sigma - \varepsilon$ .....	34
4.6.4. Konvencionalna granica razvlačenja $R_{P0,2}$ .....	37
5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA .....	39
5.1. Priprema taline od 100,0% povratnog materijala .....	40
5.2. Lijevanje uzoraka za ispitivanje .....	41
5.3. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće materijala .....	42
6. ZAKLJUČAK .....	46
LITERATURA.....	47



## POPIS SLIKA

Slika 1. Peć Botta i prikaz glavnih dijelova peći: 1. peć, 2. lift za ukrcaj transportnih kolica, 3. vrata za čišćenje peći, 4. pribor za čišćenje peći, 5. plamenici, 6. napa za dimne plinove 7. transportna kolica i 8. otvor za izlivanje slitine. [3] .....	4
Slika 2. Prikaz taljenja u peći Botta [3] .....	5
Slika 3. Oksidne kožice i oksidi vidljivi na metalografskom uzorku (odljevak tlačno odliven) [1] .....	7
Slika 4. Shematski prikaz mogućih izvora napljinjenosti taline [1] .....	8
Slika 5. Izlivanje taline iz peći za taljenje Botta u transportni lonac [Autor] .....	11
Slika 6. Shematski prikaz djelovanja uređaja za degazaciju taline [1] .....	12
Slika 7. Sinoptik operacija pripreme taline za slitinu AlSi9Cu [1] .....	14
Slika 8. Izgled ćelije s osnovnim elementima: : 1. stroj za tlačno lijevanje, 2. zaštitna vrata, 3. hidraulički agregat, 4. akumulatori II i III faze, 5. upravljački ormari, 6. jedinica za temperiranje alata, 7. automat za premazivanje alata, 8. mjerači protoka, 9. preša za obrez [3] .....	17
Slika 9. Robot za iznos odljevaka [3] .....	17
Slika 10. Peć za održavanje temperature taline [3] .....	17
Slika 11. Shema tlačnog lijevanja s toplom komorom [11] .....	18
Slika 12. Shema tlačnog lijevanja s hladnom komorom [3] .....	19
Slika 13. Faze ciklusa tlačnog lijevanja hladnom komorom [3] .....	20
Slika 14. Dinamički ventil [3] .....	21
Slika 15. Statički ventil [3] .....	21
Slika 16. Usporedba klasičnog i squeeze načina tlačnog lijevanja [3] .....	21
Slika 17. Semi-solid lijevanje [3] .....	22
Slika 18. Presjek alata za tlačno lijevanje [7] .....	22
Slika 19. Mehanički klizač [7] .....	23
Slika 20. Krug temperiranja gravure [7] .....	23
Slika 21. Spektrometar THERMO - ARL 3460 ADVANTAGE [Autor] .....	25
Slika 22. Krivulje ohlađivanja za tri mjerna lončića za slitinu AlSi10Mg i odgovarajuće mikrostrukture [2] .....	27
Slika 23. Dijagram topivosti vodika ovisno o temperaturi [2] .....	28
Slika 24. Uređaj za lijevanje uzorka sa skrućivanjem pod vakuumom [Autor] .....	28
Slika 25. Uređaj za određivanje gustoće uzoraka [Autor] .....	29

Slika 26. Metalurški mikroskop [Autor] .....	30
Slika 27. Univerzalna kidalica [9].....	31
Slika 28. Shematski prikaz produljenja epruvete [6] .....	32
Slika 29. Dijagram kidanja [6] .....	33
Slika 30. Dijagram naprezanje – istezanje [6].....	34
Slika 31. Određivanje konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$ [6] .....	38
Slika 32. Usporedba odljevka s uljevnim sustavom i finalnog odljevka [Autor].....	39
Slika 33. Prikaz fiksne i pomične polovice ljevačkog alata montiranog na stroj za tlačno lijevanje [Autor].....	41
Slika 34. Sanduk sa odlivenim uzorcima za ispitivanje [Autor] .....	42
Slika 35. Epruvete za ispitivanje [Autor] .....	43
Slika 36. Dijagram istezanja - naprezanja a) epruvete promjera <b>d0</b> 6,4 mm b) epruvete promjera <b>d0</b> 9 mm [Autor].....	44

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati mjerenja indeksa naplinjenosti.....	40
Tablica 2. Rezultati i usporedba kemijskog sastava talina sa različitim postotkom povratnog materijala [Autor].....	41
Tablica 3. Rezultati ispitivanja epruveta promjera <b>d0</b> 6,4mm [Autor] .....	45
Tablica 4. Rezultati ispitivanja epruveta promjera <b>d0</b> 9,0 mm [Autor] .....	45

# **1. UVOD**

Proces taljenja aluminijske legure jedan je od najvažnijih procesa u skupu procesa izrade aluminijskih dijelova automobila kojima se bavi tvrtka P.P.C. Buzet u kojoj će se u svrhu završnog rada obraditi tema: Utjecaj povratnog materijala u procesu taljenja na mehanička svojstva aluminijske legure AlSi9Cu. Navedena tema obradit će se iz razloga jer sve više novih potencijalnih kupaca koji nude posao poduzeću, a koji su visoko rangirani na tržištu autoindustrije postavlja upit s kojim udjelom povratnog materijala možemo garantirati ista mehanička svojstva aluminijske legure.

## **1.1. Opis i definicija problema**

Kroz proces nastanka gotovog proizvoda iz aluminijske legure za tržište autoindustrije javljaju se podprocesu u kojima nastaje povratni materijal koji se ponovno koristi u procesu taljenja, odnosno novom procesu nastanka aluminijskog proizvoda. Kako bi se povratni materijal što bolje iskoristio potrebno ga je u točno određenom omjeru ponovno iskoristiti zajedno sa novim ulaznim materijalom s time da se mehanička svojstva novonastale taline ne promjene.

## **1.2. Cilj i svrha rada**

Cilj završnog rada je dokazati da postotak povratnog materijala u procesu taljenja ne utječe bitno na mehanička svojstva aluminijske legure AlSi9Cu. Svrha završnog rada je dobiti rezultate i analize koje će u budućnosti služiti za prikaz stečenog znanja na području procesa taljenja.

## **1.3. Hipoteza**

Udio povratnog materijala u procesu taljenja aluminijske legure AlSi9Cu ima zanemarivi utjecaj na mehanička svojstva aluminijske legure.

## **1.4. Metode rada**

Za prikupljanje podataka za ovaj rad, upoznavanje s pojmovima te pronalaženju novih tehnoloških znanja korištena je raspoloživa dokumentacija dostupna u CIMOS-u, stručna literatura i Internet. Prilikom izrade diplomskog rada korištena su teoretska znanja stečena

dosadašnjim radom u poslovnom sistemu P.P.C. Buzet-a koji su obrađeni metodom analize i sinteze, zatim deskriptivnom i grafičkom metodom kao i statističkom metodom.

### **1.5. Struktura rada**

Kroz kratak uvod upoznajemo se sa opisom i definicijom problema, ciljem i svrhom rada, hipotezom i metodom rada. U drugom dijelu objašnjen je sam proces taljenja aluminijske legure kao i utjecaji taljenja na kvalitetu taline. U trećem dijelu opisan je sam proces tlačnog lijevanja kao i neki od osnovnih načina poboljšanja kvalitete tlačnih odljevaka. Četvrti dio rada govori o načinima nadziranja i ispitivanja kontrole aluminijske taline i njenih svojstva, te je detaljno opisan način ispitivanja mehaničkih svojstava materijala. U eksperimentalnom djelu rada opisan je način izrade uzoraka za ispitivanje vlačne čvrstoće materijala te su prikazana i mjerenja i ispitivanja istih. U zaključnom dijelu na temelju dobivenih rezultata ispitivanja i analiza iznosimo zaključak, te je na kraju navedena literatura korištena prilikom izrade rada, kao i popis tablica i slika.

## 2. PROCES TALJENJA

Prva operacija u procesu izrade aluminijskih odljevaka je operacija pripreme taline. To je operacija koja se izvodi u metalurškim pećima za taljenje aluminijskih ingota određene kvalitete, koja je definirana prema normi za Al-legure DIN EN 1706, obično u određenom omjeru sa povratnim materijalom iste kvalitete. Rastaljena talina se zagrije na dovoljno visoku temperaturu (max. 780° C) na kojoj se može kvalitetno metalurški obraditi, pripremiti i transportirati na linije za lijevanje. Vođenjem procesa taljenja važno je znati na koje glavne karakteristike taline utječemo:

- a) Kemijski sastav taline
- b) Oksidacija taline
- c) Nemetalni uključci u taline
- d) Napljinjenost taline
- e) Metalurški postupci

### 2.1. Peći za taljenje Al-legure

Bazno taljenje Al-ingota i kružnog materijala u procesu pripreme taline vršimo u pećima za taljenje aluminijskih ingota koje su različite po konstrukciji i načinu zagrijavanja.

Podjela peći prema konstrukciji:

- a) Lončaste peći
- b) Koritaste peći
- c) Toranjske peći

Podjela peći prema vrsti goriva za zagrijavanje:

- a) Plinske peći
- b) Električne peći
- c) Peći grijane mazutom

Sve peći su takozvane nagibne tako da se pripremljena talina nagibanjem izljeva u transportne lonce. U tim se pećima metal rastali i pregrije na određenu temperaturu iznad temperature tališta. U većini tih peći također se obavljaju metalurške operacije legiranja i rafinacije. Učinak peći u tonama rastaljenog metala na sat ovisi o načinu zagrijavanja, vrsti metala, dimenzijama i konstrukciji peći. Najvažniji dio peći je prostor (korito) u kojem se

obavlja taljenje. Unutrašnjost korita obložena je vatrostalnim materijalom koji je otporan na visoke temperature i kemijske utjecaje taline i goriva. Za oblaganje korita peći uglavnom se upotrebljavaju materijali u obliku opeka ili masa za nabijanje. Od talioničkih se agregata općenito zahtijeva da osiguravaju slitine potrebnog kemijskog sastava i dovoljno visoke temperature, minimalan gubitak metala zbog odgora, minimalan utrošak goriva ili električne energije i visoku produktivnost. Talionički agregati za taljenje lakih i teških obojenih metala i slitina moraju dodatno osigurati minimalno trajanje taljenja, potrebnu atmosferu procesnog prostora postojanost vatrostalnog ozida i dobre radne uvijete.

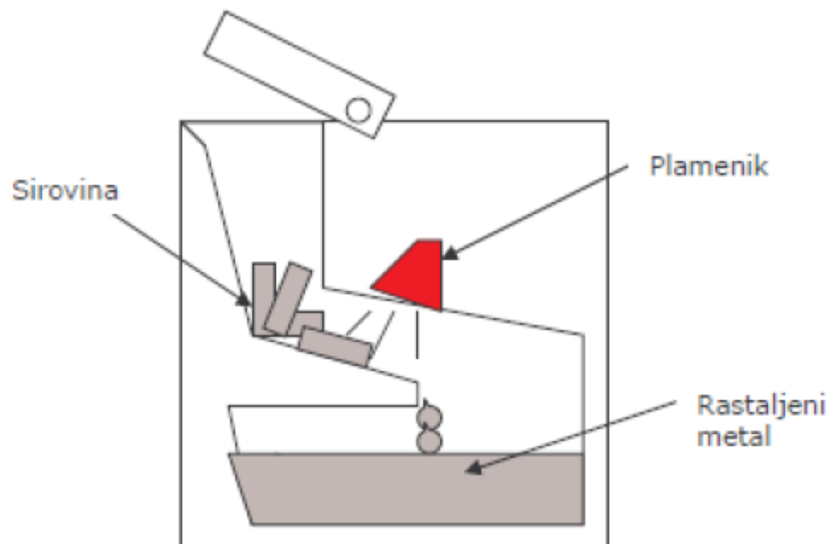
### 2.1.1. Plinska peć za taljenje Botta

Na slici 1 prikazana je plinska peć Botta koja se koristi za taljenje Al-slitine u ljevaonici P.P.C. Buzet u Buzetu. Operacija taljenja vrši se tako što se sirovina (ingoti i povratni materijal) tale izgaranjem plina (mješavina propan-butan) pri čemu su slitina i plamen u direktnom kontaktu. Plin je plinovodom doveden do plamenika na stroj. Kapacitet kade je otprilike 2,0 t taline, a proizvodni kapacitet je 1.000 kg/h.



Slika 1. Peć Botta i prikaz glavnih dijelova peći: 1. peć, 2. lift za ukrcaj transportnih kolica, 3. vrata za čišćenje peći, 4. pribor za čišćenje peći, 5. plamenici, 6. napa za dimne plinove 7. transportna kolica i 8. otvor za izlivanje slitine. [3]

Na početku ciklusa se kolica sa sirovinom ukrcaju u lift koji zatim automatski podiže sirovinu na visinu od otprilike 5 metara, nakon čega se poklopac peći otvara i sirovina se iskrcava u peć. Sirovina u peći pada na kosu ploču gdje dolazi u kontakt s plamenom. Prelaskom u rastaljeno stanje metal se slijeva niz padinu i pada u kadu sa rastopljenom legurom kao što je prikazano na slici 2. Oslobođeni plinovi izgaranja i toplina odvede se kroz otvor na poklopcu peći i zatim kroz napu prirodnom uzgonom u atmosferu. Kada se talina želi isprazniti iz peći u transportni lonac operater pritiskom na dugme aktivira hidraulički cilindar koji podiže jedan kraj peći i ona se počinje nagnjati. Uslijed nagninjanja, talina se podiže prema otvoru za izlivanje i konačno se izljeva kroz otvor u lonac za transport taline. U takvom položaju operater zadržava peć i kada napuni lonac dovoljnom količinom taline, vraća peć u početni, ravnotežni položaj (cilindar se spušta).



Slika 2. Prikaz taljenja u peći Botta [3]

## 2.2. Utjecaj taljenja na kemijski sastav legure

Kemijski sastav taline je propisan točno određenom kvalitetom, odnosno postotkom sadržaja pojedinih legirajućih elemenata (Si, Mg, Cu,...) i pratećih nečistoća (Fe, Zn, Pb...) i on se može u procesu taljenja promijeniti. Ta promjena može biti neznatna tako da kemijski sastav slitine ostane u propisanim granicama, ali može se desiti da ta promjena znači odstupanje kemijskog sastava od propisanog.

Kemijski sastav slitine i eventualne promjene ovise o sljedećem:

- Kemijskom sastavu uložka za taljenje ( ingoti + povratni materijal), odnosno stvarnom udjelu komponenti za šaržiranje

- Redosljedu šaržiranja komponenti, zatim o brzini i intenzitetu taljenja, čistoći, kvaliteti i veličini šaržiranih komponenti
- Ukupnom odgoru taline i odgora pojedinih elemenata koji se gube u postupku taljenja
- Zagađivanje slitine sa nekim nepoželjnim elementima ili šaržiranim komponentama koje su nenamjerno unesene u slitinu i koje su pokvarile kemijski sastav ili ostaci taline u peći od prethodnog taljenja
- Previsokom temperaturom, nepotrebnim miješanjem i dugim vremenom čekanjem taline za daljnje operacije, dodatno se povećava odgor elemenata i naplinjava se talina
- Legiranjem pojedinih elemenata u slitinu s jasnim ciljem da se popravi ili poboljša kemijski sastav sa pojedinim elementima koji će doprinijeti boljim tehnološkim osobinama slitine
- Modifikacijom dodavanje pojedinih modifikatora za poboljšanje mikrostrukture taline
- Rafinacijom, dodavanjem pojedinih rafinatora na bazi posebnih soli i klora u smislu pročišćavanja taline od nemetalnih uključaka, osiromašenja šljake i pratećih nečistoća.

### **2.3.Utjecaj taljenja na oksidaciju taline**

Aluminij je vrlo sklon oksidaciji i ona se dešava odmah u momentu kontakta aluminijske taline sa zrakom, tako da nastane tanka oksidna kožica debljine nekoliko mikrona, što je u stvari jedan stabilni oblik glinice ( $\gamma$  oblik  $Al_2O_3$ ) koja djeluje kao zaštita taline od daljnje oksidacije. Dakle taj proces oksidacije je prirodan i ne možemo ga izbjeći. Osnovna kemijska reakcija oksidacije aluminijske taline je:  $2Al + 3/2O_2 \rightarrow Al_2O_3$ . Ono što moramo izbjegavati i svesti na najmanju moguću mjeru su dodatne oksidacije taline koje uzrokuju povećan odgor, gubitak na supstanci i povećavaju nekvalitetu (nečistoću) taline.

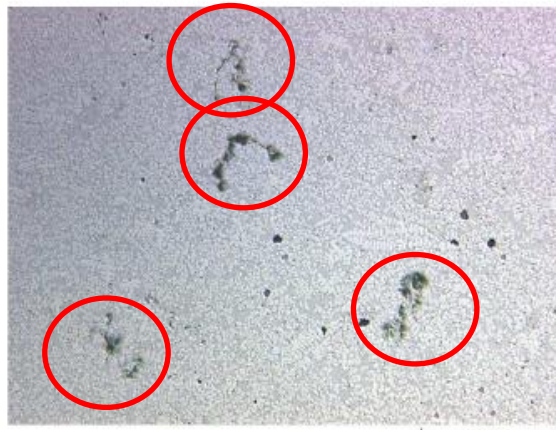
Izvori i postupci koji dovode do oksidacije taline:

- sastav i prije svega čistoća uložaka za taljenje (ingoti + povratni materijal), uložak mora biti suh, jer prisutnost vlage je višestruko loša (eksplozija, oksidacija i naplinjenost) zatim uložak mora biti čist, bez primjesa nemetalnih komponenti (ulja, maziva, premazi, plastika, karton, najloni...)
- Čistoća obloge peći, prisutnost oksida i nemetalnih nečistoća na vatrostalnom zidu peći za taljenje
- Proces šaržiranja i dodavanja komponenti i brzina taljenja



- Vrsti goriva i načinu topljenja šarže u peći, kod plinskih peći je bitno da su plamenici dobro podešeni tako da imamo potpuno sagorijevanje kisika, jer u protivnom višak kisika izaziva dodatnu oksidaciju taline
- Pregrijavanje taline iznad temperature od 900°C, glinica koja je  $\gamma$  oblik  $Al_2O_3$  koja je kubno kristalizirana prelazi u  $\alpha$  oblik  $Al_2O_3$  koji kristalizira heksagonalno i poznat je pod nazivom „korund” koji više ne djeluje kao dobra zaštita od oksidacije nego je ubrzava i povećava (takav korund se obično javlja na vatrostalnim zidovima peći i oblogama transportnih lonaca)
- Potrebno je izbjegavati nepotrebno miješanje i turbulencije rastopljene taline
- Talinu je potrebno izljevati sa što manjom visinom pada u transportni lonac.

Moramo znati da nastajanje oksida u aluminiju nije moguće spriječiti, međutim sa svim postupcima taljenja i obrade taline moramo to ograničiti, tako da oksida nastane što manje i da talina bude što čišća radi što bolje kvalitete odljevaka. Okside aluminija radi male razlike u gustoći sa osnovnom legurom vrlo je teško odvojiti iz taline, zatim teško je točno odrediti njihovu količinu u talini i oni su vrlo postojani i nerazgradivi u talini. Oksidi koji se javljaju u različitim oblicima štetno djeluju na mehaničke osobine odljevaka i javljaju se kao poroznost na obrađenim površinama odljevaka, prikazano na slici 3.



Slika 3. Oksidne kožice i oksidi vidljivi na metalografskom uzorku (odljevak tlačno odliven) [1]

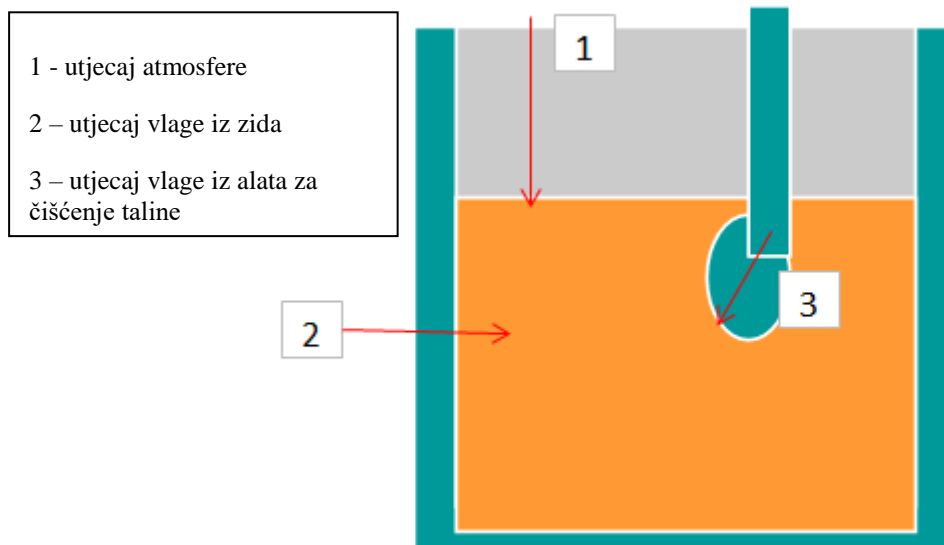
## 2.4. Utjecaj taljenja na naplinsenost taline

Rastopljena slitina ima vrlo izraženu tendenciju apsorpcije plinova (vodik, kisik, ugljični dioksid i ugljični monoksid), a najveći problem i najveći utjecaj na kvalitetu slitine i kvalitetu odljevaka ima vodik ( $H_2$ ). Vodik se nalazi u slitini rastopljen u atomarnom ( $2H$ ) obliku

ili kao molekula ( $H_2$ ). Tu pojavu prisutnosti vodika u slitini nazivamo naplinjenost i izražavamo je sa indeksom naplinjenosti (%), a osnovni izvor nastajanja vodika je vlaga  $H_2O$ .

Osnovna kemijska ravnoteža atomarnog i plinskog vodika:  $2H \leftrightarrow H_2$  (molekularni oblik, plin), a adsorpcija vodika iz vlage:  $2Al + 3H_2O \leftrightarrow Al_2O_3 + 2H$

Adsorpcija vodika u talinu kao što je prikazano na slici 4 ide preko vanjske površine koja je u kontaktu sa zrakom, preko bočne površine koja je u kontaktu sa loncem ili vatrostalnim materijalom i kontaktima sa sredstvima koja se unose u unutrašnjost taline, šaržirani materijali, alati za čišćenje taline i ostalo.



Slika 4. Shematski prikaz mogućih izvora naplinjenosti taline [1]

Naplinjenost taline odnosno količina rastopljenog vodika ovisi o sljedećem:

- Temperaturi taline, talina se ne smije pregrijati iznad  $780^\circ C$ , jer eksponencijalno raste topivost vodika sa 0,05 na  $1,0 \text{ cm}^3/100,0 \text{ g}$  taline
- Kemijskom sastavu slitine. Elementi koji smanjuju rastopljivost vodika su: Si, Mn, Cu, Zn, a elementi koji povećavaju topivost vodika (naplinjenost) su: Mg, Sr, Na, Ti, Ni.
- Atmosferskom pritisku i sadržaju vlage u zraku iznad rastopljene slitine

Poznato je da je vlaga osnovni izvor nastajanja vodika i problema naplinjenosti taline.

Najčešći i mogući izvori vlage su:

- atmosfera, zrak, okolina (relativna vlaga u zraku %)
- metalne sirovine (ingoti i povratni materijal, legure za dodavanje)

- nemetalne sirovine (topitelji, soli, rafinatori, plin za degazaciju ako nije tehničke čistoće)
- vatrostalni materijali, zidovi peći i obloge transportnih lonaca, ohlađeni lonci koji su adsorbirali vlagu
- alati koji se koriste za taljenje, čišćenje i miješanje taline (moraju biti premazani i suhi)

Za uklanjanje vodika iz taline možemo koristiti više metoda čija je primjena ovisna o vrsti legure i finalnom proizvodu iz ljevaonice (ingot ili odljevak), a sve je dodatno povezano sa ekološkim zahtjevima koji danas s pravom postaju sve strožiji.

Metode za uklanjanje vodika iz taline:

- propuhivanje taline sa neutralnim plinom ( $N_2$ ) visoke čistoće,
- propuhivanje sa aktivnim plinom (klorom) koji osim fizikalnog ima i kemijski učinak jer sa aluminijem stvara  $AlCl_3$ . Ova metoda je vrlo učinkovita za pročišćavanje taline, obično je koriste „rafinerije“ sekundarnog aluminija. Glavni nedostatak je štetno djelovanje klora na ljude i okoliš,
- degazacija sa topiteljima, to su čvrsti materijali koji se uranjaju u slitinu i dolazi do reakcije oslobađanja plina, obično je to heksakloretnan ( $C_2Cl_6$ ). Topitelji često sadrže i sredstva za osiromašenje šljake i vrlo su hidroskopski pa moraju biti uskladišteni na suhom. Glavni nedostatak ove metode je isto tako štetan ekološki utjecaj klora i nastalih soli koje se moraju posebno deponirati.
- Vakumska degazacija, najčešće se koristi u čeličanama, a u aluminiju se vrlo rijetko koristi. Princip je da se iznad rastopljene slitine stvori vakuum u nepropusnoj komori. Smanjenjem tlaka dolazi do stvaranja mjehurića vodika u talini i do prirodnog izlučivanja rastopljenog vodika na površinu taline.

Naplinjenost taline ima svakako negativan utjecaj na kvalitetu odljevka, pojave plinske poroznosti na strojno obrađenim površinama nekom od metoda odvajanjem čestica (tokarenjem, glodanjem i dr.), zatim smanjuje mehaničke osobine i povećava problem propuštanja odljevaka (vodo nepropusnost). Problem naplinjenosti taline je direktno povezan sa kvalitetom odljevka. Taj problem je više izražen u tehnologiji kokilnog lijeva radi toga što je ta "plinska poroznost" lakše uočljiva na odljevcima sa debljim stjenkama i sa manjim brzinama hlađenja. Upravo zbog toga je tlačni lijev manje osjetljiv na problem plinske poroznosti taline.

Plinska poroznost osim što je problem ima i jedan dobar utjecaj na kvalitetu odljevaka, jer smanjuje utjecaj „poroznosti skrućivanja” (*eng. shrinkage*), pa je interesantno da se za neke odljevke talina namjerno naplinjava. To su odljevci koji nemaju mehaničke obrade i nemaju visoke zahtjeve mehaničkih svojstava (poklopci, kutije i sl..) tako da se na taj način štedi na masi aluminija (10,0-15,0 % iznosi indeks naplinjenosti).

## 2.5. Transport taline u ljevaonici

Transport taline u ljevaonicama vrši se u transportnim loncima. Prilikom izlijevanja taline iz peći za taljenje i transportu taline u loncu mogu se dešavati neželjene situacije koje mogu imati utjecaja na kvalitetu same taline:

- **promjena kemijskog sastava slitine** se dešava ako koristimo lonce za transport za nekompatibilne slitine (Al-Si, Al-Si-Cu), jer u loncu uvijek imamo određenu količinu „stare“ slitine koju nije moguće potpuno isprazniti prilikom izlijevanja.
- **povećanje naplinjenosti taline**, ovisno o visini pretakanja i načinu izlijevanja (brzo, sporo, turbulentno) taline iz peći, zatim ovisno o temperaturi i osušenosti vatrostalne obloge transportnog lonca
- **pad temperature taline** ovisi o zagrijanosti lonca prilikom izlijevanja taline. Normalni pad temperature taline je do 40 °C (temperatura izlijevanja 780 °C i temperatura taline u loncu 740 °C). Veći pad temperature taline znači nastajanje dodatnih problema u samom procesu lijevanja (zastoj i škart), jer zbog niske temperature taline gubi svojstvo livljivosti.

Ljevački lonac se transportira kroz ljevaonicu sa viličarom ili alternativno sa kranskom dizalicom, a to je vrlo delikatna i ozbiljna operacija, jer lonci su otvoreni i postoji velika opasnost od nekontroliranog izlijevanja taline iz lonca. Zbog toga vozači viličara moraju biti posebno osposobljeni za ove operacije. Talina se nakon izlijevanja iz peći za taljenje transportira na sljedeću operaciju pripreme taline, a to je degazacija na uređaju za degazaciju „FOSECO-FDU“.



Slika 5. Izlijevanje taline iz peći za taljenje Botta u transportni lonac [Autor]

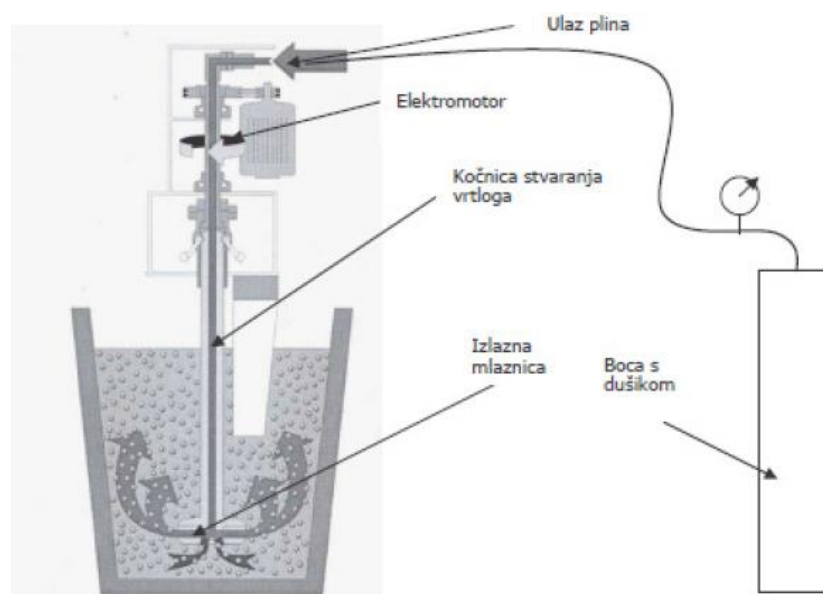
## 2.6. Degazacija na uređaju „FOSECO-tip FDU“ i transport taline na lijevanje

Spomenuto je da nakon taljenja i izlijevanja taline u transportni lonac imamo određenu prisutnost plina vodika ( $H_2$ ) i nastali problem napljinjenost taline. U normalnom procesu taljenja ovisno o kvaliteti ulaznih materijala i vođenju procesa taljenja taj indeks napljinjenosti obično se kreće od 5,0 % do 12,0 %. Zbog toga se talina mora obavezno degazirati prije lijevanja.

Lonac sa talinom se dovozi na uređaj za degazaciju tipa FDU i postavlja se na predviđeno mjesto ispod uronjavajućeg grafitnog rotora. Zatim se sa površine taline skida šljaka nastala u procesu izlijevanja i transporta taline. Nakon toga se provjeri prisutnost plina i sa preklopnikom se odabere program degazacije, ovisno o vremenu trajanja degazacije u minutama. Zatim se uključi start programa i automatski započinje proces degazacije uronjavanjem rotora u talinu i okretanjem rotora uz istovremeno propuhivanjem plina u talinu. Prilikom degazacije u talini dešavaju se fizikalno kemijski procesi:

- **otplinjavanje** – mjehurići inertnog plina ( $N_2$ ) koji su uneseni u talinu sa višim parcijalnim tlakom (4,0 bara) zarobljavaju mjehuriće nastalog plina ( $H_2$ ) u talini i iznose ih na površinu taline

- **čišćenje taline** – rotor koji se okreće i istovremeno propuhuje talinu prenosi kinetičku energiju na talinu i sve čestice u talini (oksidi, nečistoće, nemetalni uključci) se kreću u smjeru okretanja taline i udaraju u statorsku ploču. Prilikom tog naglog zaustavljanja te čestice se inercijski kreću na površinu taline i tako se odstranjuju iz taline
- **modifikacija i usitnjavanje zrna**, dodavanjem u lonac sredstva za poboljšanje mikrostrukture (modifikator) to je obično stroncij, koji se nalazi u aluminijskoj šipci (žici) u količini od 10,0 %, oznaka žice AlSr<sub>10</sub> i rafinator (usitnjavač) zrna na bazi titana (Ti) i bora (Bo) u obliku žice AlTi<sub>10</sub>B<sub>5</sub>
- **rafinacija**, dodavanje rafinatora tipa „Coveral“ ili slično, za osiromašivanje šljake, na površini ostane suha šljaka sa malo aluminijske, do 5,0 %. Inače šljake aluminijskih slitina su vrlo bogate sa aluminijem do 70,0 % i one se otkupljuju i prerađuju, odnosno iz njih se vadi aluminij. To su vrlo kompleksne i složene kemijske reakcije koje se ne rade u ljevaonicama odljevaka već u „rafinerijama“ sekundarnog aluminija
- **promjene kemijskog sastava**, znači u procesu degazacije može doći do minimalnih promjena u kemijskom sastavu prije svega u elementima koji odgorjevaju, Mg i Sr ili dodavanjem određenih elemenata u slitinu koji se uz intenzivno miješanje slitine homogeno raspoređuju
- **pad temperature slitine**, ovisno o izlaznoj temperaturi iz lijevanja i padu temperature taline u transportnom loncu imamo i pad temperature taline nakon degazacije. Taj temperaturni pad ovisi o korištenom programu degazacije ili trajanju operacije degazacije (max. 6 min.) i obično je pad temperature  $\Delta T = 30 - 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .



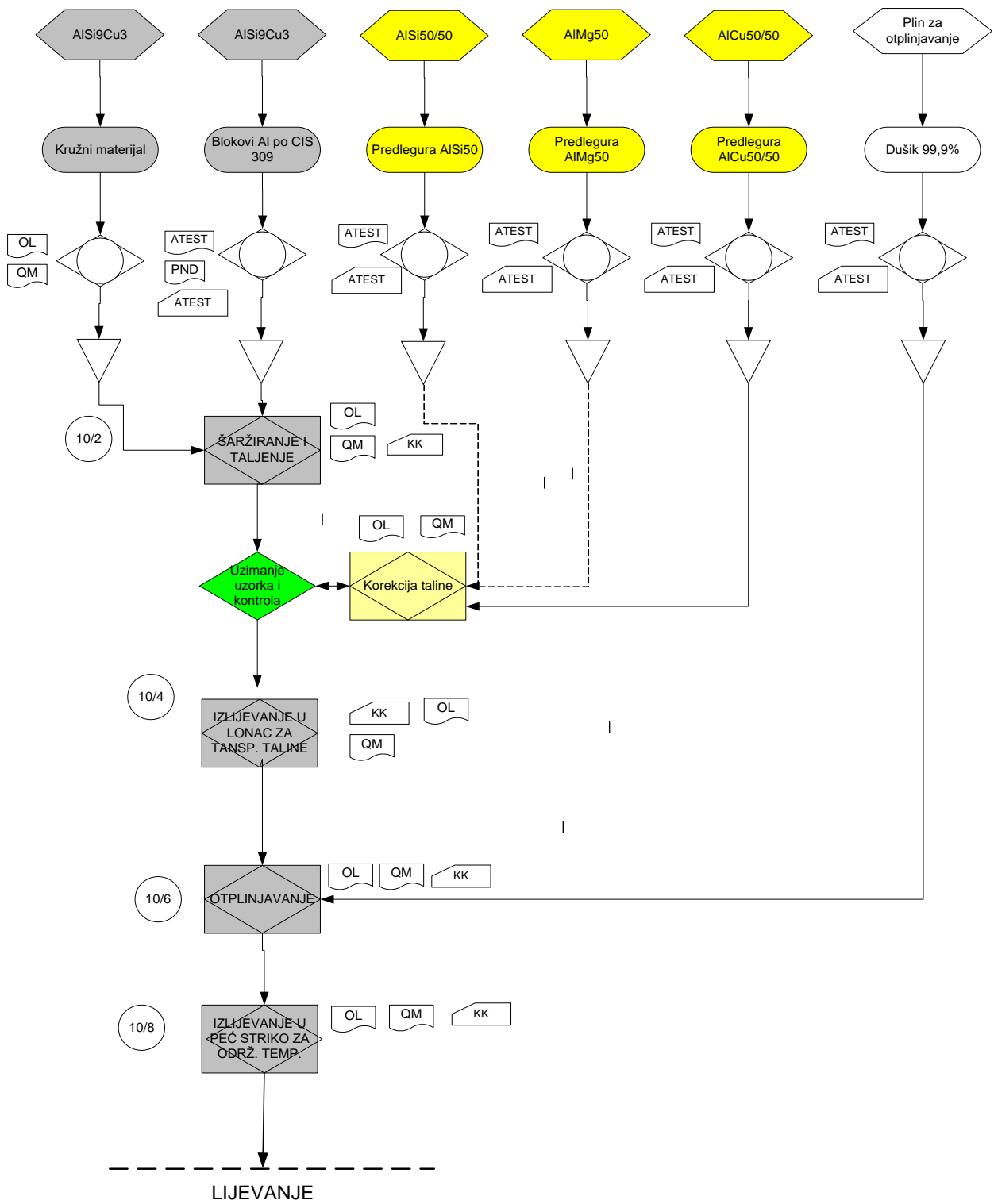
Slika 6. Shematski prikaz djelovanja uređaja za degazaciju taline [1]

Nakon izvršene degazacije sa površine taline se odstranjuje nastala „šljaka“ i talina se transportira na linije za lijevanje, odnosno prelijeva se u peći za održavanje temperature taline koje se nalaze u sklopu linija za lijevanje. Prilikom izlivanja taline u peć za održavanje temperature mora se voditi računa da se talina izlijeva sa što niže visine i da su što manje turbulencije mlaza taline, koje izazivaju dodatno naplinjavanje i oksidaciju taline.

Livljivost taline je ovisna o temperaturi taline i zato moramo dobro paziti da talina koju smo izlili u peć ne smanjuje ili ne poviše tehnološku temperaturu taline koja je propisana za lijevanje. Ako talina iz lonca ima prenisku temperaturu, doći će do pada temperature taline u pećima za lijevanje i proces lijevanja će biti otežan, odljevci će biti nezaliveni (škart) i morat će se zaustaviti proces. Vrlo rijetko se javlja problem previsoke temperature taline u pećima za lijevanje, ma da i takav problem ima neželjene prateće efekte:

- dodatno se naplinjuje talina i stvaraju se oksidi u peći radi više temperature
- u procesu lijevanja javlja se problem povećanog srha na diobenim površinama (zalivanje alata za lijevanje)
- zalivaju se zračnici (srh) i prestaju funkcionalno odzračivati ljevački alat, te se pojavljuje poroznost
- povećava se vrijeme skrućivanja odljevaka u alatu i utjecaj poroznosti skrućivanja

Na slici 7 je shematski prikaz svih operacija pripreme taline do konačne operacije transporta taline u peć za održavanje temperature. [1]



Slika 7. Sinoptik operacija pripreme taline za slitinu AlSi9Cu [1]



### 3. PROCES TLAČNOG LIJEVANJA

Proces lijevanja svoje korijene vuče još iz prapovijesti. Današnja civilizacija ne bi bila moguća bez upotrebe tehnologije lijevanja. Najranije poznati predmeti izrađeni od metala stariji su više od 10000 godina, no oni nisu bili lijevani već kovani. To su u pravilu maleni dekorativni predmeti izrađeni najčešće od bakra. Kada se točno lijevanje metala pojavilo nije poznato, no smatra se da se to dogodilo otprilike između 5000. i 3000. g. pr. Kr. ulaskom čovječanstva u bakreno doba. Brončano doba započelo je na Bliskom istoku oko 3000. g. pr. Kr. i to najvjerojatnije sasvim slučajno. Rude metala u prirodi se rijetko pojavljuju u čistom obliku, već su pomiješane s rudama drugih metala, te je tako i nastala bronca kao legura bakra i kositra. Bronca je ubrzo, zbog svojih znatno boljih mehaničkih svojstva, preuzela primat u odnosu na bakar. Oko 1200. g. pr. Kr. započinje željezno doba. Zbog nedovoljne temperature primitivnih peći koje su se koristile nije se moglo dobiti željezo dovoljne kvalitete pa ga se moralo dodatno obrađivati kovanjem. Lijevano željezo dolazi u Europi tek u 15. stoljeću dok je u Kini bilo poznato još od 600. g. pr. Kr. Prednosti lijevanja u odnosu prema drugim postupcima oblikovanja metala su sljedeće:

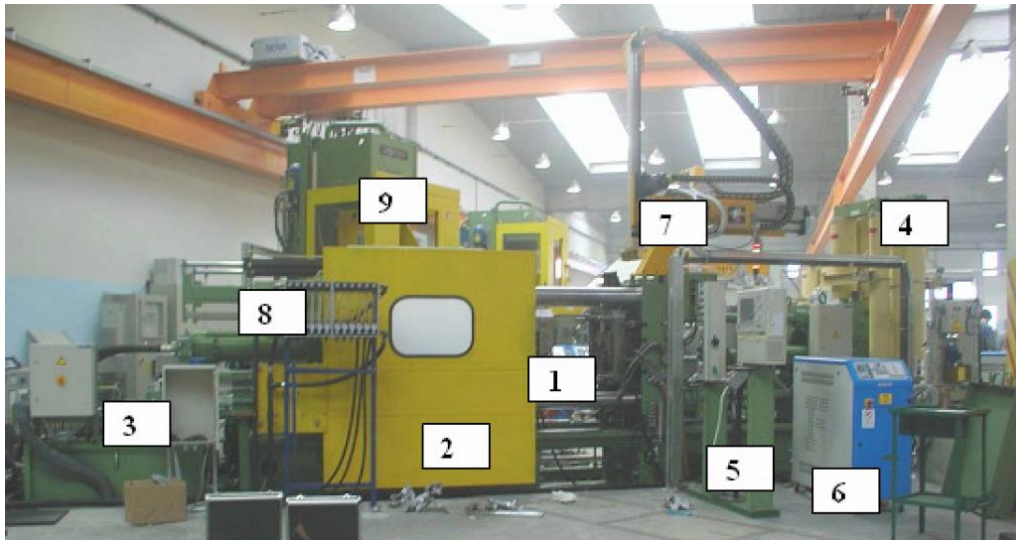
- mogu se proizvesti odljevci veoma kompliciranih oblika,
- mogu biti smanjene ili potpuno eliminirane dodatne operacije oblikovanja (obrada skidanjem strugotine,
- konstrukcije mogu biti lakše i jednostavnije (veliki odljevak može se odliti u jednom komadu umjesto da se sastavlja iz većeg broja komponenata),
- neke slitine (sivi lijev) mogu se oblikovati samo lijevanjem, a ne i procesima plastične deformacije,
- veliki i teški dijelovi mogu se ekonomično proizvesti jedino lijevanjem i
- proizvodnja odljevaka može se mehanizirati i automatizirati, te je zato lijevanje prikladan proces oblikovanja za pojedinačnu i serijsku proizvodnju.

Automobilska industrija je znana kao tehnološki napredna industrijska grana, a u ljevaonici P.P.C. Buzet proizvode se isključivo proizvodi namijenjeni automobilskoj industriji. Neki od odljevaka koji se proizvode jesu nosači motora, poklopci elektromotora, poklopci sklopki, nosači alternatora i dr. tehnologija koja se koristi za izradu navedenih auto dijelova je tlačno lijevanje aluminijskih odljevaka.

### 3.1. Tlačni lijev

Tlačno je lijevanje proces proizvodnje kojim se može proizvesti geometrijski složene metalne dijelove korištenjem metalnih kalupa (alata) za višestruku primjenu. Proces tlačnog lijeva uključuje upotrebu peći za održavanje temperature taline, talinu, tlačnog stroja, te metalnog kalupa. Metal se najprije rastali te se zatim ubrizgava u metalne kalupe na samom tlačnom stroju. Razlikujemo dva temeljna procesa tlačnog lijevanja: toplokomorni i hladnokomorni, koji se međusobno razlikuju na osnovu sistema koji koriste za ulijevanje taline u kalup. Toplokomorni proces tlačnog lijevanja koristi se kod lijevanja niskotemperaturnih slitina kao što su olovo i cink, dok se za lijevanje aluminijske i bakra koristi hladnokomorni proces. Međutim, u oba slučaja, nakon što se rastaljeni metal ubrizga u kalup, on se ubrzano hladi i skrućuje u sam odljevak. U Ljevaonici P.P.C. Buzet koristi se hladnokomorni proces.

Odljevci stvoreni procesom tlačnog lijeva mogu se uvelike razlikovati u veličini i masi u rasponu od nekoliko grama pa sve do velikih masa ovisno o konfiguraciji alata i mogućnosti tlačnog stroja. Tlačni je lijev ekonomičan za velike serije odljevaka jer su sami tlačni strojevi relativno skupi, kao i sama izrada alata te usvajanje proizvodnje. Jedna od najvećih prednosti tlačnog lijevanja prema drugim ljevačkim metodama je ta da proizvedeni odljevci mogu imati vrlo kompleksne oblike te se zbog toga mogu značajno smanjiti troškove proizvodnje, ali i troškovi povezani sa strojnom obradom. Također, tlačnim se lijevanjem proizvode odljevci s visokom razinom dimenzijske točnosti i površinske kvalitete te vrlo tankih stjenki, što u konačnici značajno smanjuje ili eliminira strojnu obradu te rezultira uštedama na materijalu i masi samog odljevka. Odljevci proizvedeni tlačnim lijevom mogu se pronaći u tisućama komercijalnih i industrijskih proizvoda i čine važne komponente proizvoda od automobilske industrije pa sve do igračaka. Na Slici 8. prikazan je osnovni izgled ćelije za tlačno lijevanje sa osnovnim elementima, dok se na Slici 9. i Slici 10. može vidjeti robot za iznos odljevaka i peć za održavanje temperature taline koje su osnovne komponente automatizirane linije za tlačno lijevanje odljevaka.



Slika 8. Izgled ćelije s osnovnim elementima: : 1. stroj za tlačno lijevanje, 2. zaštitna vrata, 3. hidraulički agregat, 4. akumulatori II i III faze, 5. upravljački ormari, 6. jedinica za temperiranje alata, 7. automat za premazivanje alata, 8. mjerači protoka, 9. preša za obrez [3]



Slika 9. Robot za iznos odljevaka [3]

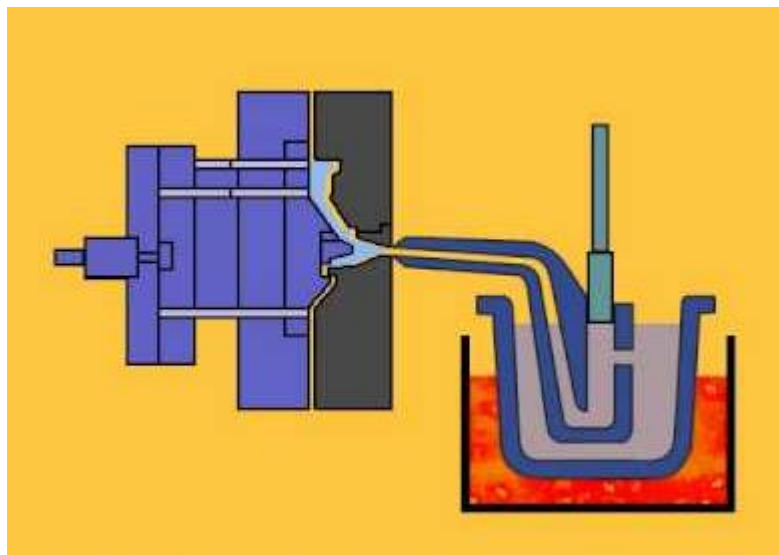


Slika 10. Peć za održavanje temperature taline [3]

Osnovni proces pri tlačnom lijevu je taj da se talina pod visokim pritiskom ubrizgava u ljevački alat. Strojve koji se koriste za tlačno lijevanje razlikujemo po sili zatvaranja ljevačkog alata, sila zatvaranja može varirati od 100,0 t pa do 4000,0 t. Cijeli ciklus lijevanja može varirati od nekoliko sekundi, za malene dijelove mase od nekoliko grama, pa sve do nekoliko minuta za odljevke mase do 100,0 kg. Bez obzira na silu zatvaranja, osnovna razlika u tlačnom lijevanju je u načinu ubrizgavanja taline u ljevački alat. S toga se tlačno lijevanje dijeli na tlačno lijevanje sa toplom i hladnom komorom.

### 3.1.1. Tlačno lijevanje s toplom komorom

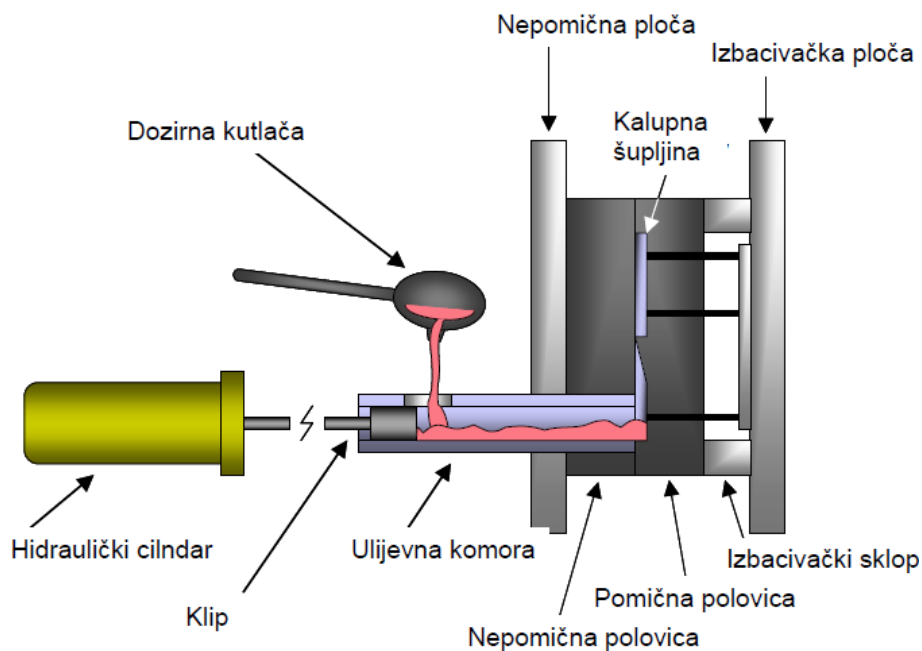
Tlačno lijevanje s toplom komorom koristi se uglavnom za procese lijevanja cinka, magnezija, olova te ostalih metala s nižom temperaturom tališta. Način rada stroja za tlačno lijevanje sa toplom komorom je sljedeći. Uređaj za doziranje uronjen je u kadu sa talinom, te je i peć za održavanje temperature taline preko njega povezana sa strojem za tlačno lijevanje. Prilikom podizanja klipa na cilindru se otvara „rupa“, te se on napuni sa talinom. U fazi ubrizgavanja, odnosno spuštanja klipa u cilindru, zatvara se cilindar te se zaustavlja njegovo punjenje talinom, a u isto vrijeme talina ispunjava ljevački alat. Kad se faza skrućivanja završi, klip se vraća ponovno u početni položaj, ljevački alat se otvara i odljevak se vadi iz alata. Prednost lijevanja s toplom komorom je kratko vrijeme ciklusa, dok je nedostatak ograničena primjena samo na metale sa niskom temperaturom tališta.



Slika 11. Shema tlačnog lijevanja s toplom komorom [11]

### 3.1.2. Tlačno lijevanje s hladnom komorom

Tlačno lijevanje s hladnom komorom prikazano na slici 12 koristi se za lijevanje metala sa visokom temperaturom tališta, između ostalih i aluminija. Princip rada stroja za lijevanje s hladnom komorom je sljedeći: talina se ulijeva u cilindar, te se pomoću klipa ubrizgava u kalup alata za lijevanje. Nakon završetka faze skrućivanja, klip se vraća u početni položaj, ljevački alat se otvara i odljevak se vadi iz alata. Nedostatak lijevanja sa hladnom komorom u odnosu na lijevanje s toplom komorom je duži ciklus lijevanja.



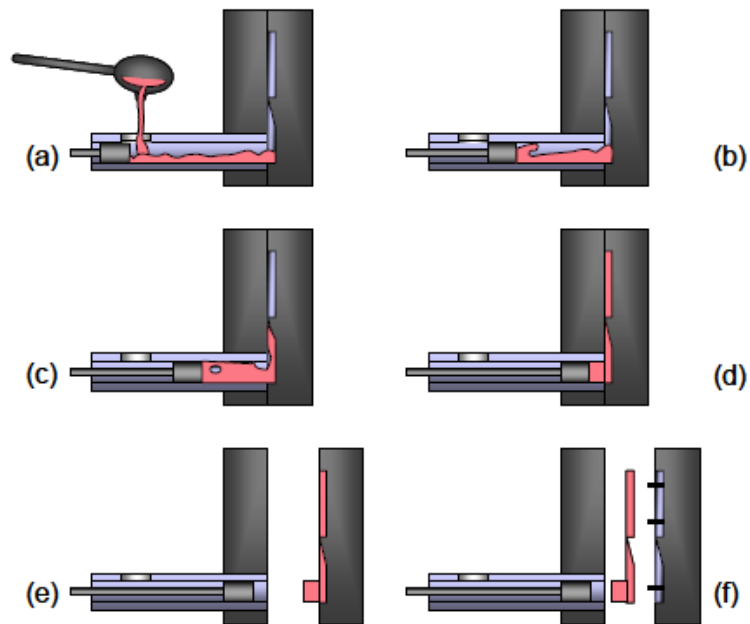
Slika 12. Shema tlačnog lijevanja s hladnom komorom [3]

Kod lijevanja s hladnom komorom, tekući metal je u dodiru sa sistemom za ubrizgavanje samo kratko vrijeme jer se u sistem za ubrizgavanje taline ulijeva samo količina potrebna za jedan ciklus lijevanja. Zbog zaštite od trošenja gravure ljevačkog alata i klipa za ubrizgavanje, isti se premazuju zaštitnim sredstvima – uljima, premazima. Premazivanje produžuje životni vijek alata, ali i smanjuje naljepljivanje metala na alat.

Faze ciklusa tlačnog lijevanja hladnom komorom prikazane na slici 13 su sljedeće:

- ulijevanje
- punjenje uljernih kanala - I. faza, brzina klipa 0,1 – 0,3 m/s
- punjenje gravure - II. faza, brzina klipa 2,0 -4,0 m/s, brzina slitine na ušću 20,0 - 60,0 m/s, vrijeme punjenja 50,0-100,0 ms
- multiplikacija, završetak punjenja – III. faza, specifični tlak u alatu 800,0-1000,0 bar
- otvaranje alata

f) izbacivanje odljevka iz ljevačkog alata.



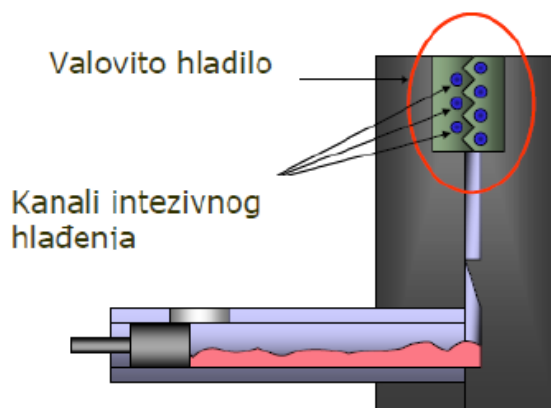
Slika 13. Faze ciklusa tlačnog lijevanja hladnom komorom [3]

### 3.2. Tehnologije za poboljšanje odljevaka

Prilikom tlačnog lijevanja često se susrećemo sa nekoliko vrsta grešaka koje se javljaju na odljencima, najčešće greške su poroznosti koje smo podijelili na poroznost skrućivanja i plinsku poroznost, te ostale greške kao što su: hladni spojevi, ribanja, pukotine, srh nezalivenost itd. Kako bi poboljšali kvalitetu odljevka i u što većem postotku izbjegli navedene greške razvijene su sljedeće tehnologije za poboljšanje odljevaka lijevanih tlačnim lijevom:

- Vakumsko lijevanje
- Squeeze lijevanje i
- Semi-solid lijevanje

**Vakumsko tlačno lijevanje** karakterizirano je kontroliranim korištenjem vakuuma u svrhu izvlačenja plinova iz kalupne šupljine, uljevnog sistema i uljevne komore tijekom procesa lijevanja. Korištenjem vakuumске tehnologije lijevanja iz alata se odvodi i do 95% plinova što rezultira smanjenjem plinske poroznosti. Na Slici 14. i Slici 15. prikazana su dva tipa vakumskih ventila za tlačno lijevanje: statički i dinamički ventil.

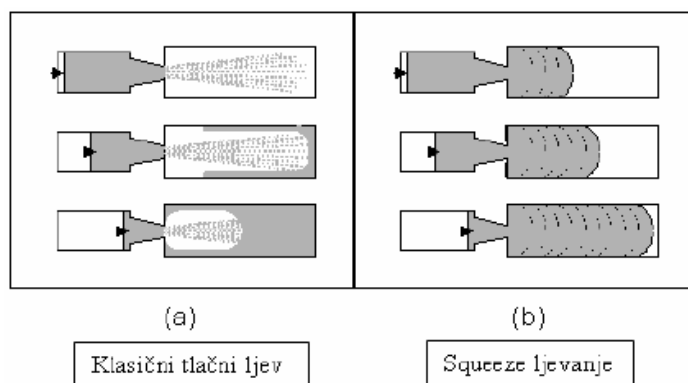


Slika 15. Statički ventil [3]



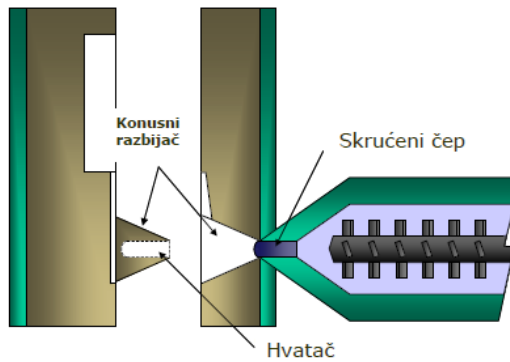
Slika 14. Dinamički ventil[3]

**Squeeze lijevanje** je karakterizirano s velikim presjecima ušća i ravninskom frontom punjenja šupljine kalupa što je vidljivo na shematskom prikazu usporedbe klasičnog tlačnog lijevanja i squeeze lijevanja na slici 16. Prednosti takvog načina lijevanja su ti što se poroznosti skrućivanja i plinska poroznost minimiziraju te je moguća toplinska obrada (bez mjehura).



Slika 16. Usporedba klasičnog i squeeze načina tlačnog lijevanja [3]

**Semi-solid lijevanje** je proces gdje se djelomično tekuća, a djelomično čvrsta mješavina metala ubrizgava u kalupnu šupljinu. Na početku brizganja, čep se utiskuje u hvatač. Preko konusnog razbijača se semi-solid metal ubrizguje u gravuru (Slika 17.). Takvim načinom lijevanja možemo utjecati na smanjenje poroznosti skrućivanja na način da velikim udjelom čvrstog metala prije brizganja, velika ušća ostaju otvorena i održava se tlak III. faze, te na smanjenje plinske poroznosti na način da otvorenom odzrakom dobijemo ravninsko punjenje. Semi-solid tlačnim lijevanjem stvara se jedinstvena mikrostruktura tj. dobivamo poboljšana mehanička svojstva odljevaka.

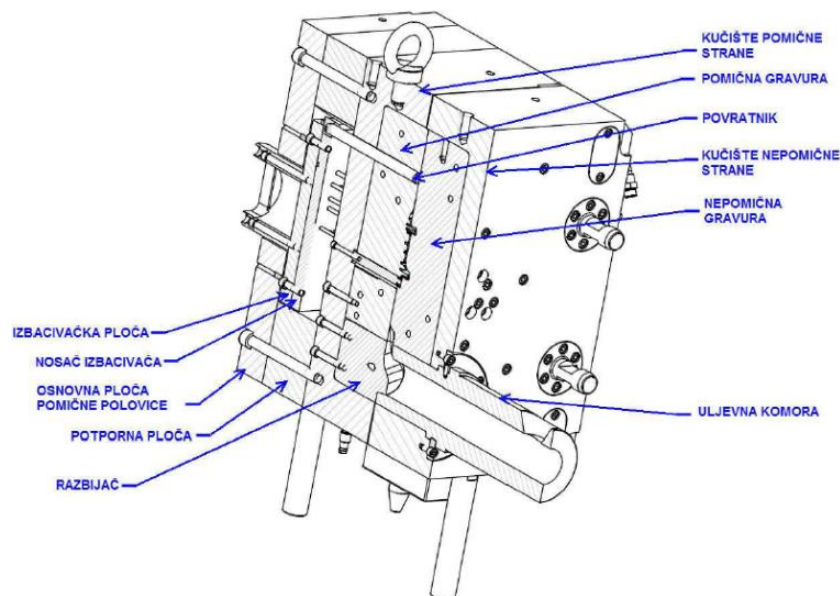


Slika 17. Semi-solid lijevanje [3]

### 3.3. Alati za tlačno lijevanje

Alati za tlačno lijevanje su sklopovi složenih i kompliciranih konstrukcija koji se sastoje i od nekoliko stotina dijelova, izrađeni su od alatnog čelika za rad na povišenim temperaturama i podijeljeni su na tri glavna podsklopa:

- fiksna polovica ljevačkog alata
- pomična polovica ljevačkog alata i
- izbacivački sklop

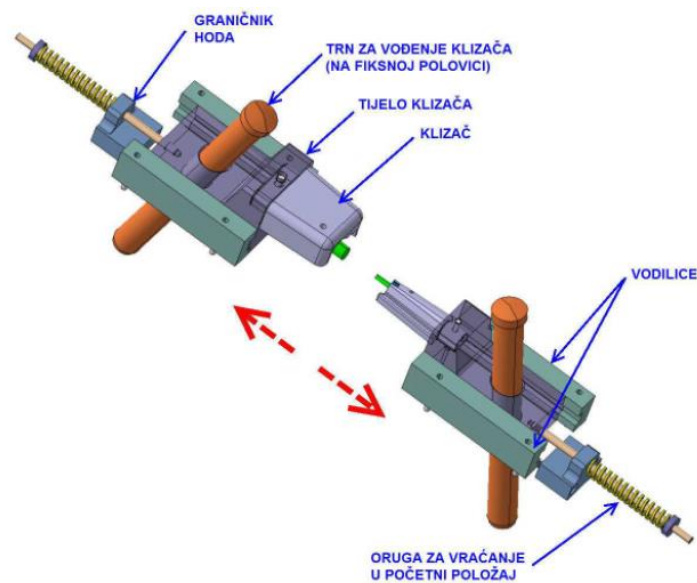


Slika 18. Presjek alata za tlačno lijevanje [7]

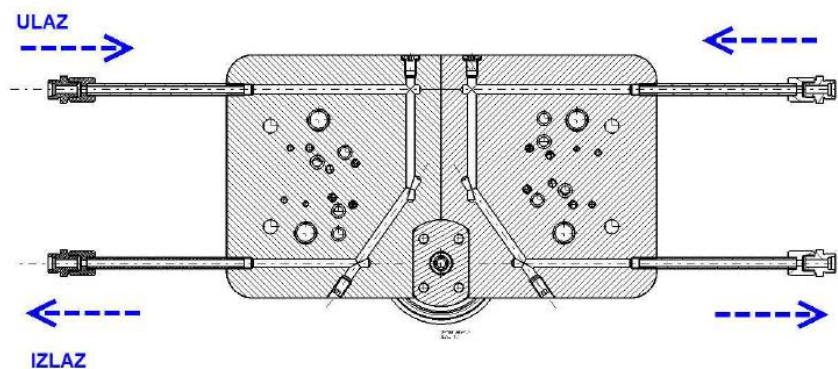
Glavna funkcija ljevačkog alata je da prihvati rastaljenu leguru, te joj omogući da ravnomjerno popuni kalupnu šupljinu koja definira oblik željenog komada. Nakon što se talina u ljevačkom alatu skruti dolazi do razdvajanja dviju polovica ljevačkog alata (fiksne i pomične),



te do izbacivanja komada iz alata pomoću izbacivačkog sklopa. Ovisno o izgledu odljevka, alat za tlačno lijevanje u sebi može imati i do nekoliko klizača kao što je prikazano na slici 19 čija je funkcija da u trenutku kada je ljevački alat zatvoren unutar kalupa formiraju dodatne šupljine na odljevku, dok se neposredno prije otvaranja alata, klizači pomiču i vraćaju u početni položaj kako bi odljevku dozvolili izlazak iz ljevačkog alata. Ukoliko su klizači veliki potrebno je prilikom konstruiranja alata predvidjeti i krug hlađenja. Svi ljevački alati imaju u sebi krugove za temperiranje, odnosno krugove za grijanje i hlađenje alata prikazane na slici 20.



Slika 19. Mehanički klizač [7]



Slika 20. Krug temperiranja gravure [7]

## 4. METODE KONTROLE ALUMINIJSKE TALINE

Iz same definicije pojmova aluminijska legura, aluminijski ingoti, nečistoće, talina, odljevci moramo odrediti metode kontrole i nadzora svih tih elemenata koji uzročno-posljedično nastaju u jednoj „procesnoj“ tehnologiji izrade odljevaka (kruto–tekuće-kruto). Same fazne promjene agregatnih stanja i svi termodinamičkih i fizikalno – kemijski procesi koji se odvijaju u tim promjenama čini taj proces lijevanja izuzetno složenim i ovisnim o jako puno faktora. Metode kontrole koristimo u sve 3 faze nastajanja odljevaka, kontrole ulaznih sirovina (ingota), zatim nadzor procesa taljenja, pripremljene taline i na kraju kontrole odljevaka, a kontrole kojima se koristimo su sljedeće:

- vizualna kontrola ingota i taline
- kontrola kemijskog sastava i utjecaj pojedinih elemenata
- DTA (diferencijalno termička analiza) slitina
- kontrola naplinsenosti taline
- metalografska kontrola Al-slitina
- kontrola mehaničkih svojstva

### 4.1. Vizualna kontrola ingota i taline

Vizualnim pregledom ingota, ma da to ne izgleda učinkovito, ali možemo ustanoviti dosta bitnih karakteristike ingota koji su propisani u internom standardu CIS 309. To su oblici i mjere ingota, način označavanja kvalitete ingota, odlivena oznaka, oznake kombinacijom boja, oznaka šarže ingota, atest i vrlo bitno stanje površine odljevaka. Površine ingota moraju biti ravne i čiste, sjajne, bez vidljivih nemetalnih primjesa, oksida i oksidnih kožica, bez vidljivih pukotina ili lunkera na površinama. Tamna površina ingota znači da su oksidirani, a uzroka za to može biti puno. Isto tako talioci moraju pregledati da ne bi u ingotima bilo vlage ili vode, jer ako su ingoti bili izloženi kiši moraju se osušiti. Vlaga dodatno oksidira ingote, povećava odgor i nečistoće i može izazvati eksplozije u procesu taljenja. Skladište aluminijske mora biti natkriveno i vezovi ingota bi trebali biti zaštićeni plastičnom folijom.

Vizualnim pregledom taline nakon taljenja ingota, možemo odrediti ovisno o količini nastale šljake (oksida i nečistoća) na površini taline, čistoću ulaznih ingota. Ako u procesu taljenja nastane 1,0 do 3,0 % šljake onda je to prihvatljivo. Ako nastaje više od toga znači da su nečistoće prisutne u ingotima i da je to gubitak na supstanci (odgor) i dodatni problem čistoće taline. Moramo uzeti u obzir da to vrijedi samo za taljenje šarže sa 100% ingotima, a obično za

taljenje koristimo recepturu 50,0% ingota + 50,0% kružnog materijala (uljevni sistemi, škart odljevci). Nakon degazacije taline na uređaju „Foseco”–FDU prema nastaloj količini šljake koju moramo odstraniti sa površine taline, možemo vizualno procijeniti čistoću taline. Za pravilnu procjenu čistoće potrebno je i određeno iskustvo.

#### 4.2. Kontrola kemijskog sastava i utjecaj pojedinih elemenata

Kontrola kemijskog sastava vrši se na uređaju kojeg nazivamo optički spektrometar prikazan na slici 21. Na njemu se vrši kontrola kemijskog sastava ingota, taline i odljevaka. U ingotima imamo polazni kemijski sastav slitine koji se nakon taljenja može neželjeno promijeniti (odgori nekih elemenata: Mg, Sr) ili zagađivanja ovisno o vrsti legure (Fe, Cu, Zn, Ca, Cr itd.). Kemijski sastav taline može se promijeniti i planiranim metalurškim procesima kao što su:

- **legiranje** - dodavanje legirajućih elemenata (Si, Mg, Cu i drugi)
- **modifikacija** – dodavanje elemenata u smislu poboljšanja mikrostrukture i smanjenje veličine zrna slitine nakon skrućivanja (Sr, Na, Ti, B)
- **rafinacija** – dodatno prozračivanje taline, osiromašivači šljake, degazatori i rafinatori ili komponente na bazi heksakloreтана kojeg koriste rafinerije koje proizvode ingote

Dakle prilikom kontrole kemijskog sastava moramo točno znati što kontroliramo, koje su vrijednosti pojedinih elemenata, legirajućih i nečistoća i što to znači za propisanu Al-slitinu za lijevanje, odnosno za taj odljevak.



Slika 21. Spektrometar THERMO - ARL 3460 ADVANTAGE [Autor]

Utjecaj pojedinih elemenata na karakteristiku legure:

**Mg (magnezij)** - ne utječe na livljivost slitine, povećava čvrstoću naročito nakon toplinske obrade slitina, odgara u procesu taljenja, poboljšava obradivost, ne utječe na antikoroziivnost i bitno poboljšava sposobnost poliranja

**Cu (bakar)** - smanjuje livljivost slitine, povećava čvrstoću, posebno tvrdoću i poboljšava obradivost i sposobnost poliranja i brušenja. Negativan utjecaj bakra je na povećanje korozije slitine

**Fe (željezo)** - javlja se kao nečistoća, tvori fazu Al-Fe-Si, koja izgleda igličasto i krhko i smanjuje mehaničke osobine. Nema utjecaja na livljivost, a u tlačnom lijevu pozitivno djeluje na smanjenje lijepljenja slitine na alat i dijelove alata i povećava životni vijek alata. Ima negativan utjecaj na obradivost, povećana potrošnja reznih alata i smanjuje antikoroziivnost slitine.

**Mn (mangan)** - legirajući element, smanjuje negativan utjecaj željeza tako što razbija igličastu strukturu faze Al-Fe-Si i tvori fazu Al-Fe-Mn-Si u globularni (okrugli) oblik, ta faza se vidi kao „kinesko pismo”. Mangan ne utječe na livljivost, povećava mehaničke osobine, može imati negativan utjecaj na obradivost, nema utjecaja na koroziju i sposobnost poliranja i brušenja.

**Zn (cink)** - nema utjecaja na livljivost, povećava kristalna zrna i time izaziva sklonost toplim pukotinama na odljevcima, smanjuje mehanička svojstva, povećava obradivost, nema utjecaja na korozivsku postojanost i povećava sposobnost poliranja, brušenja i eloksacije.

**Ti (titan)** - dodaje se kao legirajući element, do 0,2 % i ima utjecaj na smanjenje dentrita, kristalnih zrna, time povećava mehanička svojstva i obradivost slitine. Nema utjecaja na livljivost i korozivsku postojanost. Iznad 0,2% Ti tvori intermetalnu fazu Al<sub>3</sub>Fe koja se izlučuje kao tvrdi uključci i tada smanjuje sve pozitivne utjecaje na obradivost i sposobnost poliranja

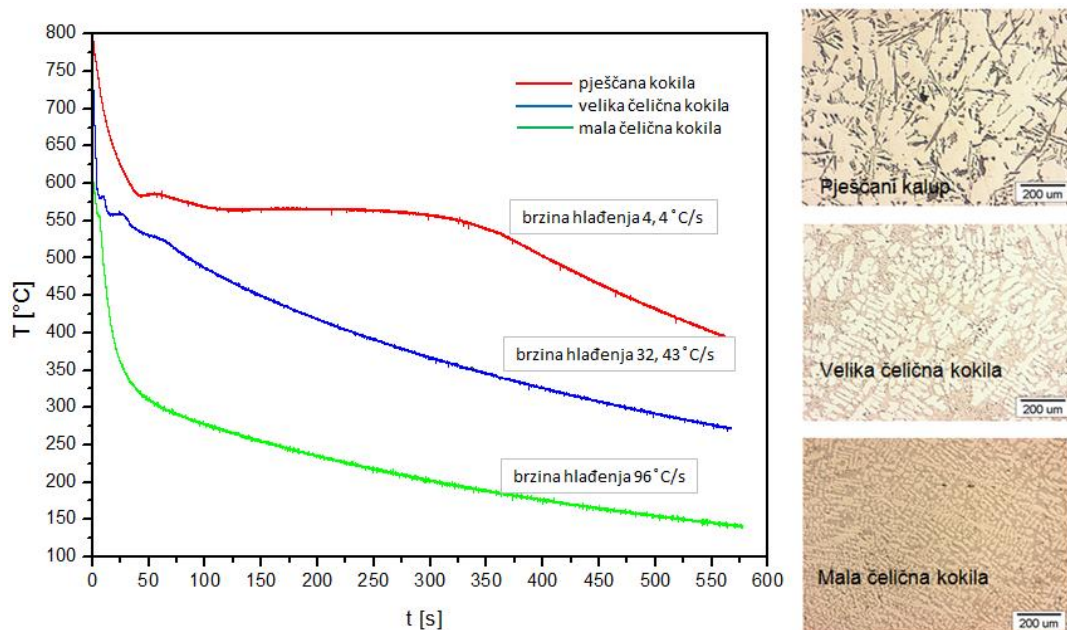
**Ni (nikal), Cr (krom), Sn (kositar), Pb (olovo)** - prateće nečistoće koje su nerastvorive u slitini i nemaju pozitivnih utjecaja na osnovne karakteristike slitina. Ograničene su sa maksimalnim koncentracijama u određenim slitinama.

**Sr (stroncij), Na (natrij)** - modifikatori za podeutektičke slitine, koji stvaraju eutektik Al-Si globularnog (modificiranog) oblika i time poboljšavaju mikrostrukturu i mehaničke osobine slitine.

Kemijski sastav je vrlo važna karakteristika slitine jer iz njega proizlaze sve druge tehnološke, kemijsko fizikalne i mehaničke osobine slitine. To nam je kao osobna iskaznica za slitinu. No kod sekundarnih aluminijskih slitina s kojima mi radimo vrlo je bitno da se analizira čistoća slitine, prisutnost i oblik intermetalnih faza, prisutnost oksida i nemetalnih uključaka, zatim prisutnost plina vodika (H<sub>2</sub>) ili naplinjenosti ingota.

### 4.3. DTA (Diferencijalno termička analiza) slitina

Princip DTA analize je da se snima krivulja hlađenja određene slitine. Tekuća slitina, odnosno talina se ulijeva u poseban lončić u kojem se nalazi pirometar za mjerenje temperature i snima se krivulja hlađenja. Iz krivulje hlađenja određuju se karakteristične temperature (likvidus, solidus) i vremena faznih promjena (tekuće-kruto-tekuće). Na osnovu toga se mogu odrediti neke bitne karakteristike slitine: interval skrućivanja ( $T_{liq} - T_{sol}$ ), oblik eutektika Al-Si, dali je mikrostruktura modificirana ili nemodificirana i određuje se veličina zrna (dendrita).

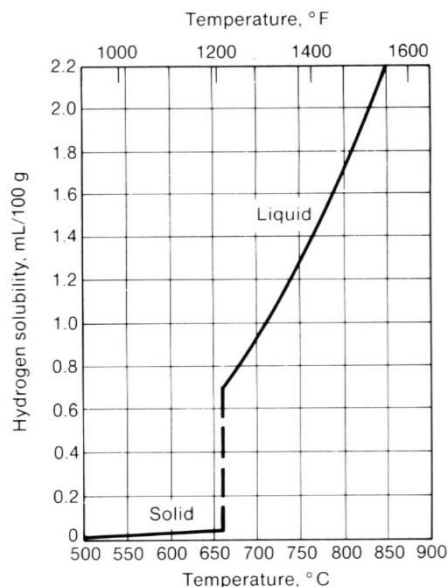


Slika 22. Krivulje ohlađivanja za tri mjerna lončića za slitinu AlSi10Mg i odgovarajuće mikrostrukture [2]

Porijeklo aluminijske slitine ima utjecaj na pojam fenomena morfologije skrućivanja, pojava kada se dešavaju slučajevi da legure sa identičnim kemijskim sastavom imaju različite intervale skrućivanja i mikrostrukturu, jer to su karakteristike legure o kojima ovisi sklonost nastajanja poroznosti skrućivanja.

### 4.4. Kontrola napljinjenosti taline

Napljinjenost taline je plinska poroznost, odnosno prisutnost molekula plina vodika rastopljenog u talini. Topljivost vodika ovisi o temperaturi taline i ona maksimalno raste iznad 780 °C, što je vidljivo na dijagramu prikazanom na slici 23. Nakon skrućivanja taline vodik se pravilno rasporedi po volumenu taline, odnosno po volumenu odljevka što se nakon mehaničke obrade odljevka na obrađenoj površini manifestira kao sitne okrugle rupice (mikroporoznost).



Slika 23. Dijagram topivosti vodika ovisno o temperaturi [2]

Mjerenje naplínjenosti taline odnosno određivanje indeksa naplínjenosti taline vrši se na sljedeći način. Na uređaju VAC-TEST prikazanom na slici 24 koji ima ugrađenu vakumsku pumpu koja stvara podtlak od 80,0 mili bara (mbar) odlije se uzorak taline na način da se talina skrućuje pod vakuumom. Dok se drugi uzorak odlije normalno i on se skrućuje na zraku.



Slika 24. Uređaj za ljevanje uzorka sa skrućivanjem pod vakuumom [Autor]

Nakon toga se određuje gustoća uzoraka na način da se u laboratoriju na posebnom uređaju prikazanom na slici 25 metodom uranjanja u vodu (Arhimedov zakon) odredi gustoća uzoraka. Razlika gustoća uzoraka skrućenih na zraku i u vakuumu je indeks naplínjenosti. Indeks naplínjenosti je povezan sa količinom rastopljenog vodika u talini. Ovisno o tehnologiji ljevanja aluminijskih slitina, brzini skrućivanja i samoj vrsti odljevka utjecaj indeksa

naplinjenosti slitine ima različiti utjecaj. Na tlačnom lijevu utjecaj naplinjenosti može biti veći nego na kokilnom lijevu jer su veće brzine hlađenja odljevaka i odljevci su tankostijeni. Isto tako kvaliteta površine mehaničke obrade odljevaka koja se danas radi sa dijamantnim alatima i brzim režimima i praktički ispolira površine, dovode do toga da se lakše uočava prisutnost plinske poroznosti u odljercima. Nekada je to nepotrebno, a odljevke radi vizualnog efekta moramo bez obzira na funkcionalnost odvojiti u škart. Naplinjenost taline do određene količine nema uvijek negativan utjecaj na kvalitetu odljevaka. Vodik koji se izlučuje u metalu prilikom skrućivanja smanjuje efekt volumnog stezanja, sklonost nastajanja poroznosti radi skrućivanja.



Slika 25. Uređaj za određivanje gustoće uzoraka [Autor]

#### 4.5. Metalografska kontrola Al-slitina

Metalografskom kontrolom se određuje makro i mikrostruktura slitina ovisno dali se radi o ingotu ili odljevku. Kontrola se vrši na metalurškom mikroskopu prikazanom na slici 26 na posebno pripremljenim (ispoliranim) uzorcima. Metodom povećanja do 50,0 puta (makrografija) gledamo makrostrukturu uzorka, određujemo oblik i veličinu dendritskih kristala i stupanj naplinjenosti. Veličina kristalnih dendrita utječe na kvalitetu odljevaka i mehaničke osobine. No veličina zrna ovisi o brzini hlađenja odljevka ili ingota.

Mikroskopskim metodama na povećanjima od 100 do 1000 puta vidimo mikrostrukturu aluminijske legure, veličinu osnovnih kristala i raspored karakterističnih faza u određenoj leguri. Određujemo veličinu kristalnih zrna, zatim oblike eutektika Al-Si (modificiran, nemodificiran), prisutnosti intermetalnih faza (Al-Si-Fe-Mn-Cu-Mg), zatim prisutnost

nemetalnih uključaka i plinske poroznosti. Isto tako na odljevcima možemo odrediti kritične zone nastajanja mikropukotina ili mikroporoznosti koja može uzrokovati nefunkcionalnost odljevka (vodo nepropusnost), zatim greške koje nastaju nelamelarnim tokom taline u odljevku, dakle zarobljenim zrakom ili oksidnim kožicama itd.



Slika 26. Metalurški mikroskop [Autor]

Metalografskom analizom i metalografskom strukturom odljevaka možemo odrediti kvalitetu osnovne legure i predvidjeti mehaničke osobine odljevaka.

Veliki i realan problem je odrediti reprezentativan uzorak za metalografsku kontrolu. Radi se npr. o kontroli šarže aluminijskih ingota koja može biti veličine od 7,0 t do 20,0 t, a uzorak se radi samo na jednom dijelu prerezane i pripremljene površine, dok se nekoliko milimetara od promatranog uzorka mogu nalaziti skrivene greške koje trenutno ne vidimo. Metalografske metode kontrole se koriste u procjenjivanju karakteristika materijala (kvaliteta ingota i ulaznih materijala) i koristi se kao specijalistička egzaktna metoda kada se analizira točno određene probleme na odljevcima, struktura npr. mikroporoznost, mikro i makropukotine, zatim nemetalni ili oksidni uključci, itd..

#### **4.6. Kontrola mehaničkih svojstva**

Prilikom kontrole mehaničkih svojstva taline, vrši se vlačno ispitivanje kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstva i koje na odljevcima koji se lijevaju za autoindustriju imaju najveću važnost. Vlačno ispitivanje je postupak ispitivanja mehaničkih



svojstva materijala koje se vrši na kidalici i ispitivanjem se utvrđuju glavna svojstva koja karakteriziraju mehaničku otpornost materijala, ali i njihovu deformabilnost. Ispitivanje se vrši na način da se iz taline koju želimo ispitati na specijalnom ljevačkom alatu odliju epruvete sa točno definiranim dimenzijama i oblikom. Epruvete se nakon toga postavljaju u kidalicu prikazanu na slici 27 gdje se mjeri vlačna čvrstoća materijala, produljenje materijala i suženje poprečnog presjeka epruvete.



Slika 27. Univerzalna kidalica [9]

Osnovni dijelovi kidalice su:

- okvir
- mehanizam za opterećivanje
- uređaj za mjerenje sile
- uređaj za očitavanje

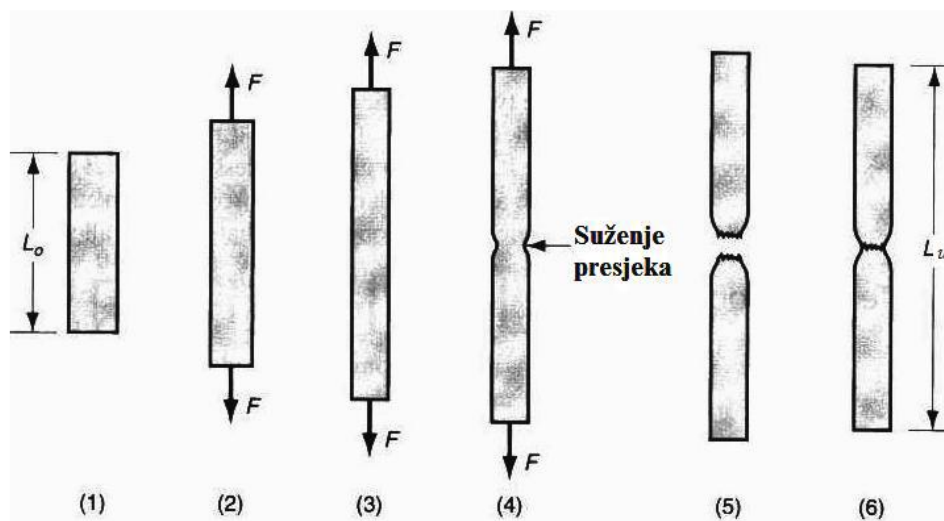
Većina današnjih kidalica opremljena je računalom. Čak štoviše, dosta modernih kidalica ne može niti funkcionirati bez suvremene računalne opreme. Skup radnji koje obavlja računalo uključuje: kontrolu provođenja ispitivanja, prikupljanje rezultata, obrada podataka, pa čak i kreiranje samog izvještaja. Svim ovim radnjama upravlja jedan ili više programskih paketa specijalno kreiranih za takve namjene. Najnovija generacija digitalne elektronike omogućuje brojne prednosti glede upravljanja i akvizicije podataka uz stabilan rad čime se smanjuje potreba za čestim umjeravanjima. Uporaba računala i pripadajućih programa daje operateru mogućnost da kontrolira rad kidalice uz istodobnu pohranu i analizu rezultata ispitivanja.

#### 4.6.1. Tijek ispitivanja

Nakon montaže i stezanja epruvete u stezne čeljusti kidalice, ona se opterećuje vlačnom silom. Prirast sile pri statičkom vlačnom pokusu u jedinici vremena mora biti takav da prirast proizvedenog naprežanja u epruveti bude  $\leq 10,0 \text{ N/mm}^2$  u sekundi. Za takvo sporo opterećivanje najprikladniji je hidraulički pogon kidalice. Kod takvog hidrauličkog sustava moguće je u svakom trenu rasteretiti epruvetu. Iznos sile kojom je opterećena epruveta iskazan je na skali kidalice u njutnima (N) ili kilonjutnima (kN). Budući da u svakom tijelu opterećenje izaziva deformaciju, tako će se i pri statičkom vlačnom ispitivanju epruveta produljivati. Stoga se u ispitivanju pored vrijednosti sile prati i produljenje epruvete. U softveru kidalice se za vrijeme ispitivanja definira dijagram sila – produljenje ( $F - \Delta L$ ), koji se naziva dijagramom kidanja. Produljenje epruvete  $\Delta L$ , predstavlja povećanje duljine  $L_0$  koja je naznačena na epruveti prije ispitivanja. Veličina  $L_u$  predstavlja konačnu duljinu epruvete.

Na slici 28 shematski je prikazano produljenje epruvete tijekom ispitivanja. Iz slike slijedi:

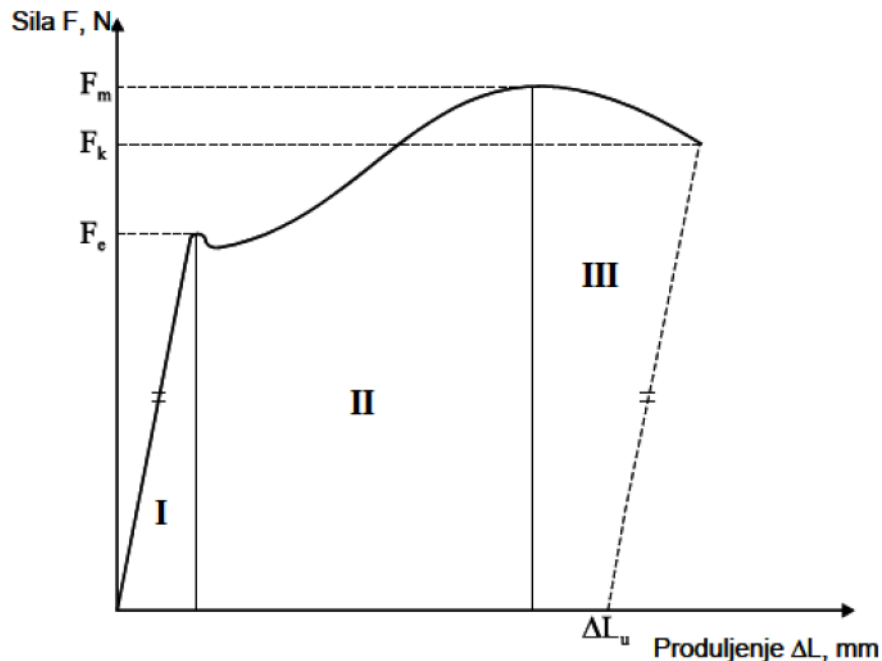
1. početni oblik i veličina epruvete bez opterećenja
2. epruveta pod utjecajem jednolikog istežanja
3. granica proporcionalnosti, najveće opterećenje kod kojeg su naprežanja i deformacija proporcionalni
4. početak tečenja materijala
5. pucanje epruvete
6. konačna duljina epruvete nakon pucanja.



Slika 28. Shematski prikaz produljenja epruvete [6]

#### 4.6.2. Dijagram kidanja $F - \Delta L$

Kao što je već spomenuto softver kidalice bilježi  $F - \Delta L$  dijagram, koji je za konstrukcijski čelik kao najprimjenjiviji materijal prikazan na slici 29, te pojašnjen u daljnjem tekstu.



Slika 29. Dijagram kidanja [6]

Dijagram je podijeljen na tri područja.

**U prvom području** prikazana je linearna ovisnost sile i produljenja. To znači da istim prirastom sile odgovaraju i jednaka produljenja. Ono vrijedi sve do vrijednosti sile  $F_e$  (sila na granici tečenja ili tzv. sila razvlačenja).

**U drugom području** dijagrama nakon sile razvlačenja, više nema linearne ovisnosti između povećanja sile i produljenja. Epruveta se nastavlja produljivati uz čak mali pad opterećenja. Za daljnje produljenje potreban je ponovni porast sile. Opterećenje raste sve do dostizanja maksimalne sile  $F_m$ .

**U trećem području dijagrama**, nakon sile  $F_m$  epruveta se nastavlja produljivati uz sve manju silu. Konačno pri vrijednosti sile  $F_k$  dolazi do loma epruvete.

Ukupno produljenje ispitivane epruvete nakon kidanja iznosi  $\Delta L_u = L_u - L_0$ , mm. Iznosi sile pri statičkom vlačnom ispitivanju ne daju uvid u ponašanje materijala ukoliko se ne uzme u obzir

površina poprečnog presjeka epruvete. Stoga se uvodi pojam naprezanje, koje se računa prema izrazu:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

Također uvodimo pojam istežanje ili relativno produljenje. Računa se prema izrazu:

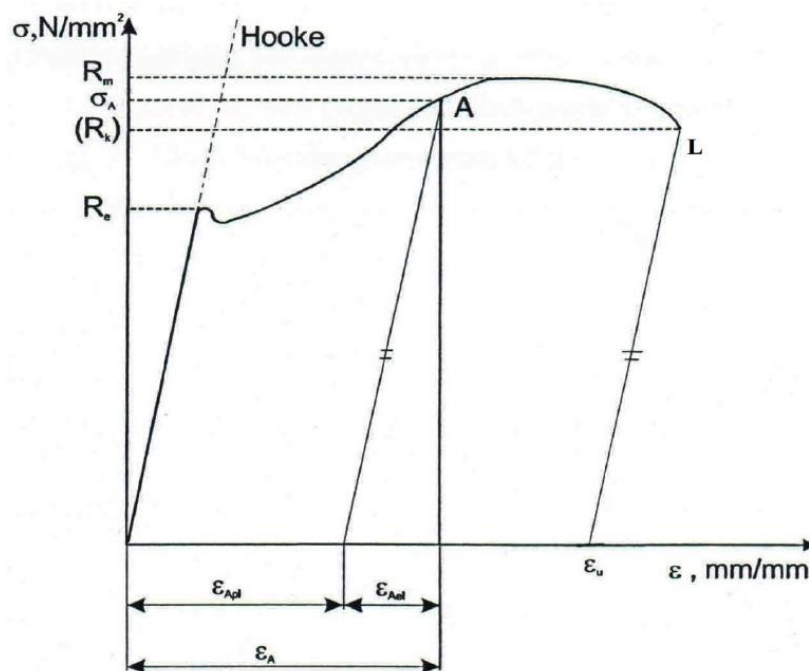
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \left[ \frac{mm}{mm} \right]$$

Istežanje se može i u postocima:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100, [\%]$$

#### 4.6.3. Dijagram naprezanje – istežanje $\sigma - \varepsilon$

Uvođenjem veličina  $\sigma - \varepsilon$  može se nacrtati dijagram naprezanje – istežanje. Na osi apscisa su vrijednosti istežanja  $\varepsilon$  u postocima, a na osi ordinata su vrijednosti naprežanja  $\sigma$  u  $N/mm^2$ . Na slici 30 prikazan je  $\sigma - \varepsilon$  dijagram za neki konstrukcijski čelik.



Slika 30. Dijagram naprežanje – istežanje [6]

Dijagram  $\sigma - \varepsilon$  je kvalitativno jednak dijagramu  $F - \Delta L$  budući da se svi iznosi sile dijele s istom vrijednošću ( $S_0$ ), a sve vrijednosti produljenja s vrijednošću  $L_0$ . Iz tog razloga i ovaj dijagram počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hooke-ovim pravcem. Taj pravac je karakteriziran izrazom:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Taj izraz naziva se Hooke-ovim zakonom i vrijedi samo za elastično istežanje. Konstanta  $E$  naziva se modul elastičnosti ili Youngov modul, te predstavlja svojstvo materijala ovisno direktno o jačini veze između atoma i/ili molekula u kristalnoj rešetci ili amorfnoj strukturi. Što je ta veza jača veći je modul elastičnosti. Dakle, materijal veće krutosti ima veći modul elastičnosti, a elastičniji manji. Dolazi se do zaključka da je modul elastičnosti mjera za čvrstoće materijala. Također, ta veličina diktira nagib Hooke-ovog pravca. U tom području naprezanja materijal je deformiran isključivo elastično što znači da u slučaju rasterećenja, nema trajne deformacije epruvete tj. njena duljina je  $L_0$ . Nakon što naprezanje u materijalu dosegne vrijednost  $R_e$  – granice razvlačenja, on počinje „teći“ bez povećanja naprezanja. Granica razvlačenja je jednaka:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

Daljnjim povećanjem naprezanja materijal prelazi granicu razvlačenja te ulazi u područje plastičnih ili trajnih deformacija. Ako se u točki A iz dijagrama (slika 30) rastereti epruvetu, u njoj će ostati trajna plastična deformacija  $\varepsilon_{Apl}$ . To znači da će razmak mjernih točaka koji je prije bio označen sa  $L_0$  biti uvećan za iznos  $\Delta L_A$  pa je:

$$\varepsilon_{Apl} = \frac{\Delta L_A}{L_0}, \left[ \frac{mm}{mm} \right]$$

Svaka se deformacija u materijalu nakon prijeđene vrijednosti  $R_e$  sastoji od elastične (povratne, privremene) deformacije  $\varepsilon_{el}$  koja rasterećenjem epruvete nestaje, te od plastične deformacije  $\varepsilon_{pl}$  koja ostaje trajno prisutna u materijalu. To je također prikazano na dijagramu rastezanja za točku A. Iznos trajne deformacije u dijagramu  $\sigma - \varepsilon$  se dobije tako da se iz željene točke na dijagramu povuče paralela s Hooke-ovim pravcem i nađe presjecište na osi apscisa. Naprezanje kod maksimalne sile naziva se vlačnom ili rasteznom čvrstoćom i jednako je:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

Tu veličinu nikako se ne smije nazvati maksimalnim naprežanjem, već naprežanjem pri maksimalnoj sili. Površina presjeka epruvete od trenutka postizanja maksimalne sile počinje se naglo smanjivati pa stvarno naprežanje, unatoč smanjenju sile raste. Vlačna čvrstoća osnovno je mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema svojoj mehaničkoj otpornosti.

Nakon dostignute vrijednosti  $R_m$  deformacija epruvete nije više jednolika po čitavoj njenoj duljini već se lokalizira na jednom mjestu, nastaje tzv. vrat. Naprežanje kod kojeg dolazi do loma epruvete zove se konačno naprežanje ili lomno naprežanje (točka L), i jednako je:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

Vrijednost istezanja nakon kidanja određuje se prema izrazu:

$$\varepsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_u}{L_0}, \left[ \frac{mm}{mm} \right]$$

U dijagramu  $\sigma - \varepsilon$  vrijednost  $\varepsilon_u$  dobiva se na isti način kao i vrijednost  $\Delta L_u$  u dijagramu  $F - \Delta L$  a to je povlačenje paralele iz konačne točke dijagrama s Hooke-ovim pravcem i nalaženjem presjecišta tog pravca s osi apscisa.

Ukoliko se vrijednost  $\varepsilon_u$  izrazi u postocima označava se slovom A i naziva se istezljivost:

$$A = \varepsilon_u \cdot 100, [\%]$$

Iznos istezljivosti ovisi o tome da li je ta veličina određena na kratkoj ( $L_0 = 5 \cdot d_0$ ) ili dugoj epruveti ( $L_0 = 10 \cdot d_0$ ) pa se to obavezno označuje indeksom uz slovo A:

- $A_5$  – kratke epruvete
- $A_{10}$  – duge epruvete

Pokazatelj deformabilnosti uz istezljivost A, je i vrijednost konačnog suženja presjeka tj. kontrakcija Z koja se određuje prema izrazu:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100, [\%]$$

Pri čemu  $S_u$  označava konačnu površinu presjeka u  $\text{mm}^2$ .

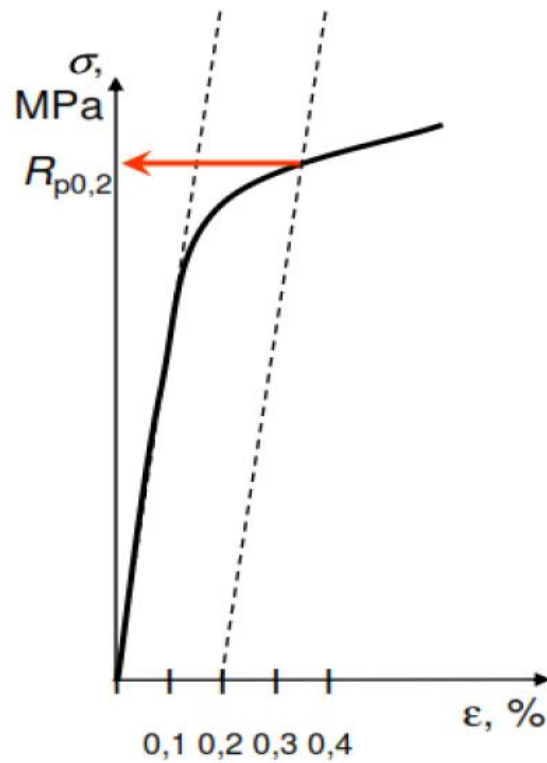
#### 4.6.4. Konvencionalna granica razvlačenja $R_{P0,2}$

Granica razvlačenja vrlo je važna veličina s gledišta dimenzioniranja strojarskih proizvoda jer se kod elemenata strojeva i strojarskih konstrukcija u pravilu ne dozvoljava pojava plastičnih deformacija. Pomoću te veličine određuje se dopušteno naprezanje.

Iz kvalitativnih dijagrama  $\sigma - \epsilon$  proizlazi da je jedino kod mekog čelika izražena granica razvlačenja  $R_e$ , tj. vidi se diskontinuiran prijelaz iz područja elastičnih u plastične deformacije, dakle, tu je granica razvlačenja, prilično jasna.

Kod materijala koji posjeduju kontinuirani prijelaz iz područja elastičnih u područje plastičnih deformacija ne može se sa sigurnošću reći da se zna koliki je iznos  $R_e$ , stoga se utvrđuje konvencionalna granica razvlačenja  $R_{P0,2}$ . Prema definiciji, to je ono naprezanje kod kojeg će nakon rasterećenja epruvete, u materijalu ostati trajna deformacija od 0,2 %.

Za razliku od standardnog statičkog – vlačnog ispitivanja za određivanje  $R_{P0,2}$  potreban je dodatan uređaj – ekstenziometar (precizni mjerač produljenja) koji se učvršćuje na epruvetu te za pojedine vrijednosti sile  $F$  mjeri produljenje  $\Delta L$ . Na osnovi izračunatih vrijednosti  $\sigma$  i  $\epsilon$  (izražen u %) grafički se određuje iznos  $R_{P0,2}$ , prikazano na slici 31. U dijagramu se izmjerene sile nanose kao ordinate, a odgovarajuća istežanja (u %) kao apscise. Zatim se na dijagramu povuče paralelni pravac sa Hooke-ovim pravcem, na udaljenosti koja odgovara istežanju od 0,2 % od prvobitne mjerne duljine epruvete mjereno u pravcu apscise. Traženo naprezanje nalazi se u točki gdje se sijeku paralelni pravac i krivulja očvršćivanja.



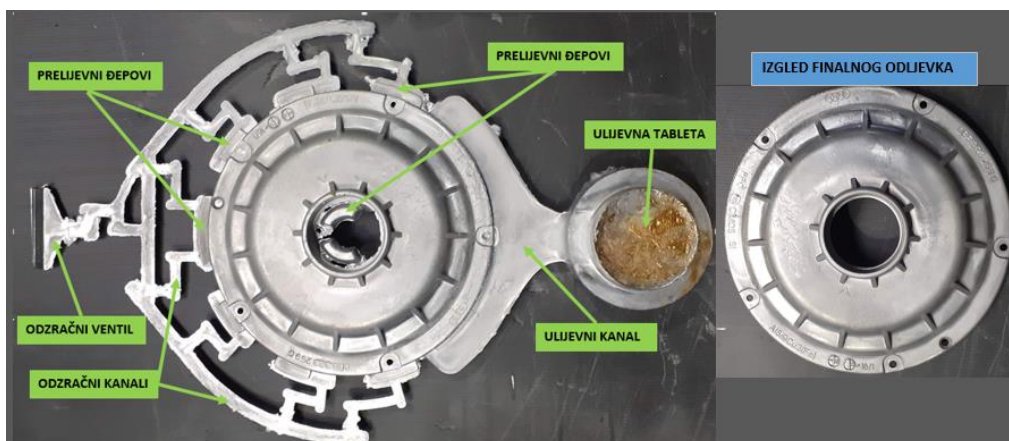
Slika 31. Određivanje konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$  [6]

Za razliku od granice razvlačenja  $R_e$ , konvencionalna granica razvlačenja podrazumijeva plastičnu deformaciju od 0,2 %. No tako mali iznos trajne deformacije je zanemariv budući se dozvoljeno naprezanje koje propisuje konstruktor smanjuje u odnosu na tu veličinu i do nekoliko puta uvođenjem faktora sigurnosti. Na taj način se osigurava da strojni elementi ili dio konstrukcije ne bude plastično deformiran u eksploataciji.



## 5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

Prilikom odvijanja procesa nastanka dijelova koje poduzeće P.P.C. Buzet izrađuje i isporučuje svojim kupcima koji se svrstavaju među najveće i najpoznatije marke automobila, kao što su BMW, Audi, VW, Mercedes i ostali, najvažnije je osigurati kvalitetu koju kupac zahtjeva. Kako bi održali kvalitetu svi propisani parametri u procesima moraju biti točno definirani, kontrolirani i nadzirani kako bi u svakom trenutku jamčili kvalitetu proizvedenih dijelova. Zbog takvog načina rada u raznim se procesima zbog visokih standarda kvalitete svakodnevno javljaju nesukladni proizvodi koji ne zadovoljavaju najviše standarde i želje kupca. Takvi se proizvodi škartiraju i vraćaju na prvu operaciju u procesu, odnosno u proces proizvodnje aluminijske legure i takve proizvode nazivamo povratni materijal za operaciju taljenja. Uz navedene nesukladne proizvode važno je napomenuti da se za proizvodnju jednog aluminijskog odljevka u procesu tlačnog lijevanja utrošiti u prosijeku utroši dvostruko materijala nego je potrebno za sam odljevak. Količina materijala koja se dodatno utroši na izradu odljevka također se naziva povratni materijal, te se isto tako nakon operacije lijevanja i obrezivanja vraća na operaciju taljenja. Odljevak neposredno nakon izlaska iz ljevačkog alata za tlačno lijevanje prikazan je na slici 28 na kojoj su prikazani i svi dijelovi uljavnog sustava gdje je jasno vidljivo da se polovica utrošenog materijala upotrebljava za samu funkcionalnost ljevačkog alata.



Slika 32. Usporedba odljevka s uljavnim sustavom i finalnog odljevka [Autor]

Povratni materijal koji se sastoji od ostataka uljavnog sustava nakon operacije obrezivanja i od nesukladnih proizvoda odvojenih u daljnjim procesima proizvodnje u zadanom se omjeru koji iznosi 50,0 % ingota i 50,0 % povratnog materijala miješa na operaciji taljenja u cilju zadržavanja nivoa kvalitete taline. Kako bi dokazali da lijevanje sa povratnim materijalom ne

utječe na mehanička svojstva materijala izrađen je ovaj eksperimentalni dio završnog rada u kojem je odlivena količina taline sa 100,0 % udjelom povratnog materijala i izvršena su testiranja i usporedbe rezultata sa redovnim serijskim uzorcima taline sa udjelom povratnog materijala od 50,0 %.

### 5.1. Priprema taline od 100,0% povratnog materijala

Proces taljenja 100,0 % povratnog materijala izvršen je na plinskoj peći za taljenje Botta nakon što se prethodno korito plinske peći ispraznilo od prethodno pripremljene taline, kako bi se novo nastala talina u potpunosti sastojala od povratnog materijala. Nakon izvršenog procesa taljenja po zadanim parametrima procesa izvršeno je kisanje taline u transportni lonac i talina je transportirana na operaciju degazacije taline. Prije nego se degazirana talina transportirala na liniju za tlačno lijevanje uzet je uzorak za mjerenje napljinjenosti taline i izvršeno je mjerenje napljinjenosti. Rezultati napljinjenosti u tablici br. 1 uspoređeni su s uzorkom iz redovne serije lijevanja i vidljivo je da lijevanjem 100% povratnog materijala ne utječemo na porast napljinjenosti taline.

Tablica 1. Rezultati mjerenja indeksa napljinjenosti

Datum	Mjesec	Legura	Indeks napljinjenosti	Dozvoljen indeks napljinjenosti	Analizu izvodio	Napomena
15.11.2018	11	AlSi9Cu3	1,00%	4,00%	Emil F.	Ljevanje sa 100% povratnim materijalom
15.11.2018	11	AlSi9Cu3	0,90%	4,00%	Emil F.	

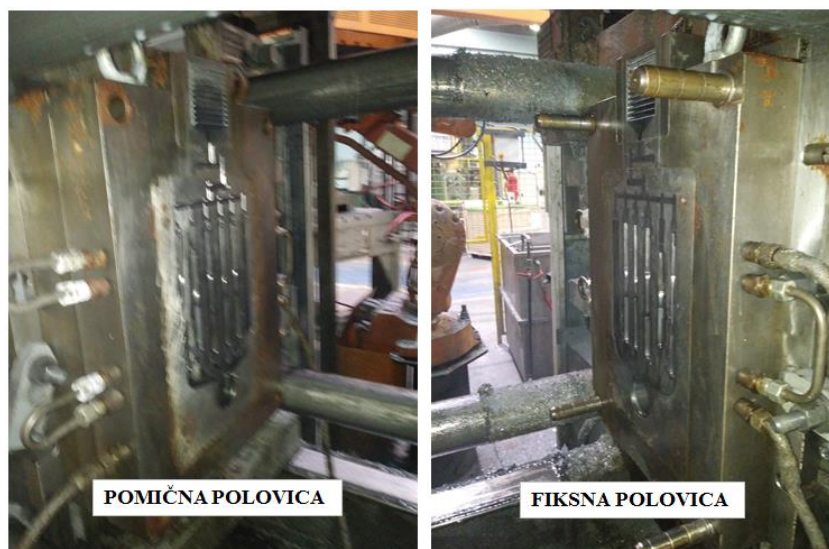
Nakon ulijevanja taline u peć za održavanje temperature na liniji za tlačni lijev, iz peći su uzeti uzorci taline za kemijsku analizu taline. Nakon izvršenog ispitivanja kemijske analize rezultati su uspoređeni s rezultatima redovne serije lijevanja i rezultati kemijske analize taline lijevane od 100,0 % povratnog materijala pokazali su da su svi elementi unutar dozvoljenih granica. Rezultati i usporedba kemijskog sastava talina sa različitim postotkom povratnog materijala prikazani su u tablici broj 2.

Tablica 2. Rezultati i usporedba kemijskog sastava talina sa različitim postotkom povratnog materijala [Autor]

Kemijski element	Minimalni %	Maksimalni %	UZORAK LIJEVAN SA 50% POVRATNOG MATERIJALA				UZORAK LIJEVAN SA 100% POVRATNOG MATERIJALA				RAZLIKA
			Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3	Srednja vrijednost	Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3	Srednja vrijednost	
Aluminij (Al)	0	/	86,2366	86,56403	86,4989	86,43318	86,22517	86,29328	86,40394	86,30746	-0,12572
Silicij (Si)	8	10	9,07855	8,75862	8,78595	8,87438	8,81513	8,77444	8,67346	8,75435	-0,12003
Željezo (Fe)	0,6	1	0,64497	0,65728	0,6662	0,65615	0,66702	0,66811	0,65781	0,66431	0,00816
Bakar (Cu)	2,7	3,7	2,69118	2,70239	2,72912	2,70757	2,91656	2,90529	2,90898	2,91028	0,20271
Mangan (Mn)	0	0,55	0,19238	0,19886	0,20345	0,19824	0,20155	0,20056	0,19959	0,20057	0,00233
Magnezij (Mg)	0,15	0,55	0,16622	0,16297	0,16208	0,16376	0,17252	0,17322	0,17299	0,17291	0,00915
Krom (Cr)	0	/	0,03256	0,03453	0,03535	0,03414	0,03585	0,03579	0,03566	0,03577	0,00163
Nikal (Ni)	0	0,5	0,03515	0,03368	0,0339	0,03424	0,03673	0,03606	0,03576	0,03618	0,00194
Cink (Zn)	0	1,2	0,82373	0,79314	0,79184	0,80291	0,8276	0,81436	0,81345	0,81847	0,01556
Titan (Ti)	0	0,2	0,04453	0,04249	0,04083	0,04262	0,04324	0,04256	0,04219	0,04266	0,00002
Kalcij (Ca)	0	/	0,00182	0,00189	0,00192	0,00188	0,00222	0,00228	0,00225	0,00225	0,00037
Natrij (Na)	0	/	0,00006	0,00004	0,00003	0,00004	0,00002	0,00004	0,00001	0,00002	-0,00002
Olovo (Pb)	0	0,2	0,04362	0,04161	0,04274	0,04266	0,04638	0,0446	0,04463	0,0452	0,00254
Antimon (Sb)	0	/	0,00523	0,00609	0,00591	0,00574	0,00518	0,00549	0,00552	0,00539	-0,00035
Kositar (Sn)	0	0,2	0,00352	0,00257	0,00205	0,00272	0,0048	0,00411	0,00396	0,00429	0,00157

## 5.2. Lijevanje uzoraka za ispitivanje

Na stroju za tlačno lijevanje BUHLER 42 koji postiže silu zatvaranja alata od 400,0 t, postavljen je specijalni alat za tlačno lijevanje koji služi za lijevanje uzoraka epruveta za ispitivanje vlačne čvrstoće materijala. Ljevački alat sastoji se od dvije polovice alata, fiksne i pomične polovice alata koje su prikazane na slici 29.



Slika 33. Prikaz fiksne i pomične polovice ljevačkog alata montiranog na stroj za tlačno lijevanje [Autor]

Lijevanje uzoraka izvršeno je po sljedećim parametrima lijevanja:

- temperatura fiksne polovice alata 150,0 °C
- temperatura pomične polovice alata 150,0 °C
- temperatura taline 690,0 °C
- brzina I. faze 0,2 m/s
- brzina II. faze 2,67 m/s
- tlak multiplikacije 837 bara
- sila zatvaranja alata 4200,0 kN
- debljina tablete 38,0 mm
- vrijeme ciklusa 55,0 s

Nakon 50 ciklusa lijevanja stroja, sanduk sa odlivenim uzorcima za ispitivanje prikazan na slici 30 transportiran je na operaciju 100,0 % X-Ray kontrole, gdje su se izabrali uzorci za testiranje.



Slika 34. Sanduk sa odlivenim uzorcima za ispitivanje [Autor]

### **5.3. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće materijala**

Za ispitivanje vlačne čvrstoće materijala odabrana su dva tipa epruveta za ispitivanje odlivena iz taline pripremljene od 100,0 % povratnog materijala:

- 5 uzoraka epruveta promjera ( $d_0$ ) 6,4 mm
- 5 uzoraka epruveta promjera ( $d_0$ ) 9,0 mm

Uzorci epruveta prije ispitivanja prikazani su na slici 35.



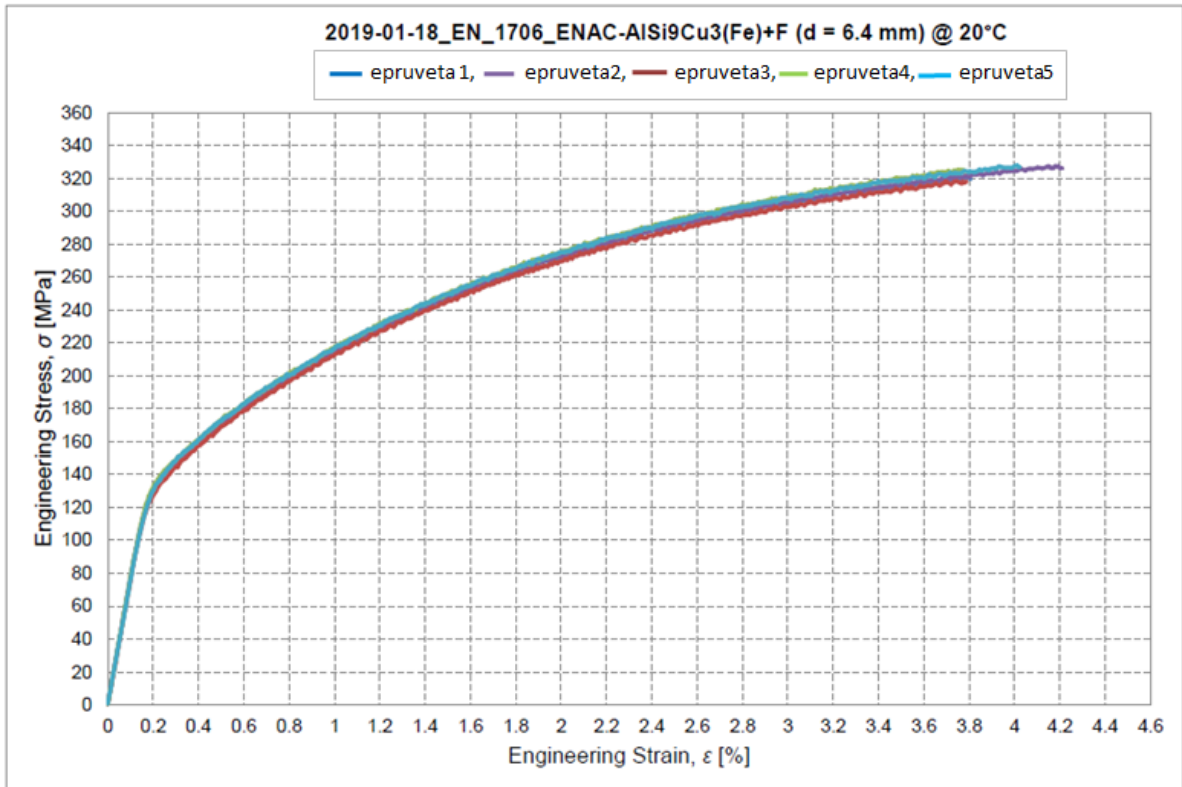
Slika 35. Epruvete za ispitivanje [Autor]

Ispitivanje je izvršeno po standardu za ispitivanje mehaničkih svojstva materijala EN 1706 ENAC 46000.

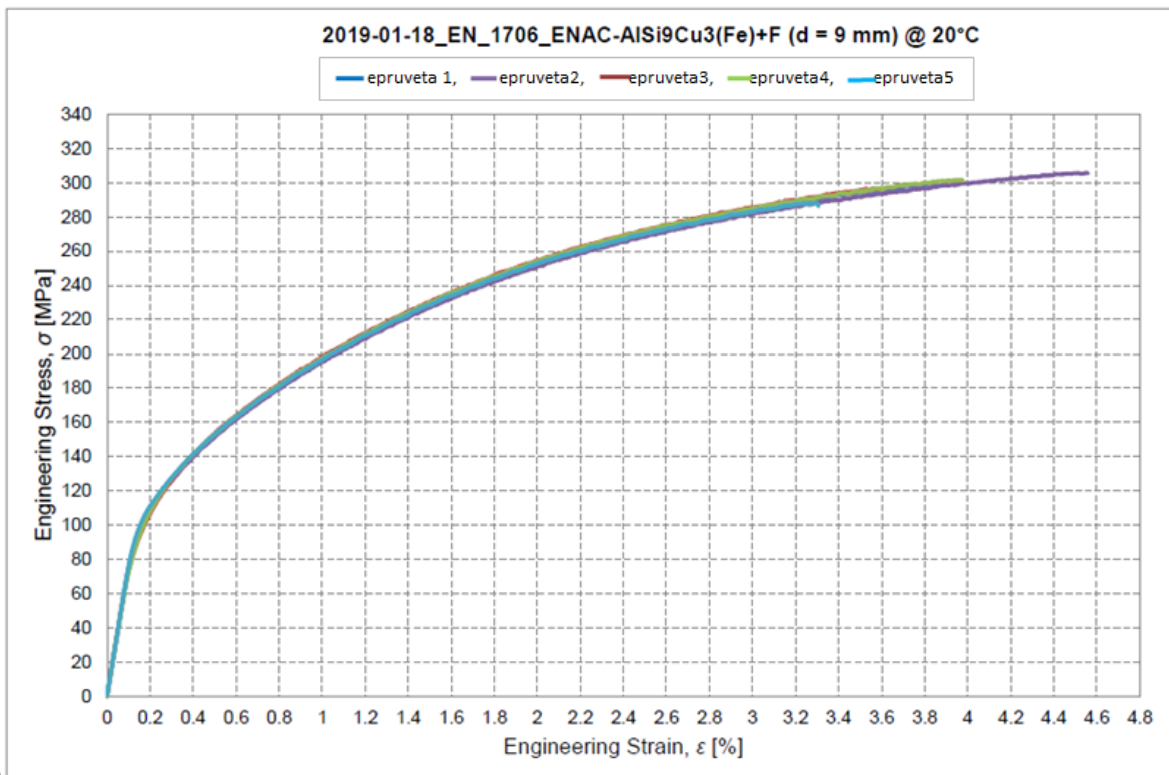
Tijekom razvlačenja epruveta na kidalici je bilježen dijagram kidanja ( $F-\Delta L$ ) iz kojeg su očitane sila razvlačenja  $F_e$  i maksimalna sila  $F_m$ . Drugi dijagram koji je kidalica bilježila i koji je prikazan na slici 36 nam pokazuje željene rezultate ispitivanja, a radi se o dijagramu napreznja - istežanja  $\sigma - \epsilon$  iz kojeg su očitane sljedeće vrijednosti:

- Vlačna čvrstoća  $R_m$  [MPa]
- Istezljivost  $A$  [%]
- Konvencionalna granica razvlačenja  $R_{P0,2}$  [MPa]

Na temelju navedenih rezultata izračunava se i Youngov modul elastičnosti  $E$  [GPa].



a)



b)

Slika 36. Dijagram istezanja - naprezanja a) epruvete promjera  $d_0$  6,4 mm b) epruvete promjera  $d_0$  9 mm [Autor]

Vrijednosti rezultata ispitivanja vlačne čvrstoće materijala nalaze se u tablici 3 i tablici 4 u kojima su na temelju 5 ispitanih uzoraka od svake vrste epruvete ( $d_0$ ) izračunate srednje vrijednosti koje su zatim uspoređene sa zadanim minimalnim granicama koje definira standard materijala. U tablici je jasno vidljivo da su za obje vrste ispitanih epruveta rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće  $R_m$  i istezljivosti  $A$  višestruko zadovoljile definirane granice, ali rezultati ispitivanja konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$  ne postižu zadovoljavajuću minimalnu vrijednost.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja epruveta promjera  $d_0$  6,4mm [Autor]

Uzorak ispitivanja	$d_0$ [mm] - početni promjer ispitnog uzorka	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ] - površina poprečnog presjeka	$F_e$ [kN] - sila razvlačenja	$R_{p0,2}$ [MPa] - konvencionalna granica razvlačenja	$F_m$ [kN] - maksimalna sila	$R_m$ [MPa] - vlačna čvrstoća	$E$ [GPa] - modul elastičnosti	$A$ [%] - istezljivost
Epruveta Br. 1	6,40	32,17	4,35	135,30	10,31	320,60	76,60	3,77
Epruveta Br. 2	6,38	31,97	4,21	131,50	10,48	327,80	76,10	4,19
Epruveta Br. 3	6,42	32,37	4,01	123,80	10,31	318,50	76,63	3,75
Epruveta Br. 4	6,40	32,17	4,18	129,90	10,47	325,50	77,39	3,75
Epruveta Br. 5	6,41	32,27	3,71	114,90	10,60	328,30	75,15	4,01
Srednja vrijednost	6,40	32,19	4,09	127,10	10,43	324,10	76,37	3,89
Minimalna dozvoljena vrijednost				140,00		240,00		1,00

Tablica 4. Rezultati ispitivanja epruveta promjera  $d_0$  9,0 mm [Autor]

Uzorak ispitivanja	$d_0$ [mm] - početni promjer ispitnog uzorka	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ] - površina poprečnog presjeka	$F_e$ [kN] - sila razvlačenja	$R_{p0,2}$ [MPa] - konvencionalna granica razvlačenja	$F_m$ [kN] - maksimalna sila	$R_m$ [MPa] - vlačna čvrstoća	$E$ [GPa] - modul elastičnosti	$A$ [%] - istezljivost
Epruveta Br. 1	9,10	65,04	8,67	133,20	19,47	299,40	76,55	3,84
Epruveta Br. 2	9,09	64,90	8,90	137,10	18,81	289,80	75,63	4,53
Epruveta Br. 3	9,06	64,47	7,72	119,80	19,12	296,60	75,73	3,53
Epruveta Br. 4	9,13	65,47	6,52	99,60	19,75	301,70	75,16	3,96
Epruveta Br. 5	9,09	64,9	8,84	136,20	18,71	288,20	76,85	3,29
Srednja vrijednost	9,09	64,95	8,13	127,10	19,17	295,20	75,99	3,83
Minimalna dozvoljena vrijednost				140,00		240,00		1,00

## 6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata o utjecaju lijevanja aluminijske legure AlSi9Cu od 100% povratnog materijala na njezina kemijska i prvenstveno mehanička svojstva može se zaključiti sljedeće. Lijevanjem sa 100 % povratnim materijalom ne utječemo na indeks naplinjenosti taline, uglavnom zadržavamo osnovni kemijski sastav legure uz minimalni odgor legirajućih elemenata, zadržavamo vlačnu čvrstoću materijala  $R_m$  i istežljivost materijala u zadanim granicama. Rezultati mehaničkih svojstava i analize su pokazale da nisu postignute zahtijevane vrijednosti granice razvlačenja  $R_{p0,2}$  koja je osnova prilikom izrade konstrukcije i dimenzioniranja auto dijelova koji se proizvode u P.P.C. Buzet. Može se pretpostaviti da je uzrok tome kemijski sastav i prije svega nizak sadržaj % magnezija (Mg) koji se najviše gubi u procesu pretaljivanja i koji se smanjio na min. vrijednost od 0,16 % Mg. Dozvoljene granice prema DIN EN 1706 mogu biti u rasponu od (% Mg= 0,15 - 0,55), odnosno maksimalna dozvoljena granica je 0,55 % Mg.

Kako sprovedena ispitivanja nisu dala u potpunosti željene rezultate preporuka za sljedeće ispitivanje je obavezno legiranje taline magnezijem (Mg), ciljano na vrijednost od 0,20 - 0,25 %, kako bi se utjecalo na poboljšanje mehaničkih svojstva i tako dobilo rezultate konvencionalne granice razvlačenja veće od minimalnih propisanih.



## LITERATURA

- [1] Stanić D., Interna škola lijevanja Cimos – Metalurgija aluminija, slitine i priprema taline, Buzet, 2009.
- [2] Stanić D., Interna škola lijevanja Cimos – Aluminijske slitine i njihove osobine, Buzet, 2007.
- [3] Zornada A/Tomić K., Interna škola lijevanja Cimos – Tlačni lijev, Buzet, 2007.
- [4] Hrgović D., Tehnologija materijala (Metali), Zagreb, 1984.
- [5] Kraut, B.: „Strojarski priručnik”, Tehnička knjiga, Zagreb, 1981.
- [6] Franz M., Materijali I. – 3. Dio, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb
- [7] Cimos-ova interna dokumentacija, Tehnološka dokumentacija, Buzet 2019
- [8] Interno uputstvo: Uputstvo za rad sa spektrometrom THERMO – ARL 3460  
ADVANTAGE
- [9] [https://sh.wikipedia.org/wiki/Kidalica#/media/Datoteka:Inspekt\\_desk\\_50kN\\_IMG8563.jpg](https://sh.wikipedia.org/wiki/Kidalica#/media/Datoteka:Inspekt_desk_50kN_IMG8563.jpg)
- [10] Službene Internet stranice: <http://kpnts74.cimos.net/>
- [11] <https://diecasting.com/blog/2016/03/23/hot-chamber-vs-cold-chamber-die-casting/>