

Analiza uzroka poroznosti vatrogasne dvodijelne razdjelnice od aluminijskog lijeva EN AC-51400S

Kuljanac, Jurica

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:456517>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Jurica Kuljanac

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Irena Žmak, dipl. ing.

Student:

Jurica Kuljanac

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se prvenstveno mentorici prof.dr.sc. Ireni Žmak, koja je osim pružanja stručne pomoći, pristala na obveze mentorstva i bez čije pomoći ovaj rad ne bi bio moguć. Također se zahvaljujem prof. dr. sc. Damiru Markučiću pomoći te Tomislavu Kezeleu na provođenju radiografije odljevka. Zrinki Švigelj, mag. ing. zahvaljujem na ispitivanju kemijskog sastava optičkom emisijskom spektrometrijom. Također se zahvaljujem direktoru tvrtke MIV dipl. ing. Smiljanu Hrenu, koji me je svojim stručnim savjetima usmjeravao prilikom izrade ovog rada. Posebno se zahvaljujem i kolegici dipl. ing. Ivančici Culjagi i ostalim djelatnicima laboratorija tvrtke MIV za pomoć pri metalografskoj analizi uzorka, kao i za stručne savjete o procesu lijevanja. Zahvaljujem se i prof. dr. sc. Željku Alaru na pomoći i organizaciji ispitivanja tvrdoće, te laborantima Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Ivanu Martinku i Romanu Divjaku na provedbi ispitivanja tvrdoće. Velika Hvala i Edinu Musemiću iz tvrtke Kontroltest International na ustupljenom XRF uređaju.

Zahvaljujem se i kolegi mag. ing. met. Desimiru Bobincu iz tvrtke Ferro-Preis na pruženim savjetima vezanima za tehnologije lijevanja. Posebna zahvala i voditelju konstrukcijskog odjela u tvrtki Ziegler, dipl. ing. Stanku Rasonji na pruženoj temi diplomskog rada, kao i djelatnicima tvrtke PONDT na ustupljenim resursima i stručnim savjetima.

Naposljetku, velika hvala roditeljima na podršci tijekom studija.

Jurica Kuljanac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JURICA KULJANAC**

Mat. br.: 0036446484

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza uzroka poroznosti vatrogasne dvodijelne razdjelnice od aluminijskog lijeva EN AC-51400S**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of porosity in sand cast aluminium EN AC-51400S 2-way dividing breeching**

Opis zadatka:

Lijevanje metala obilježilo je različite civilizacije još od prapovijesti, do te mjere da se i pojedina razdoblja prapovijesti nazivaju po lijevačkim legurama koje su se u to vrijeme koristile za izradu oruđa, oružja, nakita i drugih upotrebnih predmeta pa tako razlikujemo bakreno, brončano i željezno doba. Lijevanje metala je i danas vrlo intenzivna grana suvremene industrije diljem svijeta, koja osim uvođenja naprednih tehnologija lijevanja, u velikoj mjeri još uvijek počiva na postupcima koji su već dugo poznati. Procjenjuje se da oko 90 % danas proizvedenih proizvoda sadrži metalne odljevke. Najveći udio na tržištu odljevaka čine dijelovi za razna vozila te vodovodnih i plinskih instalacija.

Aluminijski lijev jedan je od suvremenijih atraktivnih lijevačkih materijala zbog svojeg niskog tališta i niske viskoznosti taline, pri čemu se relativno jednostavnim postupcima mogu proizvesti lagani, tankostijeni, čvrsti, kruti i vodonepropusni proizvodi vrlo složenog oblika i izvrsne korozijske postojanosti na pojedine medije.


U okviru ovog diplomskog rada potrebno je za zadani aluminijski odljevak vatrogasne dvodijelne razdjelnice, izrađen od legure EN AC-51400S, tj. EN AC-Al Mg5(Si), čija je funkcionalnost djelomično narušena poroznošću, utvrditi moguće uzroke poroznosti te predložiti poboljšanja sa stajališta konstrukcije odljevka, izbora materijala i lijevačkih postupaka.

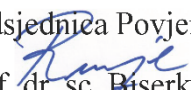
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
6. svibnja 2021.

Rok predaje rada:
8. srpnja 2021.

Predvideni datum obrane:
12. srpnja do 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao: 
prof. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE.....	2
2.1. Aluminij	2
2.2. Legirni elementi i njihovi utjecaji	4
2.2.1. Magnezij	4
2.2.2. Silicij.....	4
2.2.3. Željezo	5
2.2.4. Mangan.....	5
2.2.5. Titanij	5
2.2. Aluminijske legure	5
2.2.1. Al – Cu legure	7
2.2.2. Al – Si legure	8
2.2.3. Al – Mg legure.....	9
3. LIJEVANJE.....	11
3.1. Povijest ljevarstva	11
3.2. Postupak lijevanja	12
3.2.1. Lijevanje u pješčane kalupe	13
4. EKSPERIMENTALNI DIO	17
3.1. Ispitivanje metodom penetranata	18
3.1.1. Ispitivanje tlačne grane penetrantskom metodom.....	19
3.2. Radiografsko ispitivanje.....	23
3.3. Metalografsko ispitivanje	26
3.4. Određivanje kemijskog sastav legure.....	28
3.5. GDS analiza kemijskog sastava	33
3.6. Mjerenje tvrdoće	34
4.1. Deklarirana legura odljevka	35
4.2. Uljevni sustav i kalup.....	36

5. ANALIZA REZULTATA I PREPORUKE ZA POBOLJŠANJE KAKVOĆE	
ODLJEVKA	39
5.1. Preporuke vezane za leguru.....	39
5.2. Tehnološke preporuke	40
5.3. Preporuke za konstrukcijske mjere	40
6. ZAKLJUČAK.....	42

POPIS SLIKA

Slika 1. Najveći svjetski proizvođači aluminijskih legura [5]	3
Slika 2. Podjela aluminijskih legura prema sastavu i primjeni [10].....	6
Slika 3. Podjela Al legura ovisno o udjelu legirnog elementa [10].....	6
Slika 4. Binarni fazni dijagram Al – Cu [4]	7
Slika 5. Fazni dijagram Al – Si sustava sa karakterističnim mikrostrukturama [4].....	8
Slika 6. Binarni fazni dijagram Al – Si [4]	9
Slika 7. Al – Mg binarni fazni dijagram [4].....	10
Slika 8. Koraci u postupku lijevanja metala [9]	12
Slika 9. Postupci lijevanja prema vrsti kalupa[9].....	13
Slika 10. Komponente kalupne mješavine [9]	14
Slika 11. Prednosti i nedostaci pješčanih kalupa[9]	14
Slika 12. Kalup sa označenim komponentama[14].....	15
Slika 13. Pokušaj brtvljenja tlačne grane navarivanjem	17
Slika 14. Deklarirana legura odljevka	18
Slika 15. Segment odljevka sa nanesenim penetrantom	19
Slika 16. Oprema korištenja pri ispitivanju penetrantom.....	20
Slika 17. Pore na površini odljevka.....	20
Slika 18. Pore nazubljenog oblika na brušenoj površini odljevka	20
Slika 19. Nestaljen materijal na prijelazu stijenki.....	21
Slika 20. Pore na vanjskoj stijenci	21
Slika 21. Pore na obrađenom dijelu	21
Slika 22. Gnijezdo pora na obrađenoj površini	22
Slika 23. Sitne pore raširene po površini stijenke	22
Slika 24. Princip rada radiografskog ispitivanja [16].....	23
Slika 25. Primjer poroznosti u odljevku otkrivene radiografijom- sitnija poroznost očituje se u vidu tamnijih pjegica [17]	24
Slika 26. Radiogram tlačne grane	24
Slika 27. Gnijezdo pora na unutrašnjoj strani odljevka	25
Slika 28. Uvećani prikaz pora u tanjim stijenka.....	25
Slika 29. Mikrostruktura u poliranom stanju, 100x	26
Slika 30. Mikrostruktura uzorka, polirano, 100x	26
Slika 31. Mikrostruktura uzorka, polirano, 500x	27

Slika 32. Pretpostavljene glavne mikrostrukturne faze	27
Slika 33. Mikrostruktura „kinesko pismo“ koja se može naći u aluminijskim legurama	28
Slika 34. XRF x-200, ručni uređaj za ispitivanje kemijskog sastava [18]	28
Slika 35. Testne pločice legura bliskog kemijskog sastava	29
Slika 36. Označena područja za ispitivanje kemijskog sastava	30
Slika 37. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava na mjernom području 1	30
Slika 38. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava na mjerenom području 2	31
Slika 39. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava na mjerenom području 3	31
Slika 40. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava na mjerenom području 4	32
Slika 41. Područja mjerenja tvrdoće	34
Slika 42. Štap AlTi5B1 korišten za rafiniranje	35
Slika 43. Modeli za izradu kalupa	36
Slika 44. Prikaz modela donjeg dijela kalupa sa naznačenim elementima	37
Slika 45. Model za gornji dio kalupa, pojilo i spust	37
Slika 46. Nagli prijelaz sa tanke na debelu stijenku (velika masa)	41
Slika 47. Nagli prijelaz u debljini stijenke u centralnom dijelu	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjeri nekih pogrešaka na odljevku [14][15].....	16
Tablica 2. Usporedba kemijskog sastava područje 1	32
Tablica 3. Usporedba kemijskog sastava, područje 2	32
Tablica 4. Usporedba kemijskog sastava, područje 3	33
Tablica 5. Usporedba kemijskog sastava, područje 4	33
Tablica 6. Rezultati analize GDS-om.....	33
Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka.....	34
Tablica 8. kemijski sastav ENAC - 51400 legure / % [21]	35

POPIS OZNAKA

Kratica	Opis
XRF	X-ray fluorescence spectrometry
GD-OES	Glow discharge optical emission spectrometry
HV5	Metoda mjerenja tvrdoće s opterećenjem na indentoru od 49,03 N.

SAŽETAK

Tlačne grane neizostavan su dio vatrogasnih vozila. Služe za usmjeravanje toka vode na izlazu iz centrifugalne pumpe i nužno je da su vodonepropusne, kao i da ne zagađuju vodu koja kroz njih prolazi. U nastavku je opisana problematika lijevane aluminijske tlačne grane djelomično narušene funkcionalnosti, koja pri tlačnoj probi od 5 bara propušta vodu kroz stijenku. Sakupljene su dostupne informacije o tehnologiji izrade i korištenom materijalu, te su provedena ispitivanja da bi se stekao uvid u stanje materijala, kao i mogući uzroci narušene funkcionalnosti. Iz analize su proizašle i preporuke (a naglaskom na materijal) koje bi mogle dovesti do poboljšanja kvalitete odljevka.

Ključne riječi: aluminij, lijevanje, tlačna grana, pogreške, recikliranje

SUMMARY

Pressurized water dividers are an indispensable part of fire trucks. They serve to direct the flow of water from the outlet of the centrifugal pump and it is necessary that they are watertight, as well as not contaminating water that passes through them. The problem of a cast aluminum divider with partially impaired functionality is described below, which leaks water through the wall at a pressure test of 5 bar. Available information on the manufacturing technology and the material used was collected, and tests were performed to gain insight into the condition of the material, as well as possible causes of impaired functionality. The analysis also resulted in recommendations (with an emphasis on material) that could lead to an improvement in the quality of the casting.

Key words: aluminium, casting, water divider, defects, recycling

1. UVOD

Lijevanje je postupak oblikovanja proizvoda od metala prilikom kojeg se rastaljeni metal ulijeva u kalupe. Hlađenjem i skrućivanjem metala on zadržava oblik kalupa koji je poprimio prilikom ulijevanja. Radi se o tehnologiji oblikovanja staroj preko 5000 godina. Ovu tehnologiju oblikovanja karakteriziraju visoka produktivnost, mogućnost izrade složenih dijelova, ali i pogodnost za proizvodnju u velikim serijama.[1]

Iako se nekad bazirala prvenstveno na iskustvu stečenom preko pokušaja i pogrešaka, danas se o toj tehnologiji i njezinoj kompliciranosti zna veoma mnogo. Kvaliteta odljevka ovisi o brojnim utjecajnim faktorima poput kakvoće materijala, procesa taljenja i taljevini, čistoći korištenih sirovina, konstrukciji kalupa i odljevka, ali obliku i dimenzijama uljevnog sustava. Lijevanje se još uvijek smatra rizičnim procesom, obzirom da sam proces ulijevanja taline i skrućivanja nije vidljiv (proces osjetljiv na brojne faktore), a zahtjeva se veliki utrošak energije na taljenje metala.[2] Obzirom da se radi o zasad neizostavnoj tehnologiji, daljnji razvoj materijala te sve bolje razumijevanje utjecaja različitih parametara na kvalitetu odljevka vodit će ka sve većoj pouzdanosti ljevačkog postupka. Sve širu primjenu u ljevarstvu nalazi i aluminij i njegove legure. Radi se o lako dostupnom materijalu, male mase i dobrih specifičnih mehaničkih, ali i antikorozivnih svojstava. Iako su aluminijske legure korištene u lijevanju često sklone poroznostima, pravilnom konstrukcijom kalupa i uljevnog sustava (kao i odgovarajućim kemijskim sastavom taline), moguće je iskoristiti prednosti aluminijskih legura kao ljevačkih materijala.

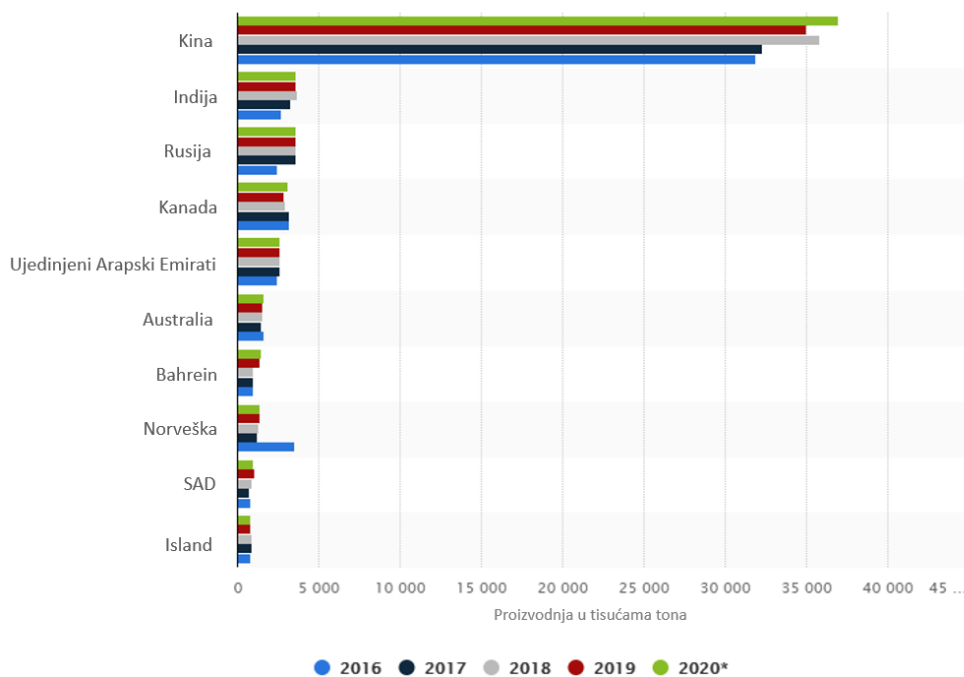
2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE

2.1. Aluminij

Jedinstvene kombinacije svojstava aluminija čine ga jednim od najraznovrsnijih i ekonomski atraktivnijih metalnih materijala za širu upotrebu. Kada su u pitanju uporabe u nosivim konstrukcijama, jedino čelične legure imaju širu primjenu od aluminijskih. Gustoća aluminija iznosi $2,7 \text{ g/cm}^3$, oko trećine gustoće čelika ($7,83 \text{ g/cm}^3$). Relativno niska gustoća u kombinaciji sa visokom čvrstoćom nekih aluminijskih legura omogućuje konstruiranje čvrstih i lakih konstrukcija, posebno upotrebljivih u transportne svrhe poput automobilske, zrakoplovne i svemirske industrije. Zahvaljujući oksidnom sloju koji tvori u prisustvu zraka, aluminij posjeduje superiornu korozijsku postojanost u odnosu na čelik. Ukoliko dođe do oštećenja površinskog oksidnog sloja, on se u vrlo kratkom vremenu obnavlja te materijal ostaje korozijski postojanim. Oksidni sloj je izrazito tanak i ljudskom oku nevidljiv, te ne dolazi do ljuštenja kao primjerice kod hrđe na površini čelika. Aluminijske površine mogu biti izrazito reflektirajuće, pa se u poliranom stanju često koriste i za dekorativne svrhe. Aluminij generalno posjeduje odličnu električnu i toplinsku vodljivost, a u usporedbi s bakrom njegova električna vodljivost viša je gotovo dvostruko ukoliko se promatra u odnosu na masu materijala.[3]

Plošno centrirana kubična rešetka aluminija daje mu dobru toplu i hladnu oblikovljivost, i pogodan je za proizvodnju vrlo složenih oblika kao i izuzetno tankih folija prikladnih za prehrambenu primjenu. U primarnom obliku aluminij se koristi isključivo u gnječenom obliku.[4]

Razvoj velikih izvora energije (elektrana) bio je ključan za razvoj aluminija, a danas je jedan od temeljnih materijala u strojarstvu. Na slici 1 prikazana je količina proizvedenog aluminija u razdoblju od 2016 – 2020. godine po najvećim državama proizvođačima.[5]



Slika 1. Najveći svjetski proizvođači aluminija [5]

2.2. Legirni elementi i njihovi utjecaji

U nastavku su navedeni neki od najčešćih legirnih elemenata korištenih u aluminijskim legurama te njihovi učinci na svojstva aluminijskih legura.

2.2.1. Magnezij

Magnezij je temeljni legirni element u aluminijskim legurama za povećanje čvrstoće i tvrdoće u toplinski obradivim aluminij-silicij legurama, i često se koristi u kompleksnijim aluminijskim legirnim sustavima koji sadržavaju bakar, nikal i ostale elemente, također za višu čvrstoću i tvrdoću. Za porast tvrdoće zaslužna je Mg_2Si faza, a korisna granica topivosti iznosi oko 0,70 % Mg. Povišenjem udjela magnezija ne dolazi do dodatnog poboljšanja čvrstoće i tvrdoće. Često korištene aluminijske legure visoke čvrstoće sadrže oko 0,40 – 0,7% magnezija. Binarni Al – Mg sustavi sadrže obično 4 – 10% Mg, a legure sa udjelom većim od 7% su toplinski očvrstljive. Pri višim koncentracijama magnezija može doći do nestabilnosti legure i dugotrajnog starenja pri sobnoj temperature, što se može izbjeći toplinskom obradom.[6]

2.2.2. Silicij

Najveći doprinos silicija u aluminijskim legurama je poboljšanje ljevačkih karakteristika. Dodavanjem silicija raste fluidnost legure, kao i otpornost stvaranju vrućih pukotina. Komercijalne legure obično sadrže do 30% silicija. Za tehnologije lijevanja u pijesku ili gipsu preporučeni udio silicija u leguri iznosi 5 - 7% , za lijevanje u trajne kalupe 7 – 9% , a za tlačne ljeveve 8 – 12%. Silicij u kombinaciji sa magnezijem čini Mg_2Si kod toplinski obradivih legura. Osim toga smanjuje i koeficijent toplinskog širenja.[6]

2.2.3. Željezo

Legiranjem sa željezom smanjuje se tendencija legure za naljepljivanjem na kalup, uz porast otpornosti na vruće pukotine. Porast udjela željeza praćen je padom duktilnosti. Željezo u leguri reakcijama stvara brojne intermetalne faze, od kojih su najčešće FeAl_3 , FeMnAl_6 , i α - AlFeSi . Navedene faze su zaslužne za porast čvrstoće, ali također uzrokuju pad duktilnosti.[6]

2.2.4. Mangan

Povisuje čvrstoću, ali posebnu važnost ima u legurama namijenjenima za hladno oblikovanje gdje poboljšava očvršćenje deformacijom.[7][6]

2.2.5. Titanij

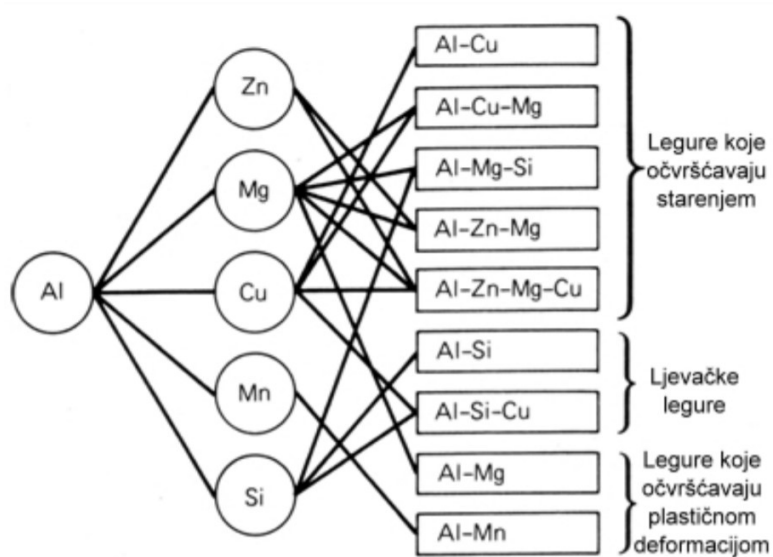
Titanij se često koristi za rafiniranje zrnate strukture aluminijskih legura, često u kombinaciji sa manjim količinama bora. Faza odgovorna za navedeno svojstvo je TiAl_3 , s razmakom kristalne rešetke koji usko odgovara onom u rešetci aluminija. Titanij se često dodaje u koncentracijama većim nego su potrebne za rafiniranje jer smanjuje tendenciju stvaranja pukotina. [6]

U literaturi je opisano i da određeni udjeli titanija mogu doprinijeti smanjenju poroznosti odljevka kod Al – Mg – Si legiranih sustava.[8]

2.2. Aluminijske legure

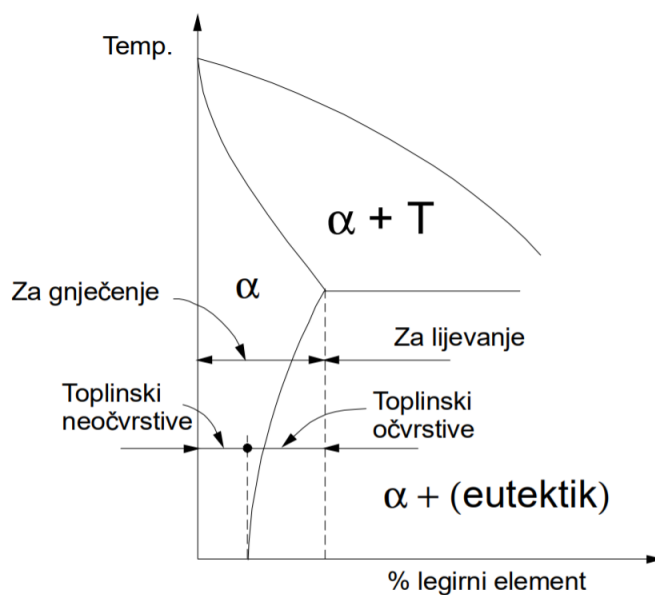
Aluminij se kao ljevačka sirovina vrlo rijetko koristi zbog slabijih mehaničkih karakteristika i loše livljivosti. Zbog navedenog se u lijevanju prvenstveno koriste aluminijske legure. Aluminij se može legirati velikim brojem elemenata od kojih su neki navedeni ranije. Legiranjem se nastoje dobiti bolje mehaničke karakteristike (tvrdoće i vlačna čvrstoća), krutost, a ponekad livljivost i žilavost. [9]

Legure aluminija koriste se u gnječenom i lijevanom stanju, a neke od njih su i precipitacijski očvrstljive. Na slici 2 navedene su neke od legura, te njihovo područje primjene. [10]



Slika 2. Podjela aluminijskih legura prema sastavu i primjeni [10]

Navedena klasifikacija aluminijskih legura prema području primjene može se prikazati i u faznom dijagramu (slika 3). [10]

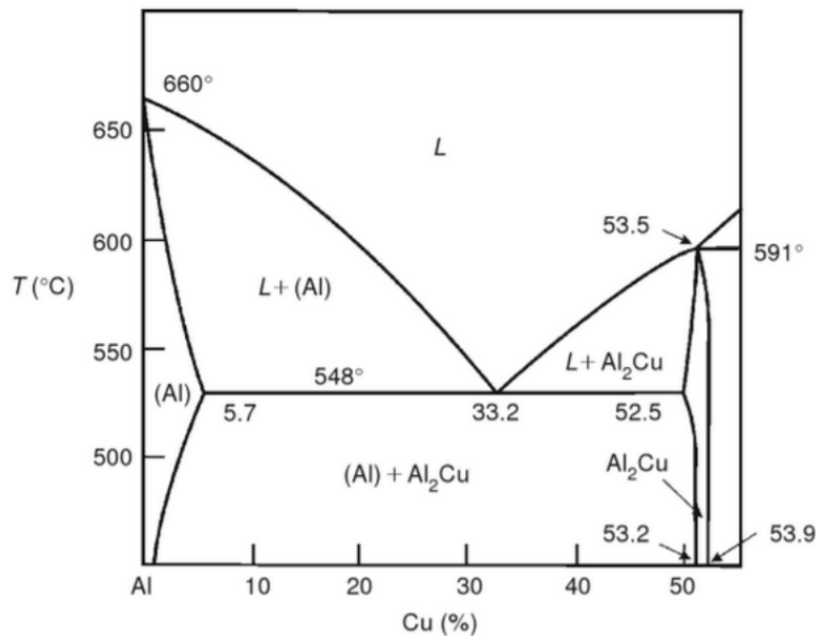


Slika 3. Podjela Al legura ovisno o udjelu legirnog elementa [10]

2.2.1. Al – Cu legure

Radi se o legurama koje su toplinski očvrstljive. Karakterizira ih osrednja čvrstoća, dobra rezljivost, otpornost na povišenim temperaturama, te srednja ili slaba udarna otpornost. Slabo su livljive i imaju korozivsku otpornost. Povišenjem sadržaja bakra livljivost dodatno opada, a generalno su sklone stvaranju toplih pukotina prilikom skrućivanja (osobito u kokilama). U svrhu smanjenja veličine zrna, dodaje im se titanij i/ili magnezij. [9]

Binarni fazni dijagram Al – Cu legura prikazan je na slici 4. [4]



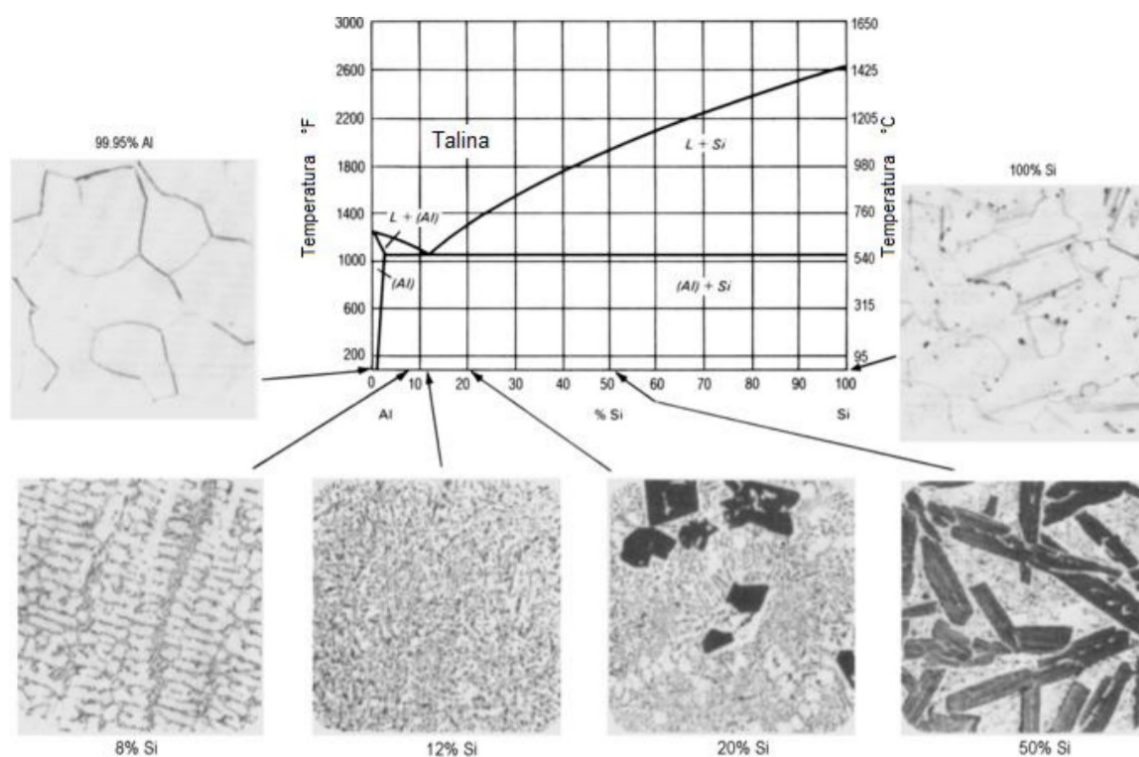
Slika 4. Binarni fazni dijagram Al – Cu [4]

Iz binarnog faznog dijagram Al – Cu sustava vidljivo je da pri 54% bakra nastaje intermetalni spoj Al_2Cu . Karakterizira ih tvrdoća i krhkost, te ih je potrebno izbjegavati u legurama tehničke primjene. Prisutnost ove faze može se očekivati u svim legurama sa udjelom bakra većim od 5,7%. [4]

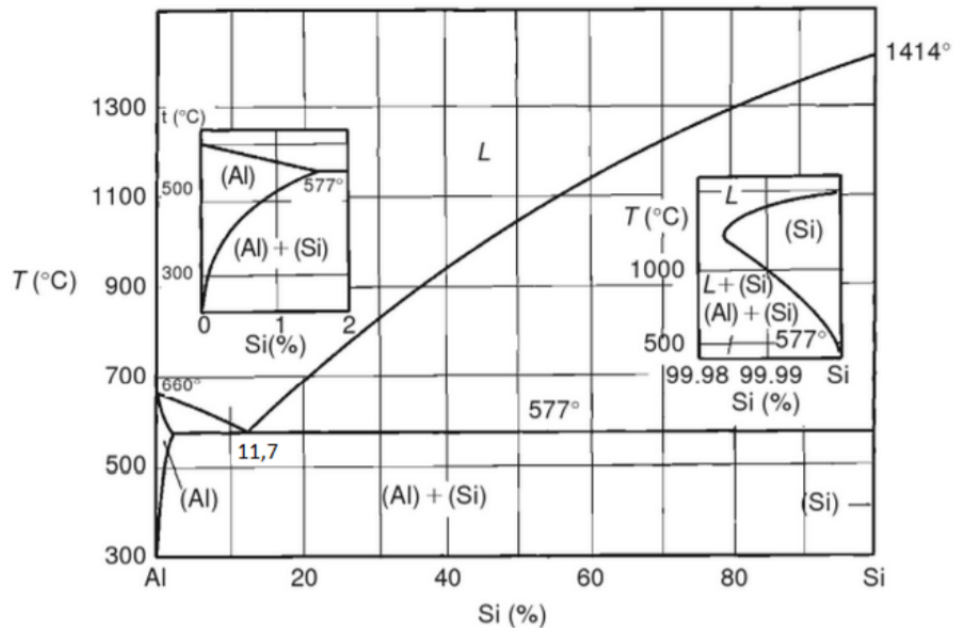
2.2.2. Al – Si legure

Silicij Al – Si legurama daje izuzetno dobru livljivost, otpornost prema nastanku toplih pukotina te poboljšava svojstva napajanja odljevka. Iako se mogu upotrebljavati kao čiste legure binarnog sastava (odlična livljivost i otpornost ka koroziji), zbog slabijih mehaničkih svojstava najčešće su legirane magnezijem, bakrom i željezom. Ove legure su najrasprostranjenije legure u skupini legura za lijevanje, posebno one sa 10% i 13% silicija.[9]

Na slikama 5 i 6 je prikazan binarni fazni dijagram Al – Si sa izgledom pripadajućih mikrostruktura.[4]



Slika 5. Fazni dijagram Al – Si sustava sa karakterističnim mikrostrukturama [4]



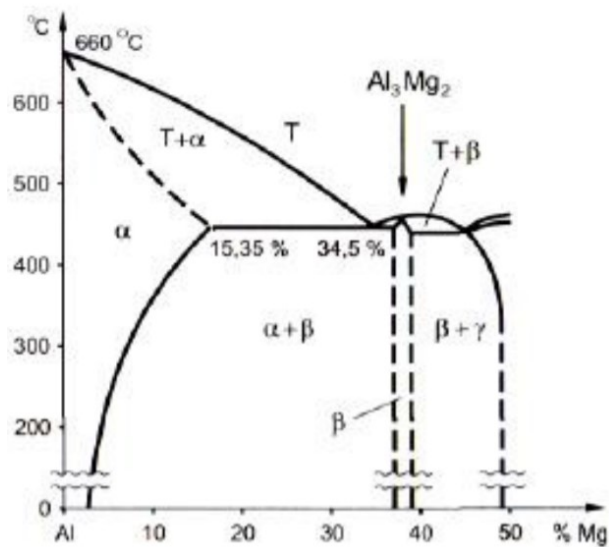
Slika 6. Binarni fazni dijagram Al – Si [4]

Sa slike 6 vidljivo je da se eutektik nalazi pri 11,7% silicija i temperaturi od 577°C. Pri toj temperaturi je u kristalima mješancima aluminijske (α) otopljeno 1,65% silicija, a pri temperaturi od 300 °C samo 0,07% silicija. Polužnim pravilom može se odrediti da sastav eutektika čini 90% kristala mješancina aluminijske, a ostatak je čisti silicij.[4]

2.2.3. Al – Mg legure

Glavna karakteristika navedenih legura je povećana čvrstoća i korozivna postojanost (i prema morskoj vodi). U odnosu na ostale legure aluminijske, odlikuje ih značajno slabija livljivost i sklonost poroznosti. Dobro se mogu zavarivati i često se koriste u arhitekturi te za dekorativne potrebe. Najbolja kombinacija žilavosti i čvrstoće se postiže sa 20% magnezija, no zbog slabe livljivosti se najviše koriste legure s udjelom magnezija od 3 – 5 %.[9]

Fazni dijagram Al – Mg legure (slika 7) ukazuje na stvaranje intermetalnog spoja Al_3Mg_2 (β) pri udjelu magnezija od 37,5%. Navedena faza je nepoželjna jer je vrlo tvrda (što je čini slabo oblikovljivu deformiranjem), a pri djelovanju korozivnog medija prva prelazi u otopinu zbog visokog udjela magnezija. Eutektička legura sadrži 34,5% magnezija i ima vrlo nisku temperaturu skrućivanja od 451 °C. Unatoč tome nisu upotrebljive kao ljevačke legure obzirom da eutektik sadrži gotovo 80% tvrde faze Al_3Mg_2 . [4]



Slika 7. Al – Mg binarni fazni dijagram [4]

3. LIJEVANJE

3.1. Povijest ljevarstva

Lijevanje metala je postupak oblikovanja metala poznat iz prapovijesti koji je obilježio različite civilizacije. Samo lijevanje metala uključuje „ulijevanje rastaljenog metala u šupljinu odgovarajućih dimenzija i oblika formiranu u kalupu i potom skraćivanje rastaljenog metala čime se dobiva komponenta željenog oblika u krutom obliku“.[11]

Ljudi su već u metalnom dobu izrađivali od predmete različitih metala za svakodnevnu upotrebu, oruđe i oružje. Ovisno o vrsti metala koju su koristili, metalno doba dijeli se na bakreno, brončano i željezno doba. Zanimljivo je da je najstariji odljevak u Hrvatskoj pronađen pokraj Samobora. Radi se o bakrenoj sjekiri kakve su se koristile u rudnicima bakra čak 4000. pr. Kr.[12]

Od samih početaka ljevarstva, ljudi su nailazili na probleme kvalitete samih odljevaka, koje su pokušavali ispraviti. Primjerice, bakreni odljevci su bili mjehuravi pa su se zatvoreni kalupi počeli koristiti oko 3000. pr. Kr. kada se počela upotrebljavati bronca. Otprilike tih godina u Mezopotamiji i Egiptu počinju se izrađivati mjehovi kako bi bio bolji protok zraka u pećima. Nadalje, oko 800. pr. Kr. u Kini se pak uvodi klipno upuhivanje zraka što dovodi do pojave prvih standarda proizvodnje. Iako su već u to vrijeme ljevarski postupci i odljevci bili kvalitetni, i dalje se radilo o individualnoj proizvodnji od strane majstora.[13]

Tvornička proizvodnja u ljevarstvo počinje se uvoditi tek u vrijeme industrijske revolucije u 19. stoljeću. Osnove mehanizacije ljevaonica realizirane su krajem 19. i početkom 20. stoljeća kada je načinjena suvremena peć za taljenje. U to vrijeme su u ljevaonicama vladali loši radni uvjeti – buka, visoka temperatura i prašina. S vremenom, polovicom 20. stoljeća, ljevarstvo se dalje razvijalo. Fokus proizvodnje se okrenuo i prema povećanju uravnoteženosti izmjera odljevaka i njihove kvalitete te prema boljim uvjetima rada pa dolazi do automatizacije ljevaonica. Primjerice, kada se elektronika razvila, počinju se koristiti električne indukcijske peći za taljenje. Krajem 20. stoljeća, ljevarstvo počinje zadovoljavati ekološke i proizvodne uvjete kao i druge proizvodne tehnologije.[13]

3.2. Postupak lijevanja

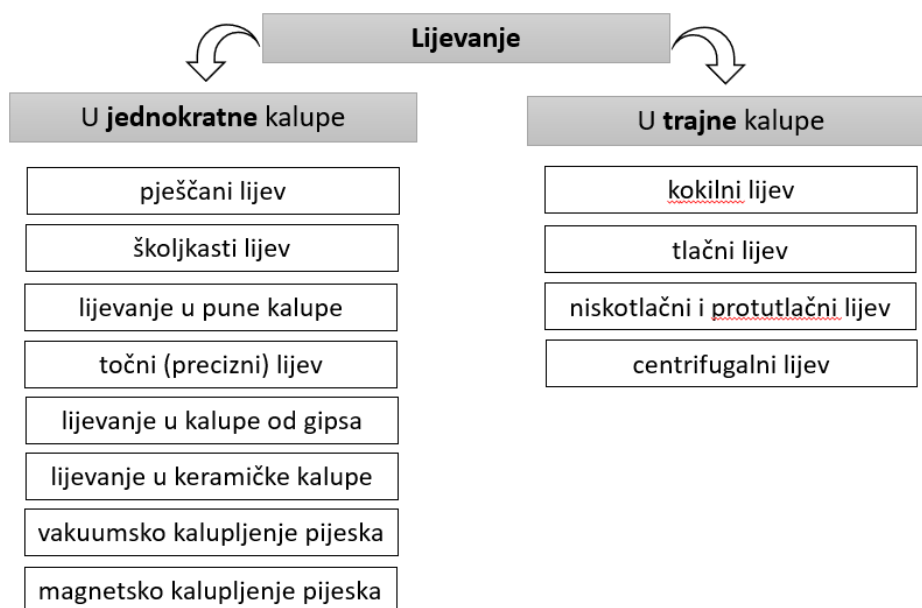
Općenito, ako je u proizvodnji odljevka dominira izrada kalupa, onda se radi o postupcima kalupljenja. S druge strane, ako u proizvodnji odljevka dominira proces lijevanja, onda se radi o postupcima lijevanja [9] koji su opisani u nastavku teksta.

Prvi korak u postupku lijevanja se odnosi na samu pripremu početnog materijala. Nakon toga se navedeni početni materijal dovodi u stanje u kojem ga možemo ljevati. Zatim se materijalom pune alati za lijevanje, u kojima dolazi do skrućivanja materijala. Kada je materijal postao oblikovani proizvod, vadi se iz alata za lijevanje.[9] Skraćeno, koraci u postupku lijevanja prikazani su na slici 8.



Slika 8. Koraci u postupku lijevanja metala [9]

Nadalje, prema uljevnoj sili, postupke lijevanja možemo podijeliti na one uz primjenu tlaka i na gravitacijsko lijevanje. Kod lijevanja uz primjenu tlaka, kalup se popunjava u kraćem vremenskom roku, dok se kod gravitacijskog lijevanja kalup popunjava pod utjecajem zemljine sile teže. Kalupi mogu biti za jednokratnu primjenu (*izgubljeni kalupi*) ili za višekratnu primjenu (*stalni, trajni kalupi*). Glavna razlika između njih je što se kod kalupa za jednokratnu primjenu za svaki novi odljevak mora izraditi i novi kalup, dok se kod kalupa za višekratnu primjenu isti kalup može upotrebljavati više puta za oblikovanje istog odljevka. Postupci lijevanja podijeljeni prema vrsti kalupa prikazani su na slici 9.[9]



Slika 9. Postupci lijevanja prema vrsti kalupa[9]

Što se tiče postupaka lijevanja aluminijskih slitina i njihovih slitina, oni se mogu lijevati na tri načina – u kokilu, tlačno i u pijesak.[1]

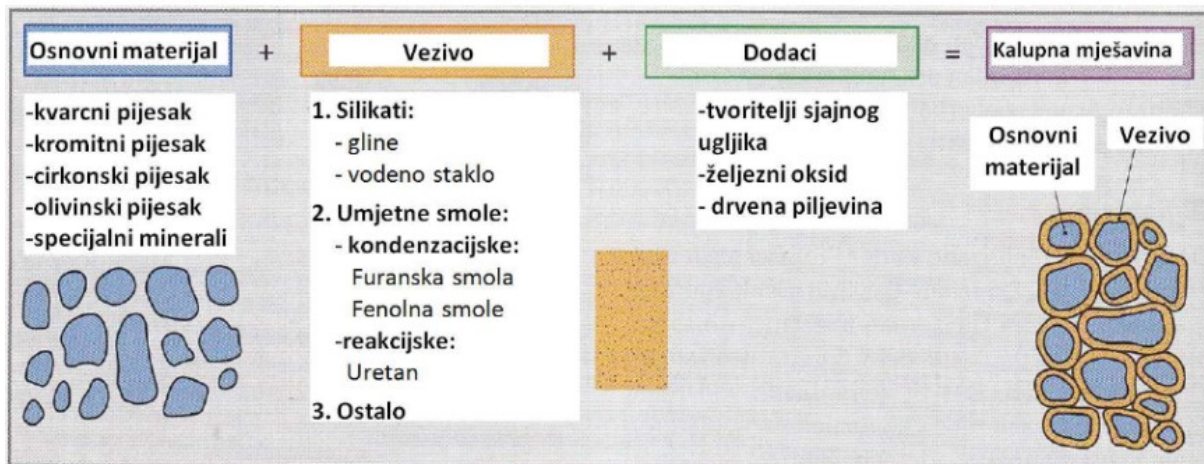
3.2.1. Lijevanje u pješčane kalupe

Jedan od najraširenijih načina lijevanja aluminijskih slitina je u pješčani kalup. Općenito, pijesak je materijal koji podnosi vrlo visoke temperature. Postoje različite vrste pijeska s obzirom na njihovu veličinu i oblik zrna [14]:

1. krupnije zrno – kod kojeg plinovi bolje prolaze tijekom ulijevanja
2. sitno zrno – kvalitetnija površina odljevka
3. nepravilan oblik – propusnost je manja, ali su kalupi čvršći

Postupak obuhvaća ulijevanje taline u pješčani kalup te se odljevak iz njega istresa kada dođe do skrućivanja taline. Zatim se odljevak pregledava i čisti te se naknadno toplinski obrađuje da bi se poboljšala njegova svojstva, ako je to potrebno.[14]

Kalupna mješavina sastoji se od osnovnog materijala, veziva, i dodataka (slika 10). [9]



Slika 10. Komponente kalupne mješavine [9]

Od prikazanih veziva, glina i vodeno staklo smatraju se najprikladnijima za zdravlje radnika, kao i ekološki najprimjerenijima.

Na slici 11 prikazane su neke prednosti kao i nedostaci lijevanja u ovakve kalupe.[1]

Prednosti	Nedostaci
✓ moguće odliti komade složenih oblika	✓ veliki komadi imaju grupe površine
✓ moguće odliti i male i vrlo velike komade	✓ teško izlijevanje tankih i dugih izbočina
✓ vrlo velika produktivnost (mehanizacijom i automatizacijom)	✓ česte greške u odljevcima nekih metala
✓ jeftin alat	✓ često nužna obrada komada odvajanjem strugotine
✓ od modela do komada izravan put	

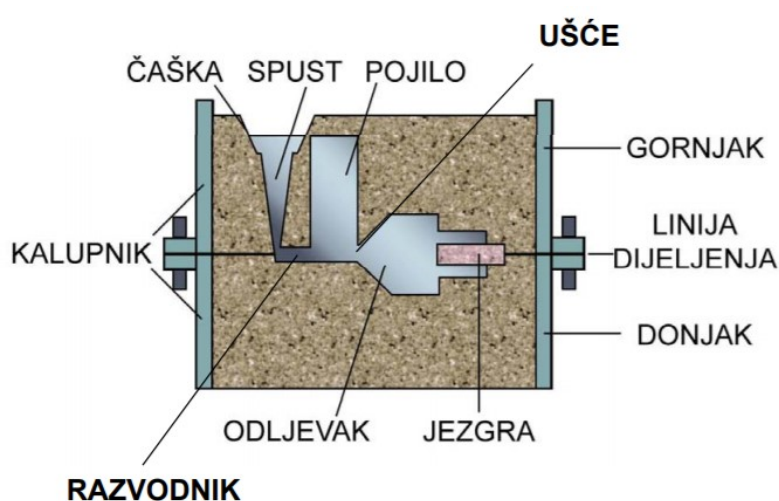
Slika 11. Prednosti i nedostaci pješčanih kalupa[9]

Općenito, pješčani kalupi moraju biti dovoljno čvrsti kako bi zadržali svoj oblik, ali i dovoljno krhki kako bi se izbjegli lomovi. Osim toga, moraju propuštati plinove i topli zrak kroz sloj pijeska, odnosno moraju imati veliku propusnost. Također, bitno je da ne dođe do pucanja kalupa prilikom ulijevanja taline pa pješčani kalup mora biti i dovoljno termički stabilan i pijesak bi se trebao moći ponovno upotrijebiti kako bi se smanjilo zagađivanje okoliša.

Postoje tri tipa kalupa, jedan od njih je vlažni kalup, koji sadrži i vodu tijekom ulijevanja taline te je izrađen od kombinacije gline, pijeska i vode.

Ova vrsta kalupa se na engleskom naziva „*Green sand*“ (*zeleni pijesak*) upravo zato jer sadrži vlagu tijekom ulijevanja. Druga vrsta kalupa jest površinski suhi kalup, kod kojeg se šupljina od vlažnog pijeska suši infracrvenom grijalicom ili acetilenskim plamenikom. Konačno, treća vrsta kalupa je suhi kalup koji umjesto gline sadrži organska veziva te se prije ulijevanja peče radi povećanja njegove čvrstoće.[1] [14]

Prikaz kalupa s pripadnim dijelovima prikazan je na slici 12. [14]

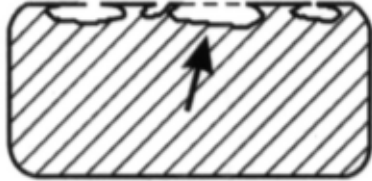
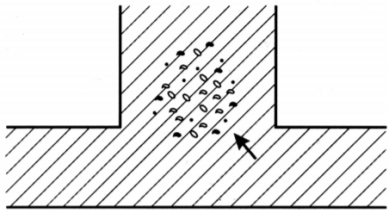
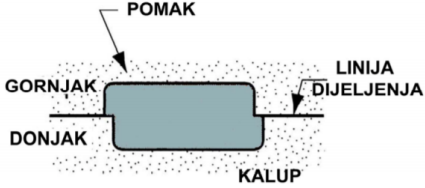
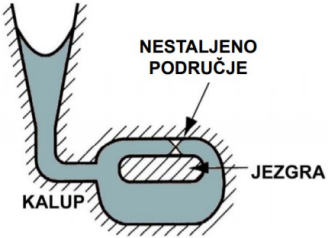
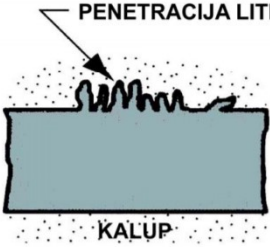


Slika 12. Kalup sa označenim komponentama[14]

Prilikom lijevanja postoji mogućnost formiranja pogrešaka u odljevku. Neke od karakterističnih pogrešaka prikazane su u pogrešaka prikazane su u tablici 1. [14][15]

Nesukladnost na odljevku može biti može imati i više razloga koji doprinose njenom pojavljivanju.

Tablica 1. Primjeri nekih pogrešaka na odljevku [14][15]

KARAKTERISTIČNE POGREŠKE		
VRSTA POGREŠKE	MOGUĆI UZROCI	PRIKAZ POGREŠKE
Površinska i subpovršinska mjehuravost	Mjehurići plina ne mogu napustiti kalup zbog premale propusnosti kalupa ili nedovoljnog otplinjavanja, te se zbog uzgona uzdižu prema gore	
Mikro i makro poroznost	Nedovoljno rasplinjavanje ili propusnost kalupa, sakupljanje materijala prilikom hlađenja	
Pomak	Pomak duž linije dijeljenja prilikom sklapanja kalupa, stepenasta pogreška na odljevku	
Nestaljeno područje	Zbog preranog skrućivanja dolazi do nepotpunog staljivanja metala	
Penetracija taline	Penetracija taline u pijesak jezgre ili kalupa, talina niske viskoznosti u kombinaciji sa mjestima slabo zbijenog pijeska	

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Na izlazu iz centrifugalne pumpe vatrogasnog kamiona često se nalazi tlačna grana kojoj je zadataka usmjeriti vodu na dva odvojena izlaza. Tlačna grana ne smije biti izrađena od materijala koji bi vodu učinio nepovoljnom za piće, a prije ugrađivanja u kamion podvrgava se tlačnoj probi. Prilikom provođenja tlačne probe vodom, pri tlaku od 5 bara primijećeno je mjestimično stvaranje nakupina kapljica na površini odljevka koje su s vremenom sve više rasle. Navedeni problem nije se pojavljivao na svakom odljevku, ali se nije radilo o izoliranom slučaju što je ukazivalo na ponavljajuću nesukladnost u proizvodnji odljevka.

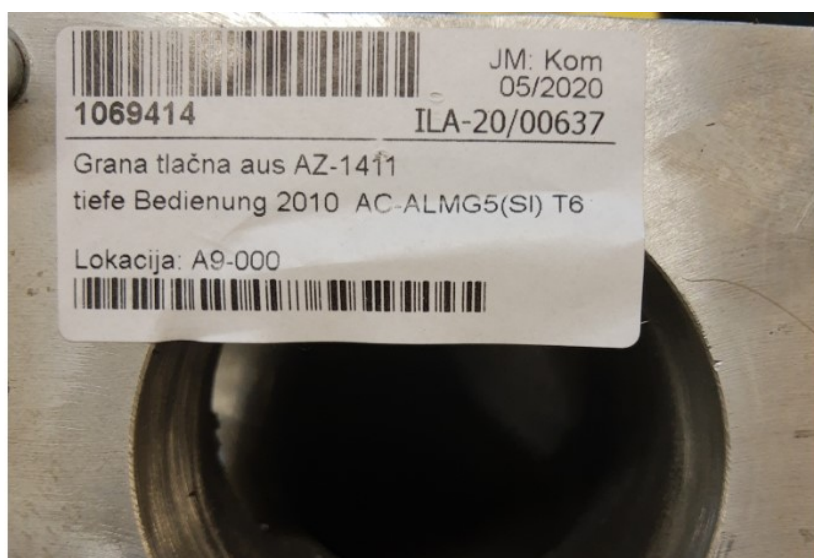
Provedena je sanacija odljevka pomoći polimerne mase za zapunjavanje pora i mikropukotina. Korištena je polimerna masa DIGHTOL WFT obzirom da se radi o kemijski i temperaturno stabilnoj tvari, kao i tvari koja ne zagađuje pitku vodu. Nakon impregnacije ponovno je provedena tlačna proba, međutim nakon nekog vremena dolazilo bi do istiskanja polimerne smjese kroz diskontinuitete na površini.

Provedeno je i saniranje navarivanjem kritičnih dijelova (slika 13) međutim voda je ponovno prolazila kroz materijal prilikom tlačne probe.



Slika 13. Pokušaj brtvljenja tlačne grane navarivanjem

Nad prethodno navedenim odljevkom provedena su ispitivanja u svrhu dobivanja uvida u stanje materijala na makrorazini, kao i njegovu mikrostrukturu i kemijski sastav. Također su sakupljene dostupne informacije o samoj tehnologiji proizvodnje u svrhu pronalaska mogućih manjkavosti u istoj. Na navedenoj tlačnoj grani navedena je deklaracija legure od koje je izrađena (slika 14).



Slika 14. Deklarirana legura odljevka

3.1. Ispitivanje metodom penetranta

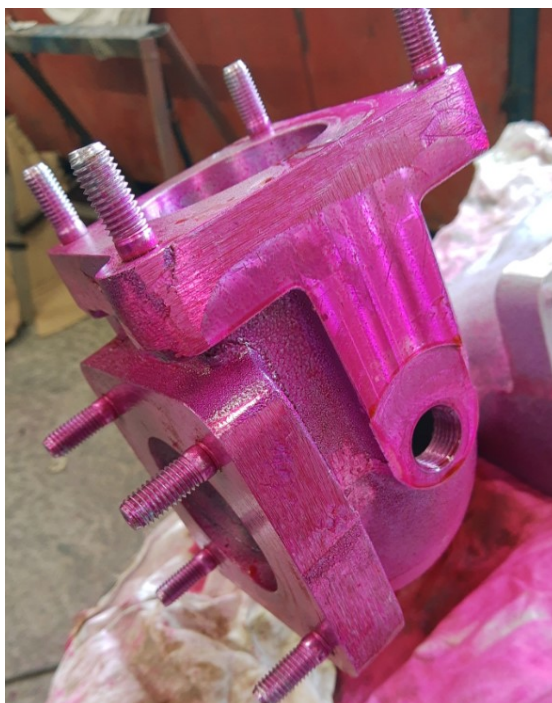
Ispitivanje penetrantskom metodom pripada skupini nerazornih ispitivanja koja za svrhu ima otkrivanje površinskih indikacija na nepravilnosti. Metoda je često korištena prilikom ispitivanja zavara, ali se često koristi i kod ispitivanja dosjeda i ostalih osjetljivih elemenata gdje su površinske pukotine strogo zabranjene. Ispitivanje penetrantima se sastoji se od više koraka:

- Čišćenje površine
- Nanošenje penetranta (crvena boja)
- Čekanje da penetrant prodre u površinske nepravilnosti
- Uklanjanje penetranta (vodom ili posebnim čistačem)
- Nanošenja razvijača (bijela boja)

Razvijač nakon nanošenja „izvlači“ zaostali penetrant, što se očituje crvenim indikacijama na bijeloj boji razvijača. Poželjno je promatrati način rasta indikacija, a prednost ove metode je što penetrant ostaje na razvijaču sve do uklanjanja, što je pogodno za slikanje i dužu analizu. Ispravno tumačenje rezultata ispitivanja ovisi o iskustvu ispitivača (potrebno je razlikovati lažne indikacije od pravih).

3.1.1. Ispitivanje tlačne grane penetrantskom metodom

Sukladno gore navedenom postupku, tlačna grana je prvotno podvrgnuta temeljitom čišćenju i odmašćivanju. Na površinu odljevka (koji je podijeljen na segmente) je potom nanesen penetrant (slika 15) koji je uklonjen nakon 30 minuta. Nakon toga je nanesen razvijač te je promatran rast indikacija. Korištena oprema proizvođača „MR CHEMIE“ (Njemačka) za provedbu metode prikazana je na slici 16, a ustupljena je od strane tvrtke PONDIT d.o.o.



Slika 15. Segment odljevka sa nanesenim penetrantom

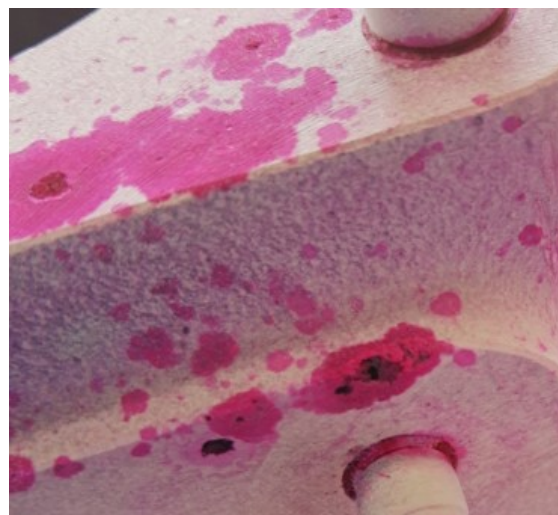


Slika 16. Oprema korištenja pri ispitivanju penetrantom

Nakon nanošenja razvijača, na površini su pronađene brojne površinske indikacije na pore, od kojih su neke bile vidljive golim okom i prije nanošenja penetranta. Pronađene površinske indikacije prikazane su na slikama 17 – 23.



Slika 17. Pore na površini odljevka



Slika 18. Pore nazubljenog oblika na brušenoj površini odljevka



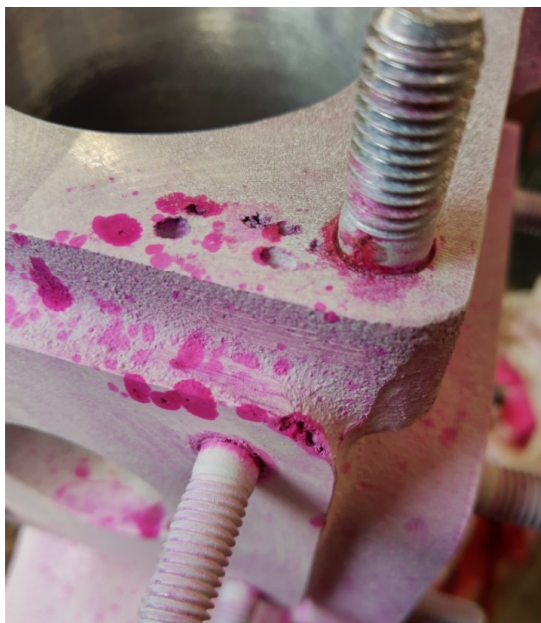
Slika 19. Nestaljen materijal na prijelazu stijenci



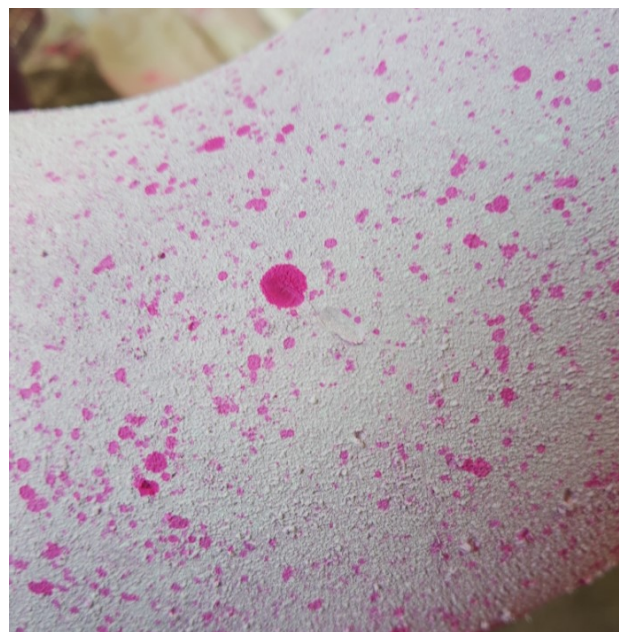
Slika 20. Pore na vanjskoj stijenci



Slika 21. Pore na obrađenom dijelu



Slika 22. Gnijezdo pora na obradenoj površini



Slika 23. Sitne pore raširene po površini stijenke

Iz priloženog je vidljivo da se radi o izrazito poroznoj površini, brojnim prisutnim nepravilnostima, mjestimično sa promjerom i od nekoliko milimetara.

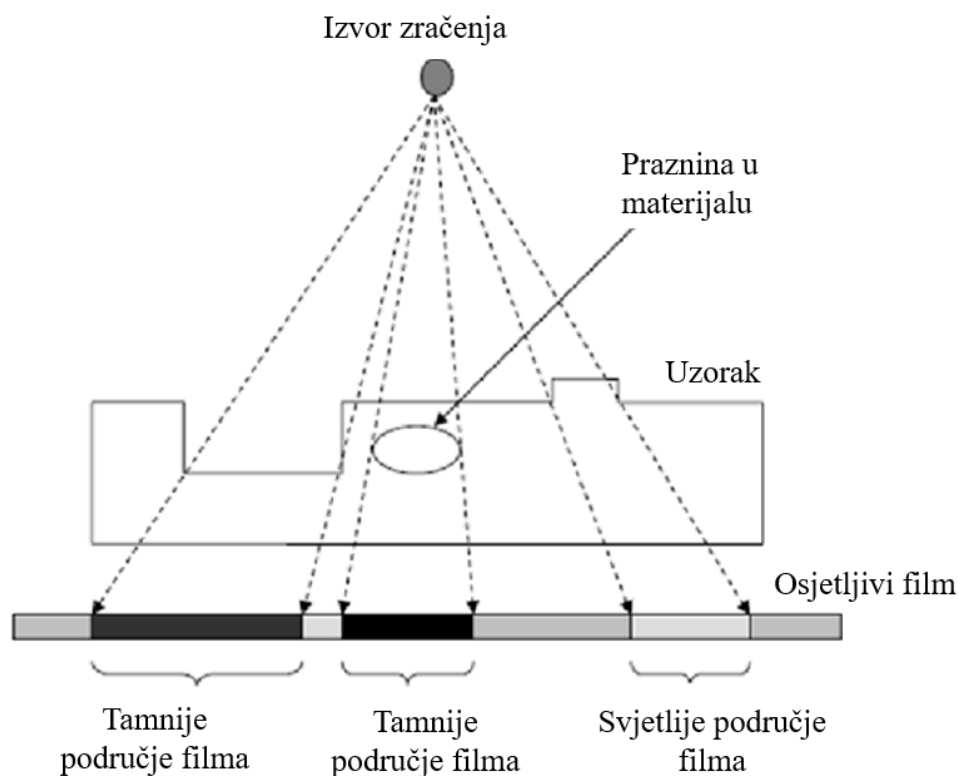
Prethodno opisana penetrantska metoda je isključivo površinska metoda, prikladna za otkrivanje površinskih indikacija. Iz nje je teško ocijeniti dubinu neke pore ili pukotine.

Alternativno, ispitivanje je moguće provesti tako da se izvana nanese penetrant, a iznutra razvijatelj, što bi pokazalo diskontinuitet kroz cijelu stijenku dijela. Međutim, obzirom da odljevak ipak počne propuštati nakon duljeg vremena i to tek pri tlaku od 5 bara, odlučeno je da se postupak provede na gore provedeni način.

3.2. Radiografsko ispitivanje

Nakon što su na površini uočene brojne pore penetrantskom metodom (a neke vidljive i golim okom), bilo je potrebno provesti neku od volumetrijskih metoda u svrhu dobivanja uvida u unutrašnjost materijala. Jedna od volumetrijskih metoda je i radiografija. Radi se o čestoj metodi u nerazornim ispitivanjima, čiji principi su objašnjeni u nastavku.

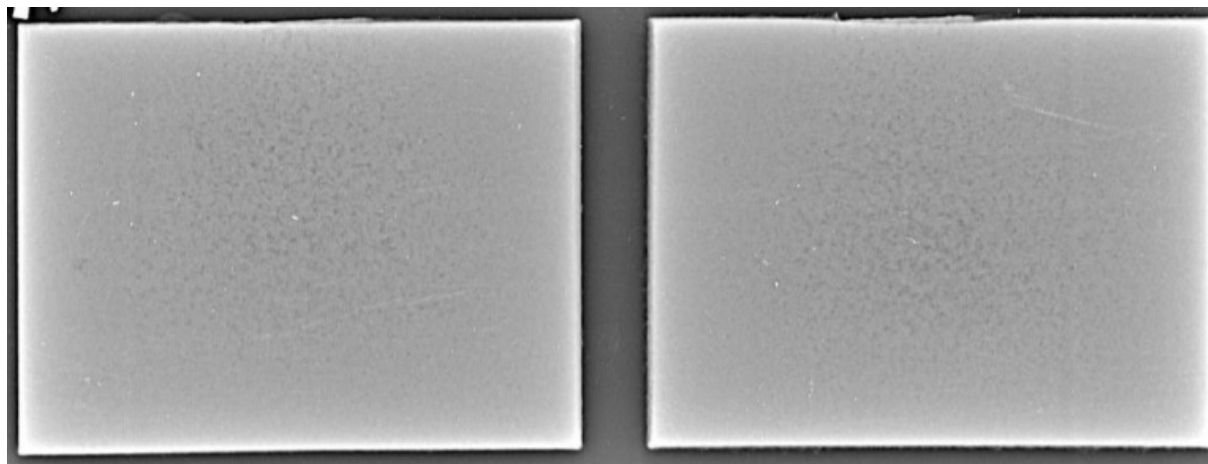
Suštinski, ne postoji razlika između industrijske radiografije i medicinskog rendgena. Metoda se temelji na visokoenergetskim fotonima koji prolaskom kroz materijal nailaze na različite nehomogenosti u materijalu, međudjeluju sa njima dajući pritom određene informacije o stanju u unutrašnjosti materijala. Izvor visoko energetskih fotona može biti rendgenski uređaj (takvi fotoni nazivaju se rendgenskim zrakama) ili izotop (radioaktivni element koji svojim raspadom emitira fotone koje nazivamo gama zrakama). Ispitni uzorak se nalazi između izvora zračenja i detektora (obično film ili ploče-detektori za višekratnu uporabu). Ovisno o mogućim nepravilnostima u materijalu kao i obliku i dimenzijama materijala, na detektoru će doći do pojave oblika i područja različite svjetline (slika 24).



Slika 24. Princip rada radiografskog ispitivanja [16]

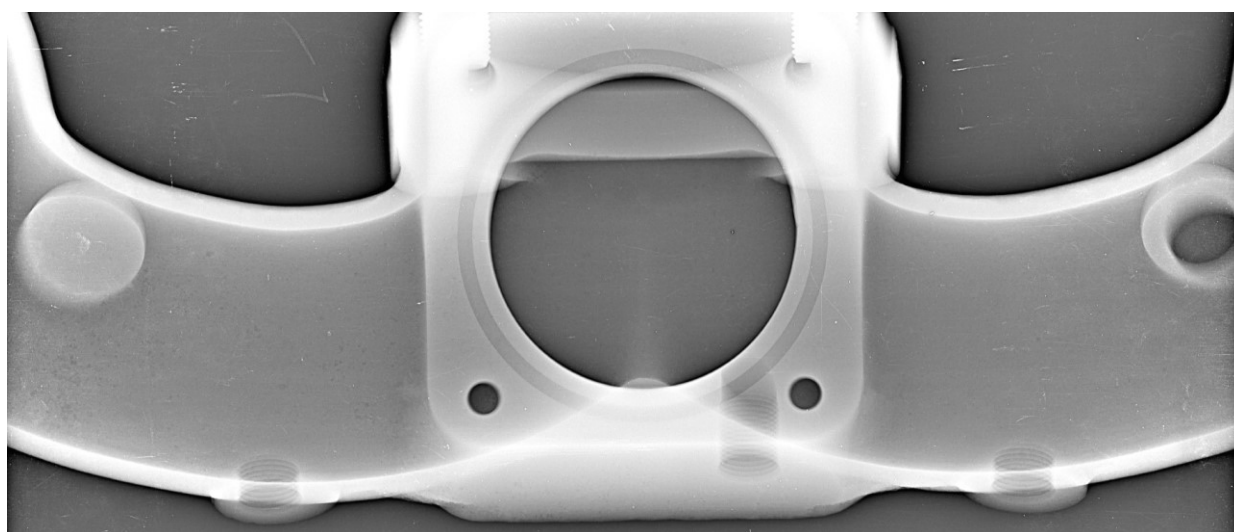
Iz slike je vidljivo da ako kao detektor koristimo primjerice film, mjesta gdje je film manje ozračen (veća debljina materijala, veća gustoća ili materijal bez uključina) su svjetlija, dok su mjesta gdje je materijal tanji ili sadrži šupljine vidljiva kao tamnija područja filma.

Primjer poroznosti u odljevku uočene radiografijom vidljiv je na slici 25.[17]



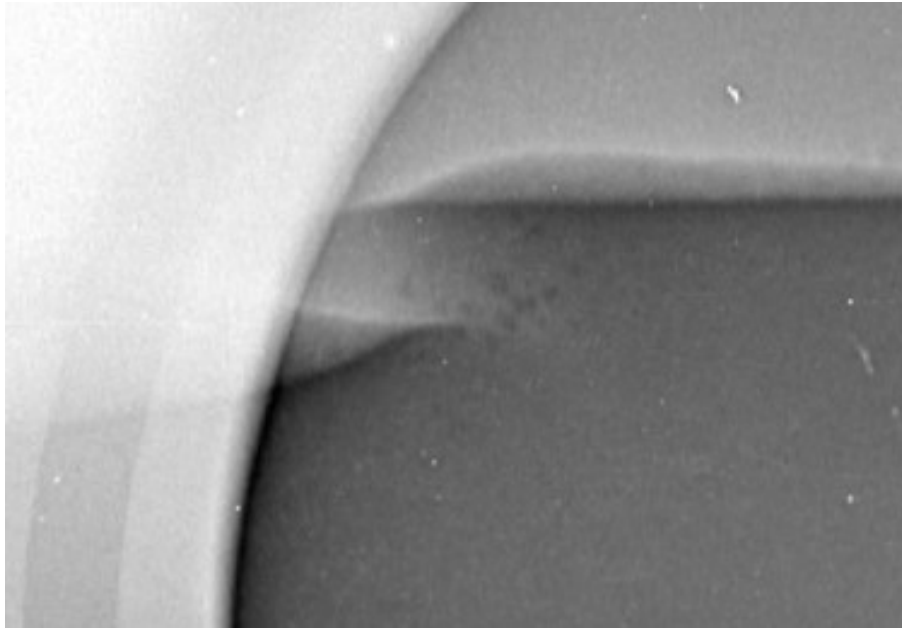
Slika 25. Primjer poroznosti u odljevku otkrivene radiografijom- sitnija poroznost očituje se u vidu tamnijih pjegica [17]

Radiografsko ispitivanje na aluminijskoj tlačnoj grani provedeno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja, pri čemu se koristio RTG uređaj belgijske proizvodnje Balteau 300D (maksimalne snage 300 kV i jakosti struje 3-5 mA). Dobiveni radiogram prikazan je na slici 26.

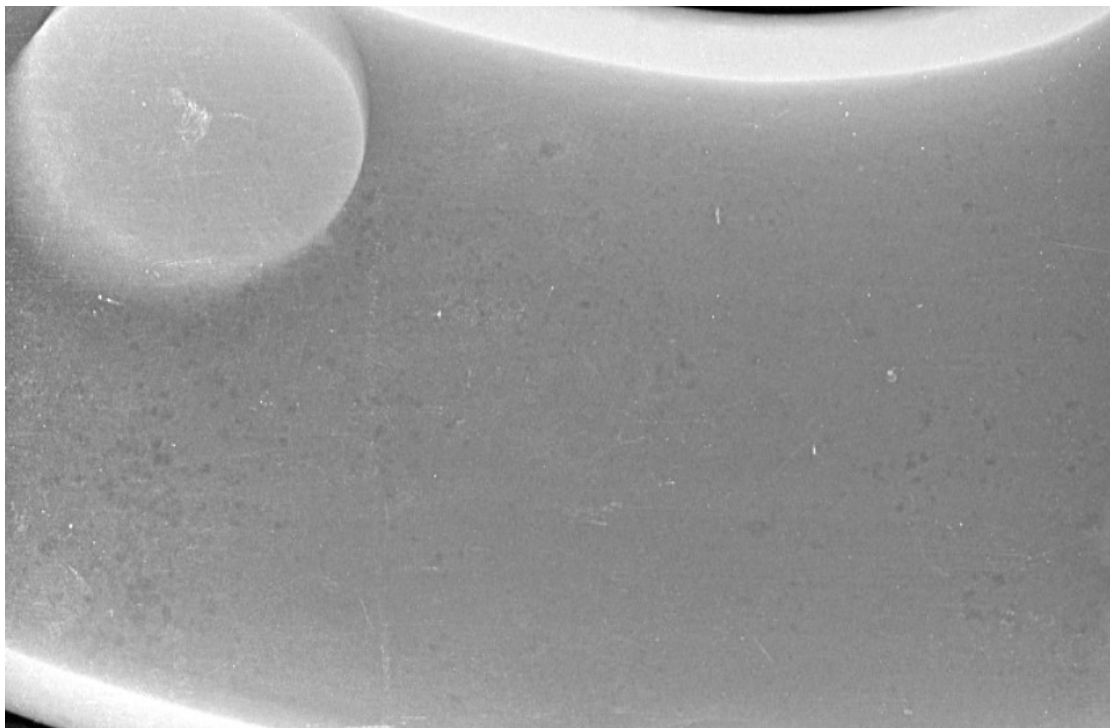


Slika 26. Radiogram tlačne grane

Na radiogramu je vidljiva prisutnost poroznosti u značajnoj mjeri. Detalji su prikazani na slikama 27 i 28.



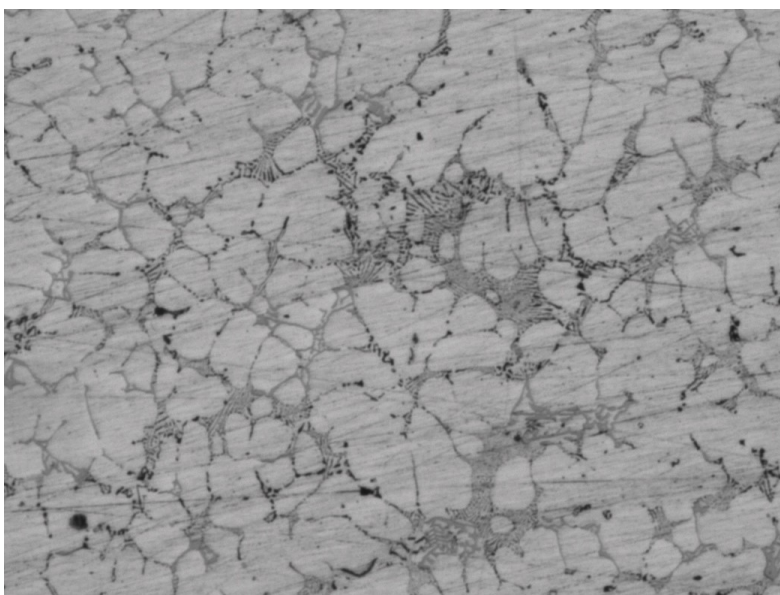
Slika 27. Gnijezdo pora na unutrašnjoj strani odljevka



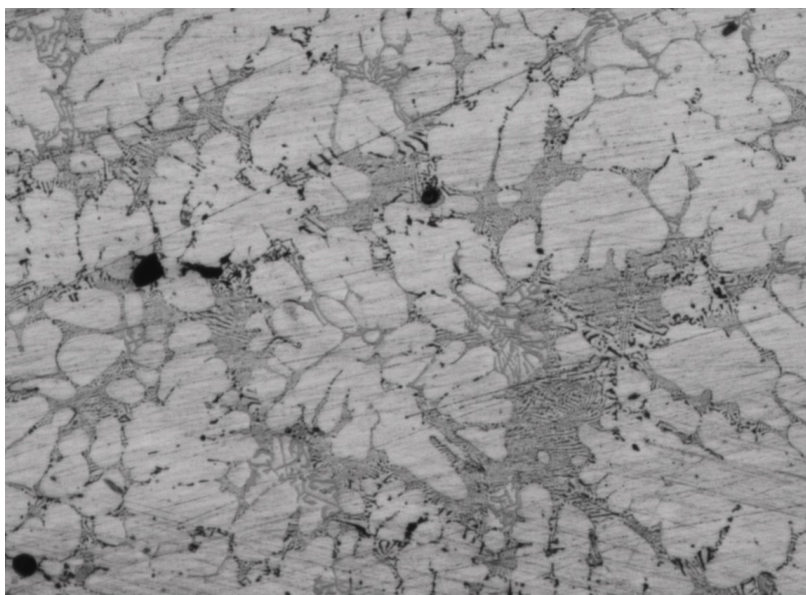
Slika 28. Uvećani prikaz pora u tanjim stijenkama

3.3. Metalografsko ispitivanje

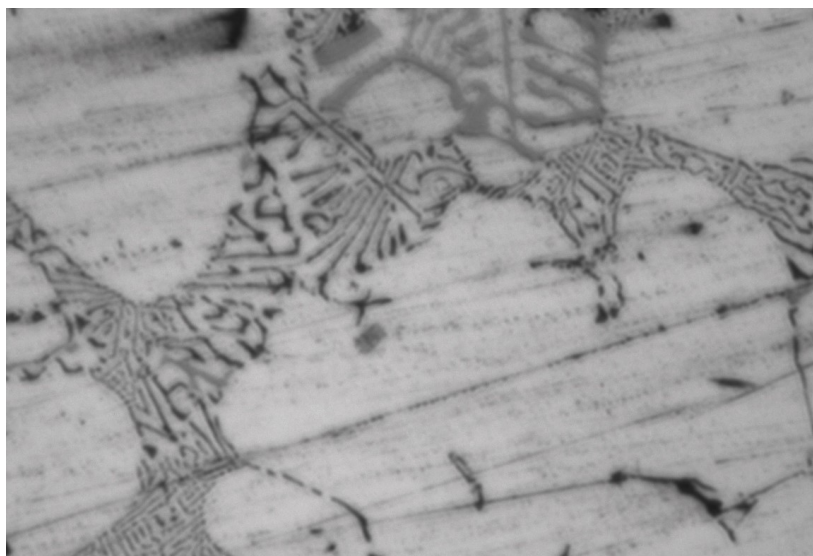
Iz tlačne grane izrezan je uzorak, te je podvrgnut metalografskoj analizi. Uzorak je brušen (brusnim papirima 600 i 1200) i poliran dijamantnom pastom na uređaju MetaServ 250, proizvođača Buehler (SAD), te je promatran pod povećanjem 100x i 500x na mikroskopu Structure Expert proizvođača danske tvrtke Struers. Ispitivanje je provedeno u laboratoriju tvrtke MIV u Varaždinu. Na slikama 29-31 je prikazana dobivena mikrostruktura.



Slika 29. Mikrostruktura u poliranom stanju, 100x



Slika 30. Mikrostruktura uzorka, polirano, 100x

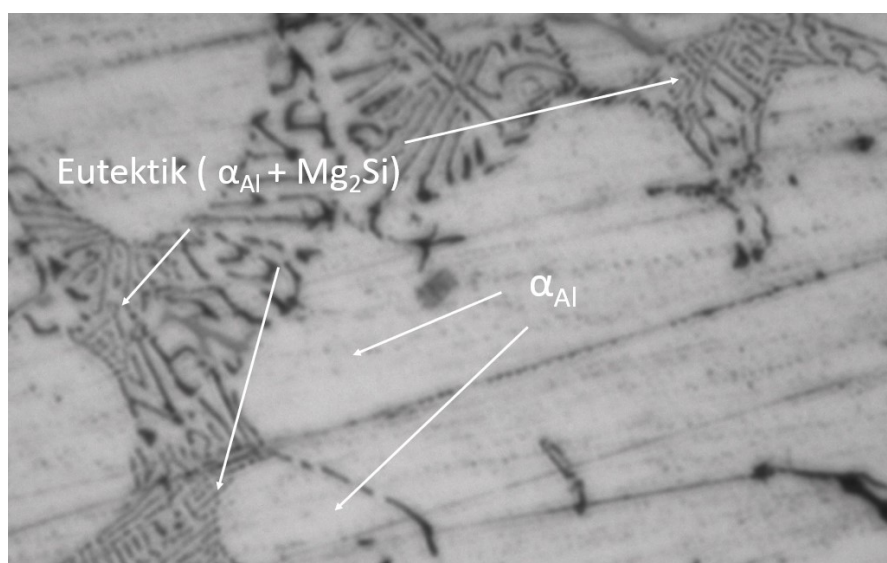


Slika 31. Mikrostruktura uzorka, polirano, 500x

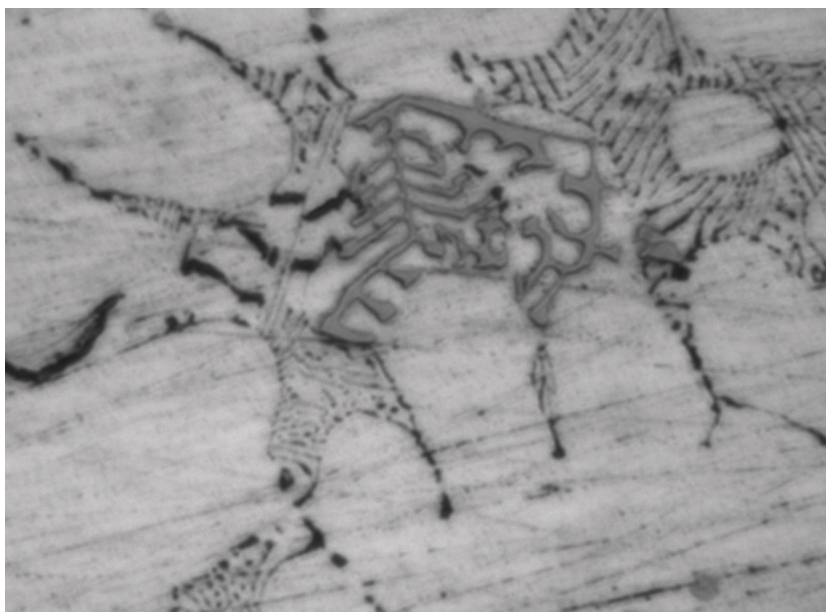
Izgled mikrostrukture ukazuje da bi se moglo raditi o Al – Mg leguri. Istaknute faze ove mikrostrukture su obično lamelarni eutektik ($\alpha\text{Al} + \text{Mg}_2\text{Si}$ i/ili ostali spojevi) te αAl . [8]

Na slikama 32 i 33 su označene pretpostavljene istaknute faze mikrostrukture u usporedbi s literaturom. [8] Za točnu identifikaciju označenih faza potrebno je provesti dodatna ispitivanja.

Po cijeloj površni uzorka prisutne su poroznosti, pri čemu su neke vidljive i golim okom.



Slika 32. Pretpostavljene glavne mikrostrukturne faze



Slika 33. Mikrostruktura „kinesko pismo“ koja se može naći u aluminijskim legurama

3.4. Određivanje kemijskog sastav legure

Na odljevku je provedeno ispitivanje kemijskog sastava ručnim X-200 XRF uređajem za analizu proizvođača SciAps (SAD) (slika 34.).[18] Uređaj je ustupila tvrtka „Kontroltest International“.



Slika 34. XRF x-200, ručni uređaj za ispitivanje kemijskog sastava [18]

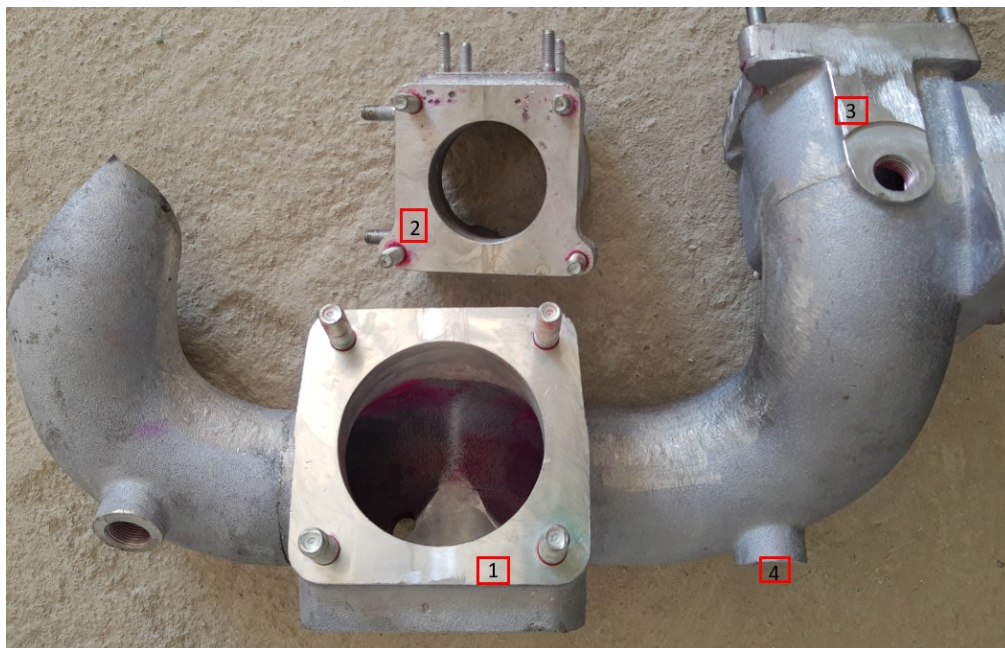
XRF uređaj radi na principu fluorescencije x zraka. Radi se o procesu prilikom kojeg x-zraka dovoljno visoke energije izbija elektron iz njegove pozicije u atomu. Kada X-zraka nađe na elektron u atomu, ukoliko posjeduje energiju višu od energije vezanja elektrona ona će izbiti i na tom mjestu u elektronskoj ljuski ostat će praznina koja čini atom nestabilnim. Elektron iz više ljuske će potom popuniti navedenu prazninu uz emitiranje fotona (da bi se riješio viška energije). Iznosi energija emitiranog zračenja karakteristični su za svaki element što omogućuje njihovu identifikaciju.[19]

Prije samog ispitivanja uređaj provodi kalibraciju, a potom se uređaj prislanja na dvije testne pločice (slika 35). Radi se legurama bliskog kemijskog sastava, i za nastavak ispitivanja je nužno da ih XRF uređaj raspozna kao dvije različite legure.



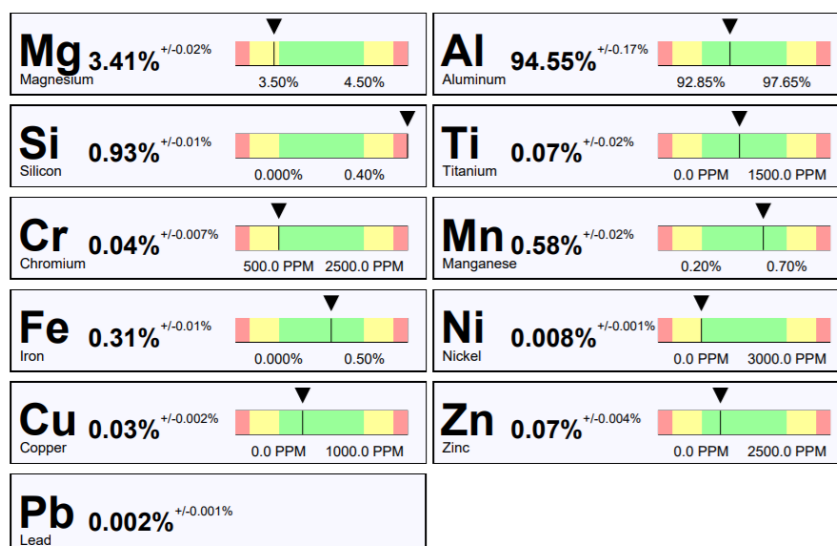
Slika 35. Testne pločice legura bliskog kemijskog sastava

Ispitivanje se vrši na način da se uređaj prisloni na površinu materijala, i drži dok se ne začuje zvučni signal. Vrijeme jednog ispitivanja trajalo je nešto duže od 40 sekundi (odabrana je opcija preciznijeg očitavanja, što produžuje trajanje ispitivanja.). Na tlačnoj grani određene su 4 ispitne točke (slika 36) koje su testirane XRF uređajem.

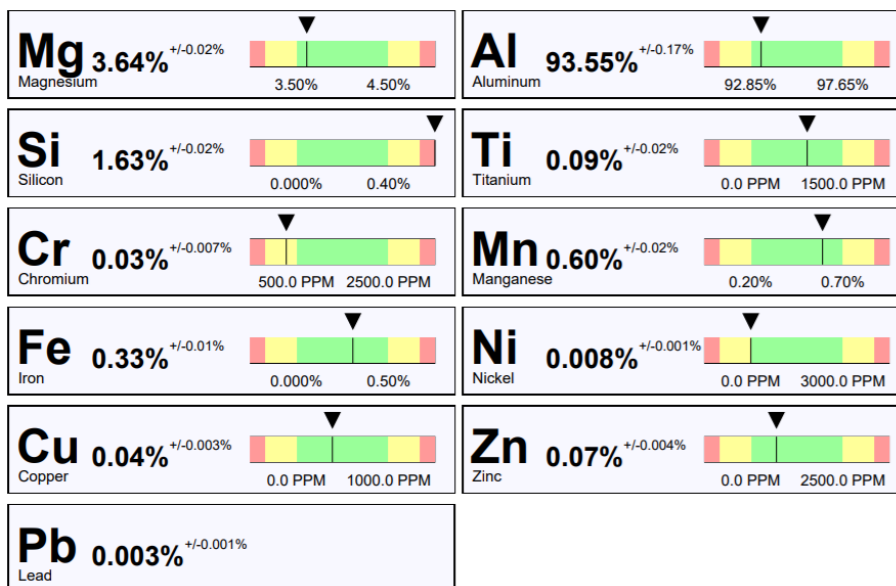


Slika 36. Označena područja za ispitivanje kemijskog sastava

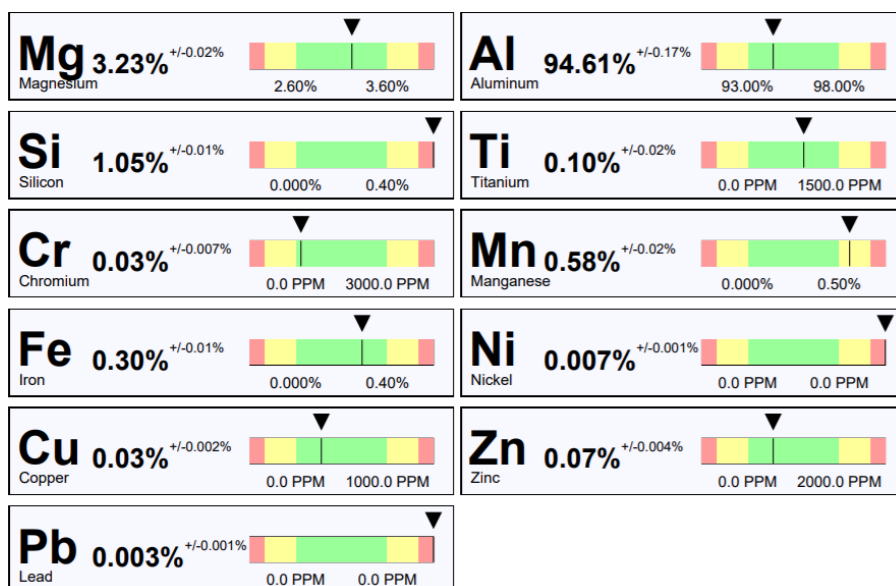
Dobiveni rezultati XRF kemijske analize prikazani su na slikama 37-40.



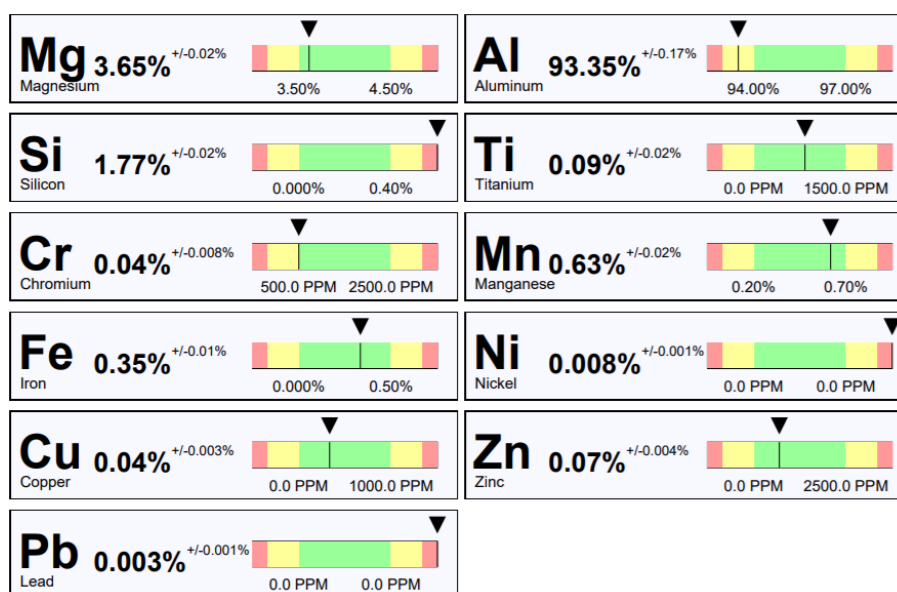
Slika 37. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava na mjernom području 1



Slika 38. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava na mjerenoj području 2



Slika 39. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava na mjerenoj području 3



Slika 40. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava na mjerenom području 4

Rezultati dobiveni XRF analizom uspoređeni su sa očekivanim kemijskim sastavom i prikazani su u tablicama od 2 – 5 (crvenom bojom označeni su elementi koji značajnije odudaraju od propisanog kemijskog sastava deklarirane legure). Vidljivo je da su uz karakteristične elemente prisutni i neki elementi u tragovima (primjerice olovo ili nikal), ali da ima i nezanemariv udio kroma.

Tablica 2. Usporedba kemijskog sastava područje 1

Mjereno područje 1			
Kemijski element	Udio, %	+ / - , %	Specificirano (AlMg5(Si)), %
Al	94,55	0,17	Ostatak
Mg	3,41	0,02	4,5 – 6,5
Si	0,93	0,01	do 1,5
Fe	0,31	0,01	Do 0,55
Cu	0,03	0,002	Do 0,05
Ti	0,07	0,02	Do 0,2
Mn	0,58	0,02	Do 0,45
Zn	0,07	0,004	Do 0,1
Preostali elementi			Ukupno 0,15

Tablica 3. Usporedba kemijskog sastava, područje 2

Mjereno područje 2			
Kemijski element	Udio, %	+ / - , %	Specificirano (AlMg5(Si)), %
Al	93,55	0,17	Ostatak
Mg	3,64	0,02	4,5 – 6,5
Si	1,63	0,02	do 1,5
Fe	0,33	0,01	Do 0,55
Cu	0,04	0,003	Do 0,05
Ti	0,09	0,02	Do 0,2
Mn	0,60	0,02	Do 0,45
Zn	0,07	0,004	Do 0,1
Preostali elementi			Ukupno 0,15

Tablica 4. Usporedba kemijskog sastava, područje 3

Mjereno područje 3			
Kemijski element	Udio, %	+/- , %	Specificirano (AlMg5(Si)), %
Al	94,61	0,17	Ostatak
Mg	3,23	0,02	4,5 – 6,5
Si	1,05	0,01	do 1,5
Fe	0,30	0,01	Do 0,55
Cu	0,03	0,002	Do 0,05
Ti	0,10	0,02	Do 0,2
Mn	0,58	0,02	Do 0,45
Zn	0,07	0,0004	Do 0,1
Preostali elementi			Ukupno 0,15

Tablica 5. Usporedba kemijskog sastava, područje 4

Mjereno područje 4			
Kemijski element	Udio, %	+/- , %	Specificirano (AlMg5(Si)), %
Al	93,35	0,17	Ostatak
Mg	3,65	0,02	4,5 – 6,5
Si	1,77	0,02	do 1,5
Fe	0,35	0,01	Do 0,55
Cu	0,04	0,003	Do 0,05
Ti	0,09	0,02	Do 0,2
Mn	0,63	0,02	Do 0,45
Zn	0,07	0,0004	Do 0,1
Preostali elementi			Ukupno 0,15

Uređaj ni na jednom mjerenom području nije prepoznao leguru navedenu na deklaraciji.

3.5. GDS analiza kemijskog sastava

U Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje napravljena je kvantitativna kemijska analiza dostavljenog uzorka. Korištena je metoda optička emisijska spektrometrija s tinjajućim izbojem, na optičkom emisijskom spektrometru GDS 850 A, američkog proizvođača LECO .

Rezultati analize prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Rezultati analize GDS-om

Oznaka uzorka	%								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
-	1,11	0,30	0,03	0,53	3,56	0,07	0,09	0,03	ostatak

3.6. Mjerenje tvrdoće

Na naznačenim područjima tlačne grane (slika 41) provedena su mjerenja tvrdoće ručnim prijenosnim tvrdomjerom njemačke proizvodnje Krautkramer MIC-10, s opterećenjem na indentoru od 5 kg. Mjerenje je provedeno u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Dobiveni rezultati vidljivi su u tablici 7.



Slika 41. Područja mjerenja tvrdoće

Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće uzorka

broj mjerenja	Segment A, HV5	Segment B, HV5	Segment C, HV5
1	67	68	72
2	67	79	76
3	69	78	81
4	73	72	85
5	67	75	76
6	68	75	73
7	69	71	71
8	70	76	71
9	76	79	76
10	74	68	77
Srednja vrijednost	70	74	76

Dobiveni rezultati su uz manja odstupanja u skladu sa tvrdoćom toplinski neobrađenih aluminijskih legura opisanom u literaturi. [20]

4. PARAMETRI TEHNOLOGIJE IZRADE

Legura propisana za izradu ove legure smatra se pogodnom za pješčani lijev, stoga je ta tehnologija i korištena prilikom izrade odljevka. Odabir pješčanog lijeva je u skladu sa veličinom serije proizvoda i ekonomičnošću tehnologije.

4.1. Deklarirana legura odljevka

Legura propisana za izradu ovog odljevka je ENAC-51400. Alternativni nazivi legure i njezin sastav dan je u tablici 8.[21]

Tablica 8. kemijski sastav ENAC - 51400 legure / % [21]

Fe	Si	Mn	Ti	Cu	Mg	Zn	ostalo	Ostatak
< 0,55	< 1,5	< 0,45	< 0,2	< 0,05	4,6 – 6,5	< 0,1	0,15	Al

Zahtijevani kemijski sastav legure ljevaonica sama ispunjava. Od lokalnih dobavljača kupuje se čisti aluminijski lim koji se potom legira manganom, silicijem i magnezijem. Navedena smjesa se rafinira sa AlTi5B1 (slika 42).



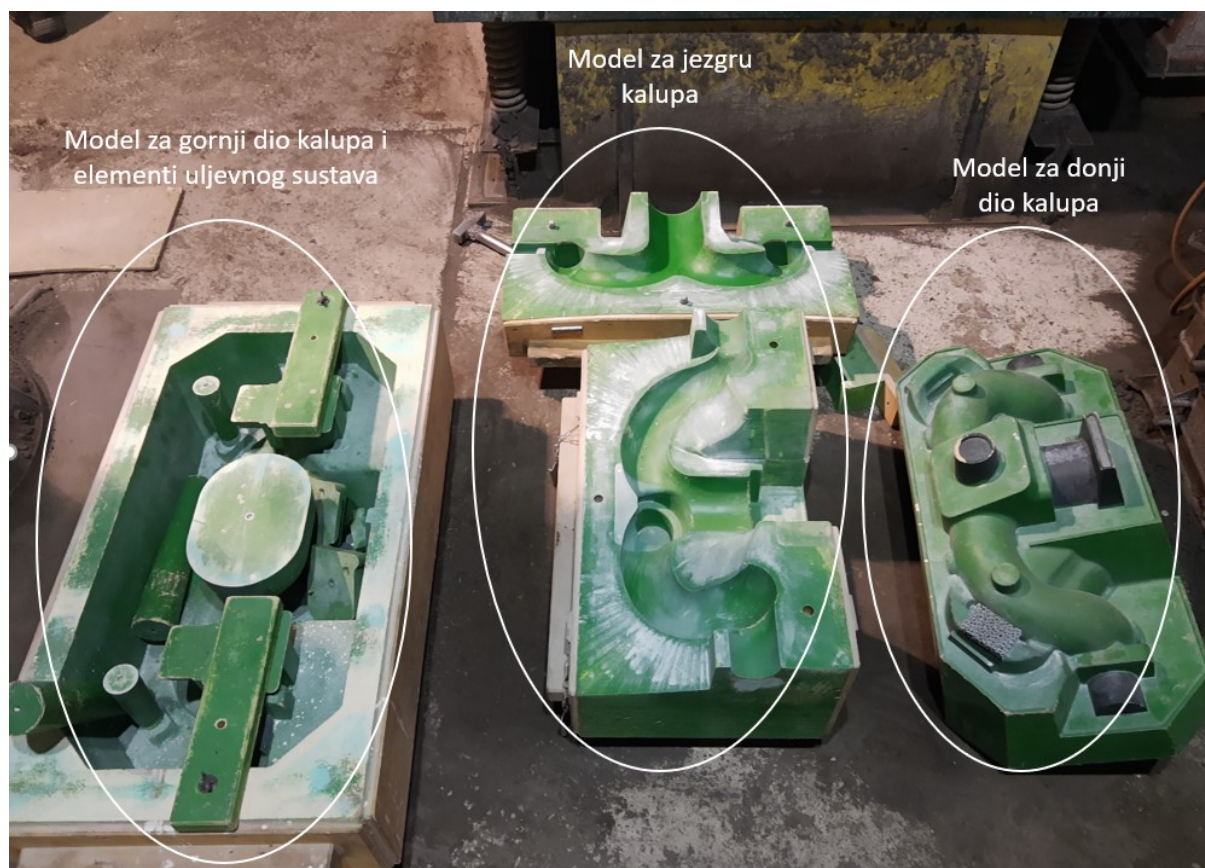
Slika 42. Štap AlTi5B1 korišten za rafiniranje

Vjeruje se da AlTi5B1 u talini uzrokuje stvaranje Al_3Ti čestica, koje djeluju kao klice za formiranje kristalnih zrna .[8]

Sastav navedene legure se provjerava sa kvantometrom.

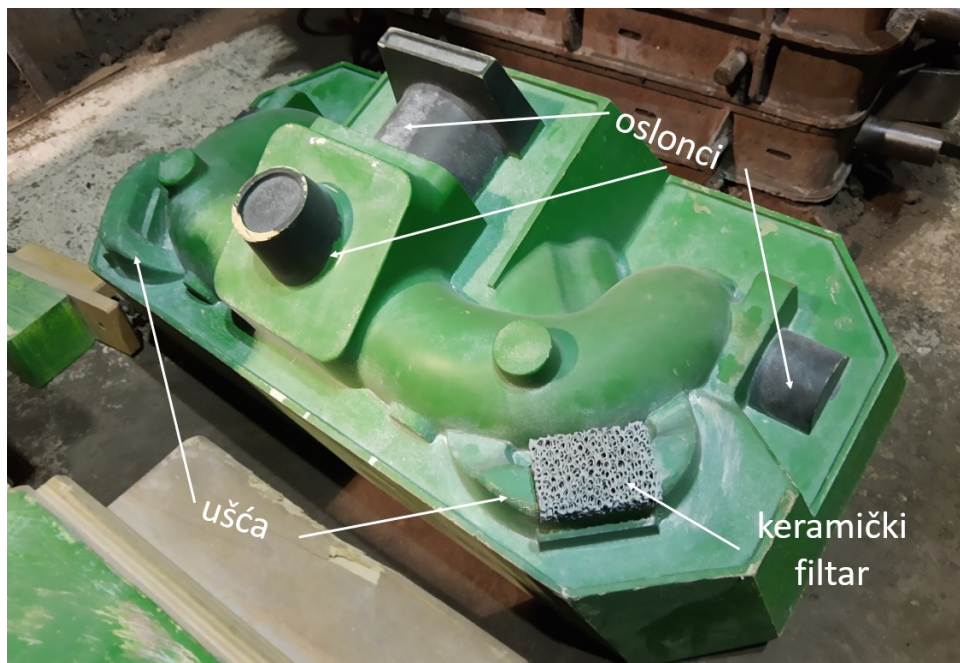
4.2. Uljevni sustav i kalup

Prilikom obilaska pogona, zabilježene su specifičnosti ljevačkog postupka. U vrijeme obilaska ljevaonice nisu postojali izrađeni kalupi, ali su na uvid pruženi modeli za izradu kalupa i uljavnog sustava. Navedeni modeli prikazani su na slici 43.



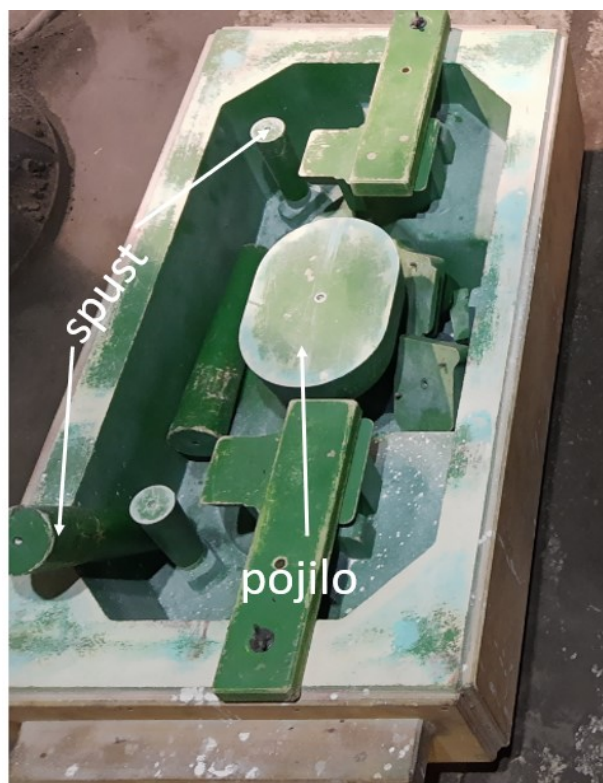
Slika 43. Modeli za izradu kalupa

Model za donji dio kalupa, поближе je prikazan na slici 44.



Slika 44. Prikaz modela donjeg dijela kalupa sa naznačenim elementima

Model za gornji dio kalupa i za uljevni sustav prikazan je na slici 45.



Slika 45. Model za gornji dio kalupa, pojilo i spust

Širi promjer spusta je 65 mm, a uži 35 mm. Visina spusta iznosi 450 mm.

Donji dio kalupa izrađen je od pijeska i vode, sa bentonitom kao vezivom, a gornji dio i jezgra se izrađuju CO₂ postupkom pri čemu se SiO₂ i vezivo pomiješaju i propuhuju sa CO₂ što uzrokuje očvršćivanje kalupa.

Od peći do kalupa rastaljena legura se prenosi i lijeva ručno. Nakon ulijevanja na vrh se dodaje egzotermni prah koji sprječava prebrzo skrućivanje taline na mjestu ulijevanja.

5. ANALIZA REZULTATA I PREPORUKE ZA POBOLJŠANJE KAKVOĆE ODLJEVKA

Obzirom na kemijski sastav legure i uočene nesukladnosti, preporučljivo je uvesti određene promjene koje bi mogle dovesti do bolje kvalitete odljevka. Dio preporuka odnosi se na samu sirovinu, a ostatak na tehnologiju lijevanja.

5.1. Preporuke vezane za leguru

Obzirom da ispitivanja kemijskog sastava ne zadovoljavaju propisane udjele elemenata, umjesto miješanja legure u ljevaonici preporuča se uzimanje gotovih blokova legura od pouzdanih dobavljača. Al-Mg-Si legure su općenito sklone poroznosti, a dodatne nesukladnosti u kemijskom sastavu višestruko uvećavaju ovu sklonost.

Nadalje, prilikom rafiniranja legure sa AlTi5B1, potrebno je obratiti pažnju na vrijeme stajanja legure. AlTi5B1 talini daje čestice koje služe kao klice nukleacije što za posljedicu ima smanjenje zrna. Dužim stajanjem mješavine, dolazi do pada broja potencijalnih klica za rast zrna u talini, što se obično pripisuje padu čestica nukleacije na dno uslijed gravitacije. Miješanjem taline ponovno raste broj klica nukleacije i njihova raspršenost, stoga je talinu potrebno redovito i temeljito miješati. Svakim daljnjim pretaljivanjem AlTi5B1 rafiniranih legura pada broj TiB₂ čestica za rafiniranje zrna, a uz to je opaženo i da preostale TiB₂ čestice imaju manju moć rafiniranja zrna (vjerojatno zbog veličine preostalih čestica nukleacije). [22] Obzirom na spomenuto, pretaljivanje je potrebno svesti na minimum.

Tražena legura AlMg5(Si) (ENAC 51400) dozvoljava u svom kemijskom sastavu do 0,2 % titanija. Kako se ovdje radi o poroznom odljevku, poželjno je da udio titanija u korištenoj leguri bude 0,15%, zbog toga što njegova prisutnost značajno smanjuje poroznosti u Al-Mg legurama, a čestice Al₃Ti koje se izlučuju tijekom hlađenja mogu djelovati kao klice nukleacije i tako rafinirati zrno. Udio titanija iznad 0,15% bi trebalo izbjegavati, obzirom da nakon tog udjela on nema daljnjeg utjecaja na smanjivanje poroznosti, a može uzrokovati izlučivanje velikih Al₃Ti zrna. [8][23]

Nadalje, preporuča se smanjiti raspon skrućivanja, rabiti sastav blizak eutektiku, eventualno i zamijeniti slitinu.[24] Ukoliko je to moguće, preporuča se korištenje Al – Si legura namijenjenih za lijevanje (oznake ENAC 4xxx) . Svojstva navedenih legura su usporediva sa deklariranom legurom na odljevku uz puno bolju livljiivost , tj. manju sklonost poroznosti.

Ukoliko se Al – Mg legura zamijeni nekom od preporučenih Al - Si legura, potrebno je odabrati leguru bližu eutektičkom sastavu, također užeg intervala skrućivanja (primjerice AlSi 8-11)

5.2. Tehnološke preporuke

U svrhu smanjenja poroznosti, preporuča se provesti otplinjavanje taline dušikom prije lijevanja. Prilikom izrade kalupa pripaziti na udio vode u pijesku (3,6 – 4%). Veći udio vode uzrokovat će povećanu koncentraciju vodika u talini što će dovesti do poroznosti (vodik je najodgovorniji za nastanak plinske poroznosti u aluminijskim legurama). Gornjak bi trebalo nabušiti (odušci za izlaz plina). Sprovesti otplinjavanje kroz jezgru ljevačkom špagom, te na krajevima oslonaca jezgre spojiti odušak sa izlazom. Jezgru napraviti barem dan ranije i pustiti da odstoji prije slaganja kalupa.

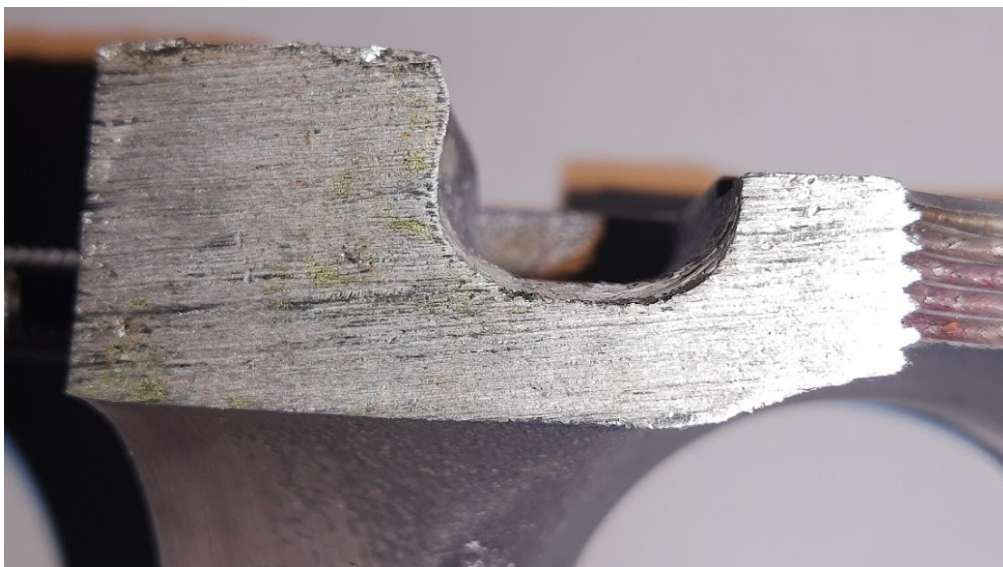
Prilikom lijevanja poželjno je držati lonac što niže, da bi se smanjile turbulencije u talini prilikom ulijevanja. Lijevanje tijekom vrućih i suhих dana također smanjuje mogućnost ekscesivnog vodika u talini. Lijevanje provoditi pri što nižoj temperaturi taline.

Korišteni keramički filter (10 ppi) preporučljivo je zamijeniti finijim filterima (20 ppi ili čak 30 ppi), a može se koristiti Al₂O₃ filter (korišten je SiC). Nadalje, prema modelu za kalup čini se da nema razvodnika, već da se kalup puni direktno iz spusta. Preporuča se od pojila do prvog ušća provesti barem 100 mm razvodnika, kao i uvođenje dodatnih pojila za debele presjeke na krajevima.

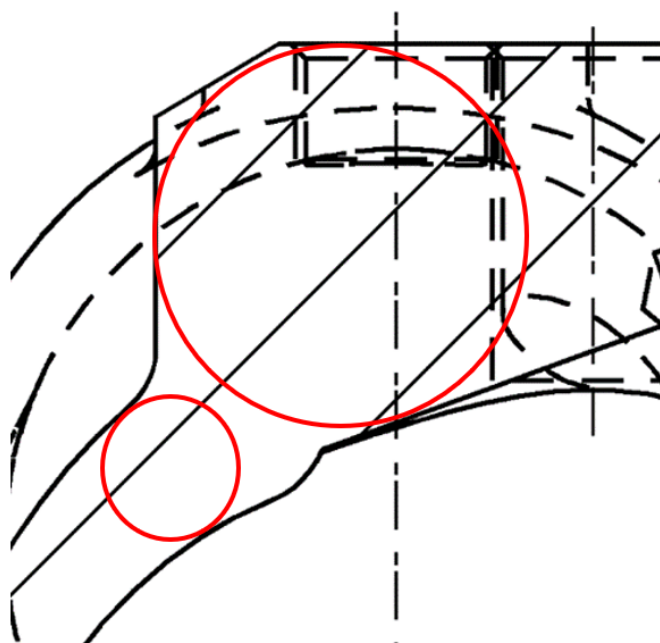
5.3. Preporuke za konstrukcijske mjere

Navedeni odljevak je prilično kompliciranog oblika što dodatno otežava proces lijevanja. Razdvajanje dijela na 3 manja odljevka koja se kasnije spajaju vijcima bi također moglo doprinijeti povećanju kvalitete odljevka.

Nadalje, primijećeno je da odljevak na više mjesta posjeduje nagle prijelaze iz tanke u debelu stijenku, kao što je prikazano na slikama 46 i 47. Navedeni prijelazi nepovoljni su za lijevanje i doprinose stvaranju pora primijećenih na brušenim dijelovima odljevka.



Slika 46. Nagli prijelaz u debljini stijenke



Slika 47. Nagli prijelaz u debljini stijenke u centralnom dijelu

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisana je djelomično narušena funkcionalnost lijevane tlačne grane zbog poroznosti prisutne u materijalu. Istraženi su mogući uzroci poroznosti s naglaskom na korištenu ljevačku leguru. Provedena su ispitivanja s ciljem predlaganja mogućih prilagodbi materijala i ljevačkog postupka u svrhu smanjenja poroznosti. Uvidom u rezultate ispitivanje došlo se do određenih spoznaja i preporuka od kojih su neke navedene u nastavku.

1. Korišteni materijal jest legura tipa Al – Mg, ali se ne radi o leguri navedenoj na deklaraciji.
2. Ukoliko se odluči lijevati sa istom ili sličnom legurom potrebno je koristiti legure užeg raspona skrućivanja, odnosno bližu eutektičkom sastavu
3. Preporuča se kupovina gotovih blokova legure od pouzdanih dobavljača (umjesto samostalnog miješanja)
4. Promijeniti slitinu u Al – Si legirni sustav, odnosno EN AC – 4xxx familija legura. Također koristiti sustave užeg raspona skrućivanja (bliže eutektičkom sastavu poput AlSi 9 – 11).
5. Prilikom mogućeg redizajna proizvoda smanjiti masu materijala na mjestu gdje je nagomilan, te izbjegavati nagle prijelaze sa tanke na debelu stijenku.
6. Provesti otplinjavanje taline dušikom prije lijevanja, izraditi jezgru minimalno dan ranije i pustiti da odstoji, te koristiti pijesak sa idealno 3,6% vlage.
7. Koristiti finiji keramički filter, uvesti razvodnik od pojila do prvog ušća (barem 100 mm), te dodati pojila za hranjenje krajeva.

Obzirom da se radi o problemu sa mnogo utjecajnih faktora, za precizno utvrđivanje uzroka slabije kvalitete odljevka potrebno je dugotrajno ispitivanje svih parametara postupka kao i pristup velikom broju informacija te analize istih. Nadalje, preporuča se provesti simulaciju lijevanja uz provedene preporuke.

LITERATURA

- [1] Ilić B. Lijevanje osovine od aluminijske legure [Diplomski rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2015 Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:689564>.
- [2] Šušak M. Greške na odljevcima od aluminijskih legura [Završni rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2021 [pristupljeno 04.07.2021.] Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:397578>.
- [3] <https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/173/Aluminum%20and%20Aluminum%20Alloys%20Davis.pdf>.
- [4] Vlahović, Jerko Ispitivanje livljivosti AlSi12 legure, 2012., diplomski rad, diplomski, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [5] <https://www.statista.com/statistics/264624/global-production-of-aluminum-by-country/> Title.
- [6] Kaufman JG, Rooy EL. Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications. ASM International; 2004.
- [7] Kos H. Zavarljivost aluminijske legure AW 6082 [Diplomski rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2014 Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:632715>.
- [8] Boyko, V, Czekaj E, Watmuzek E ME. Microstructure formation and grain refinement of Al-Mg-Si-Mn casting alloys. Work Foundry Res Inst. 58(4). doi: 10.7356 / iod. 2018.20
- [9] Bauer, Branko; Mihalic, Ivana Osnove tehnologije lijevanja Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
- [10] Prerad D. Utjecaj kemijskog sastava na značajke Al-Si legure [Diplomski rad]. Sisak: Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet; 2015 Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:107887>.
- [11] Glavaš Z. OSNOVE LIJEVANJA METALA. Sveučilište u zagrebu, Metalurški fakultet.; 2014.
- [12] Hrvatska tehnička enciklopedija, svezak 7. In 1980. Dostupno na: <https://tehnika.lzmk.hr/tehnicka-enciklopedija-1966-1997/>

- [13] Ljevarstvo. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=37728>>.
- [14] Ljevarstvo, predavanja. Fakultet strojarstva i brodogradnje; Dostupno na: https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/20_10_2011__15683_ljevarstvo-2011.pdf
- [15] Oršić F. Lijevanje odljevaka uz upotrebu polistirenskih modela [Diplomski rad]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2008 Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:681065>.
- [16] Saber S, Selim G. Higher-Order Statistics for Automatic Weld Defect Detection. *J Softw Eng Appl.* 2013 Jan 1;06:251–8. doi: 10.4236/jsea.2013.65031
- [17] Ninić, Ante Utjecaj vrste uljevnog sustava na kvalitetu lijevane aluminijske ploče. = Effect of gating design on the quality of cast aluminium plate. Master's thesis (Bologna) , Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015. Mentor: Bau.
- [18] <https://sciaps.com/xrf-handheld-x-ray-analyzers/x-200/>.
- [19] <https://www.bruker.com/content/bruker/int/en/products-and-solutions/elemental-analyzers/handheld-xrf-spectrometers/how-xrf-works.html>.
- [20] Ikeshita S, Strodahs A, Saghi Z, Yamada K, Burdet P, Hata S, et al. Hardness and microstructural variation of Al-Mg-Mn-Sc-Zr alloy. *Micron.* 2015 Dec 1;82. doi: 10.1016/j.micron.2015.12.002
- [21] http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1258.
- [22] Naglič I, Smolej A, Dobešrek M. Remelting of aluminium with the addition of AlTi5B1 and AlTi3C0,15 grain refiners. *Metalurgija.* 2008;47(2):115-118. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/19527>.
- [23] Ji S, Watson D, Wang Y, White M. Effect of Ti Addition on Mechanical Properties of High Pressure Die Cast Al-Mg-Si Alloys. *Mater Sci Forum.* 2013 Jul 1;765:23–7. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.765.23
- [24] Hasse S. Pogreške na odljencima. *Hrvat udruženje za ljevarstvo.* 2003;383.

PRILOZI

- I. Optički medij pohrane podataka, CD-R