



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА ЧАЧАК

Александра Патарић

УТИЦАЈ ЕЛЕКТРОМАГНЕТНОГ ПОЉА  
ТОКОМ ЛИВЕЊА НА КАРАКТЕРИСТИКЕ  
ОДЛИВАКА АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА

Докторска дисертација

Чачак, 2016

<b>I Аутор</b>	
Име и презиме:	Александра Патарић
Датум и место рођења:	19.05.1971. године, Београд
Садашње запослење:	Истраживач сарадник, ИТНМС, Београд
<b>II Докторска дисертација</b>	
Наслов:	Утицај електромагнетног поља током ливења на карактеристике одливака алуминијумских легура
Број страница:	160
Број слика:	74
Број библиографских података:	89
Установа и место где је рад израђен:	Факултет техничких наука, Чачак, Универзитет у Крагујевцу
Научна област (УДК):	
Ментор:	Др Бранка Јордовић, ред. проф., у пензији Факултет техничких наука, Чачак, Универзитет у Крагујевцу
<b>III Оцена и одбрана</b>	
Датум пријаве теме:	17.10.2012. год.
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације:	658/1 од 14.11.2012. год.
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Др Алекса Маричић, професор емеритус, Факултет техничких наука, Чачак, Универзитет у Крагујевцу, научна област: Физика</li> <li>2. Др Бранка Јордовић, ред. проф., Факултет техничких наука, Чачак, Универзитет у Крагујевцу, научна област: Материјали</li> <li>3. Др Звонко Гулишија, научни саветник, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, научна област: Ливарство</li> <li>4. Др Загорка Аћимовић-Павловић, ред. проф., Технолошко металуршки факултет, Универзитет у Београду, научна област: Ливарство</li> <li>5. Др Милентије Стефановић, ред. проф., Факултет инжењерских наука, Крагујевац, Универзитет у Крагујевцу научна област: Производно машинство, члан</li> </ol>
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Др Алекса Маричић, професор емеритус, Факултет техничких наука, Чачак, Универзитет у Крагујевцу, научна област: Физика, председник</li> <li>2. Др Бранка Јордовић, ред. проф., у пензији, Факултет техничких наука, Чачак, Универзитет у Крагујевцу, научна област: Материјали, ментор</li> <li>3. Др Небојша Митровић, ред. проф., Факултет техничких наука, Чачак, Универзитет у Крагујевцу, научна област: Физика, члан</li> <li>4. Др Звонко Гулишија, научни саветник, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Београд, научна област: Ливарство, члан</li> <li>5. Др Милентије Стефановић, ред. проф., Факултет инжењерских наука, Крагујевац, Универзитет у Крагујевцу научна област: Производно машинство, члан</li> </ol>
Датум одбране дисертације:	

*Уз дужно поштовање, искрено и велико задовољство захваљујем се:*

- *Др Бранки Јордовић, редовном професору у пензији Факултета техничких наука Чачак, свом ментору, на изузетном разумевању и несебичној како људској тако и стручној помоћи, током читаве израде дисертације, правременом усмеравању и скретању пажње на суштину. На стрпљењу, бројним, често и дугим садржајним разговорима, аналитичним, корективним и подстицајним.*
- *Др Звонку Гулишији, редовном професору, директору ИТНМС-а, који је као научни саветник и руководилац пројекта „ТР 34002“, допринео да као резултат истраживања настане и ова докторска дисертација. Искусним саветима утицао је да ме у кључним моментима коригује, а личним ангажманом и помоћи дао значајан допринос приликом израде експерименталних делова. Посебно му се захваљујем што је као мој духовни ментор, знао да ми и кроз редовне радне активности као непосредни руководилац, увек на неки својствен начин скрене пажњу на значај и обавезу перманентног рада на докторату, упуту прави савет и да подстрек.*
- *Др Небојши Митровићу, редовном професору Факултета техничких наука, Чачак, за пажљиву и детаљну анализу докторске дисертације, кроз дате сугестије и корекције које су дале коначни изглед овоме раду.*
- *Др Алекси Маричићу, професору емеритусу Факултета техничких наука, Чачак, који је својим примедбама и саветима нарочито у делу рада где се описују физичке појаве допринео својим значајним и суштинским коментарима.*
- *Др Миленцију Стефановићу, редовном професору Факултета инжењерских наука, Крагујевац, за значајан допринос у остваривању нумеричке симулације процеса топлог ковања и тумачења добијених резултата, приказаних у овом раду.*
- *Др Лату Пезу, колеги из Института за физичку хемију, Београд, на посебном ангажману и заједничкој вери у успех мултидисциплинарног приступа, примене математичких модела у металургији, како у обради производних параметара, тако и тумачењу добијених резултата.*
- *Руководству и колегама из фабрике „11 Март“, Сребреница, што су омогућили израду експерименталног дела рада у производним условима.*
- *Колегама из Војно техничког института, Београд, на сарадњи, уступљеној литератури и корисним саветима.*
- *Својој породици на перманентној пажњи и љубави, супругу Ивану и ћеркама Ани и Марији који умеју да свакодневне тренутке учинине магичним и великим. Њихова подршка и присутност дале су посебан значај овоме раду.*
- *Својим родитељима, који су ми увек пружали безусловну подршку, љубав и од малена ме научили да верујем у успех.*

## ЛИСТА СИМБОЛА

DC	-Ливење са директним хлађењем (direct chill casting)
LFEC	-Ниско фреквентно електромагнетно ливење (low frequency electromagnetic casting)
EMF	-Електромагнетно поље
SEM	-Скенирајућа електронска микроскопија
EDX	-Енергодисперзиона анализа x зрака
DTA	-Диференцијално термијска анализа
$\Phi_m$	-Магнетни флукс
F	-Лоренцова сила
B	-Интезитет магнетне индукције
J	-Густина струје генерисана у истопљеној маси
$\Delta$	-Дубина продирања електромагнетног поља
I	-Јачина струје
N	-Број намотаја у калему
H	-Јачина електромагнетног поља
$\nu$	-Фреквенција
DAS	-Ширина секундарних дендритних грана
$L_{IMF}$	-Ширина међудендритног простора
$V_{V IMF}$	-Количински удео интерметалних фаза
L	-Величина зрна
$R_m$	-Затезна чврстоћа
$R_p$	-Граница течења
A	-Издужење при разарању
$S_0$	-попечни пресек епрувете при кидању
SD	-Стандардна девијација
PCA	-Анализа главних компоненти (principal components analysis)
SOP	-Полином другог реда (second order polynomial)
RSM	-Метода одзивне површине ( <i>Response Surface Methodology</i> )

ANOVA -Анализа варијансе

ANN -Вештачке неуронске мреже (*Artificial Neural network*)

MLP -Вишеслојни перцептрон (multiple layer perceptron)

$r^2$  -Коефицијент детерминације

SOS -Сума квадрата (sum of squares)

FSE -Фази синтетичка евалуација (Fuzzy synthetic evaluation )

## ИЗВОД

Електромагнетни поступак ливења заснива се на теорији металуршких процеса и магнетохидродинамици. Приликом ливења у присуству електромагнетног поља наизменична струја генерише временски променљиво магнетно поље у истопљеној маси што повећава индуквану струју у растопу. Растоп метала је под утицајем електромагнетне силе која је проузрокована интеракцијом индукване струје и магнетног поља. Електромагнетна сила изазива већи проток флуида, принудну конвекцију, равномерније температурно поље и слабији утицај гравитације. На овај начин се мењају услови очвршћавања. Добијени одливци су квалитетнији, структура је финија и униформнија по пресеку. Због смањеног контактеног притиска, (што је такође последица деловања електромагнетног поља) између калупа и метала, квалитет површине је побољшан тако да није потребна већа додатна машинска обрада. У свету постоје одређена истраживања у области електромагнетног поступка ливења, али је мало пажње посвећено карактеризацији микроструктуре и механичких својстава тако добијених одливака. Овај рад треба да допринесе бољем познавању утицаја електромагнетног поља на добијену микроструктуру (морфологију, величину зрна, расподелу и удео добијених фаза) и остале карактеристике добијених одливака. Изабрана легура EN AW 7075 има широку примену у индустрији, термички је обрадива и намењена је за пластичну прераду односно ковање. Производња ове легуре је дуготрајна и скупа, а прате је недостаци типа порозности, топлих пукотина и неуједначености у величини зрна. Ове металуршке грешке утичу на погоршање механичких својстава и квалитета добијених одливака. У циљу смањења ових грешака још у ливеном стању неопходно је применити одговарајући поступак ливења са оптималним радним параметрима. Да би се испитао утицај електромагнетног поља приликом ливења упоређени су узорци одливени без дејства поља и под дејством поља различите фреквенције 10, 15, 20 и 30 Hz. Резултати испитивања микроструктуре и механичких својстава показују да је применом електромагнетног поља могуће добити финију и хомогенију микроструктуру, а самим тим и боља механичка својства. Добијени резултати SEM/EDX, DTA анализе као и резултати мерења електропроводљивости и одређивања хемијске сегрегације су приказани и упоређени. Примена математичких модела у обради резултата и нумеричка симулација процеса топлог ковања су урађени пратећи светске трендове, а њихова практична примена има за циљ уштеду енергије, смањење шкарта и потрошњу сировина. Добијени резултати се могу користити за проширење база података примењених модела. Ова докторска дисертација је резултат истраживања у оквиру пројекта „Развој технолошких поступака ливења под утицајем електромагнетног поља и технологија пластичне прераде у топлим стању четворокомпонентних легура Al-Zn за специјалне намене“, ТР 34002, чији је руководилац проф. др Звонко Гулишија, научни саветник, а који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у оквиру програма технолошког развоја у периоду од 01. 01.2011. – 30. 06. 2016. године.

## **ABSTRACT**

Electromagnetic casting (EMC) is the technology developed as by combining the magnetic hydrodynamics and casting technique. Electromagnetic forces, arising from the interaction of Eddy currents induced in the metal by inductor magnetic field, cause an increased flow of the fluid, forced convection, more uniform temperature field and weak gravitation influence thus changing the conditions of solidification. The advantage of EMC reflects in obtaining a better quality of ingots compared to conventional continuous casting process. Namely, the structure obtained is finer and more uniform through the cross section, with reduced segregation of alloy element and porosity. Apart from that, due to the reduced contact pressure (result of electromagnetic field effect) between the mould and the metal, the quality of ingot surface is improved, having no need for additional machine processing. The investigations conducted in the world were aimed to investigate the effect of electromagnetic, magnetic and hydrodynamic phenomena on Al ingots, but very little attention was given to the characterization of microstructure and mechanical properties.

This work, should contribute to better knowledge of the effect of electromagnetic field on the obtained microstructure (morphology, size, volume fraction and distribution of phases) and properties of Al alloys. The chosen alloy was EN AW 7075 heat treatable, intended for forge with wide industry use. It is characterized by a number of defects that occur during the solidification process: porosity, hot cracks, non-uniform grain size and crystal segregation. Since the quality of final product is directly affected by these defects it is necessary to prevent or reduce their appearance by the choice of the appropriate process and optimal parameters of casting. To compare the results of electromagnetic casting, (with different operating parameters), the process of vertical continual casting without the presence of low frequency electromagnetic field was selected. The results were obtained from microstructure and mechanical examination of Al alloy 7075 ingots casted with and without low-frequency electromagnetic field. The microstructure characterization shows that it is possible to obtain finer and more homogeneous microstructure through the entire cross section of ingots casted with electromagnetic field, compared to ingots casted without electromagnetic field. As the consequence of microstructure-mechanical properties correlation, the use of electromagnetic field improved the mechanical properties, as well. The results obtained from SEM/EDX, DTA, electrical conductivity measurement were also showed and compared. The chemometric approach for mechanical properties prediction and numerical simulation of the forging process of EN AW 7075 alloy were carried out following the latest world trends and the obtained results can be used as a basis for further training by expanding of database of derived models. This doctoral dissertation is the investigation result of the project: "The development of casting technologies under the influence of electromagnetic field and technologies of hot plastic forming of 7000 series aluminium alloys for special purposes" TR34002, leded by professor Zvonko Gulišija, in the frame of Technological Development Program, funded by The Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia, in the period from 2011 to June 2016.

## САДРЖАЈ

<b>1.</b>	<b>УВОД</b>	8
<b>2.</b>	<b>АЛУМИНИЈУМ И АЛУМИНИЈУМСКЕ ЛЕГУРЕ</b>	12
2.1	Класификација алуминијумских легура	13
2.1.1	Термички необрадиве легуре	14
2.1.2	Термички обрадиве легуре	15
2.1.3	Систем Al-Zn-Mg-Cu	16
<b>3.</b>	<b>ТЕХНОЛОШКИ ПОСТУПАК ПРОИЗВОДЊЕ И ПРЕРАДЕ</b>	
	<b>АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА</b>	20
3.1	Електромагнетни поступак ливења	28
3.2	Хомогенизационо жарење алуминијумских легура	30
3.3	Пластична прерада	32
3.3.1	Пресовање алуминијумских легура	32
3.3.2	Топло ковање алуминијумских легура	33
<b>4.</b>	<b>ЛИТЕРАТУРНИ ПРЕГЛЕД</b>	35
4.1	Својства и примена електромагнетног поља у металургији	35
4.2	Светска искуства у примени електромагнетног поља у поступку ливења алуминијумских легура	44
<b>5.</b>	<b>ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО</b>	58
5.1	Полуконтинуирано ливење EN AW 7075 легуре	60
5.2	Хомогенизационо жарење	65
<b>6.</b>	<b>МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА</b>	66
6.1	Микроструктурна карактеризација	66
6.1.1	Оптичка микроскопија	66
6.1.2	Скенирајућа електронска микроскопија SEM /EDX анализа	67
6.2	Одређивање хемијске сегрегације по попречном пресеку узорака	69
6.3	Диференцијална термијска анализа	69
6.4	Мерење електропроводљивости	70
6.5	Испитивање механичких својстава	71
6.6	Примена математичких модела у обради производних параметара при ливењу - хеометрија	72



6.7	Нумеричка симулација процеса топлог ковања легуре EN AW 7075	83
<b>7.</b>	<b>РЕЗУЛТАТИ</b>	86
<b>7.1</b>	<b>Ливено стање</b>	87
7.1.1	Оптичка микроскопија	87
7.1.2	Скенирајућа електронска микроскопија SEM /EDX анализа	101
7.1.3	Одређивање хемијске сегрегације по попречном пресеку узорака	106
7.1.4	Диференцијална термијска анализа	107
7.1.5	Мерење електропроводљивости	108
7.1.6	Испитивање механичких својстава	108
<b>7.2</b>	<b>Хомогенизовано стање</b>	109
7.2.1	Оптичка микроскопија	109
7.2.2	Скенирајућа електронска микроскопија SEM /EDX анализа	115
7.2.3	Мерење електропроводљивости	117
7.2.4	Испитивање механичких својстава	117
<b>7.3</b>	<b>Примена математичких модела у обради производних параметара при ливењу - хеометрија</b>	118
<b>7.4</b>	<b>Нумеричка симулација процеса топлог ковања легуре EN AW 7075</b>	125
<b>8.</b>	<b>ДИСКУСИЈА</b>	128
<b>8.1</b>	<b>Ливено стање</b>	129
8.1.1	Оптичка микроскопија	129
8.1.2	Скенирајућа електронска микроскопија SEM /EDX анализа	136
8.1.3	Одређивање хемијске сегрегације по попречном пресеку узорака	137
8.1.4	Диференцијална термијска анализа	138
8.1.5	Мерење електропроводљивости	138
8.1.6	Испитивање механичких својстава	139
<b>8.2</b>	<b>Хомогенизовано стање</b>	140
8.2.1	Оптичка микроскопија	140
8.2.2	Скенирајућа електронска микроскопија SEM /EDX анализа	143

8.2.3	Мерење електропроводљивости	143
8.2.4	Испитивање механичких својстава	144
<b>8.3</b>	<b>Примена математичких модела у обради производних параметара при ливењу - хеометрија</b>	144
<b>8.4</b>	<b>Нумеричка симулација процеса топлог ковања легуре EN AW 7075 153</b>	148
<b>9.</b>	<b>ЗАКЉУЧАК</b>	150
<b>10.</b>	<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	156

## **1. УВОД**

Данашњи захтеви у области материјала огледају се у добијању што квалитетнијих производа са скраћеним производним циклусом уз развој аутоматизованих и еколошки прихватљивих технолошких поступака у складу са пратећим прописима и стандардима. Приступи истраживача и научника у решавању захтева и проблема које индустрија намеће, огледају се у проналажењу нових материјала или побољшању структуре и својстава већ познатих материјала. Због специфичне комбинације својстава као што су густина, механичка својства, корозиона отпорност и способност обликовања, алуминијумске легуре налазе све већу примену па зато увек представљају атрактивну област за истраживање. На промену својстава материјала може се утицати хемијским, механичким или термичким методама.

Обзиром да полазна својства материјала одређују њихове „наследне“ карактеристике које пак даље одређују понашање и употребу материјала, велика пажња се поклања, у свету истраживања методама и технологијама које ће обезбедити унапред задата својства. Познато је више метода које при очвршћавању растопљеног метала (легура) дају одговарајућу микроструктуру од које зависе сва својства добијених одливака. Поред конвенционалних поступака ливења при мањим или већим брзинама хлађења, истраживања су вршена и у области деловања ултразвука при очвршћавању. Последњих година се интензивно ради на освајању поступка ливења алуминијумских легура под дејством електромагнетног поља. Публиковани радови из ове области указују на велику актуелност овог поступка који представља изазов за истраживаче који се баве очвршћавањем алуминијумских легура. У овој докторској тези биће управо проучаван утицај електромагнетног поља ниских фреквенција током ливења алуминијумских легура на остварене карактеристике одливака.

Под електромагнетном обрадом метала сматра се област технике у коме је електромагнетизам искоришћен за обраду електропроводних материјала као што су: растопи метала и легура. Теоријски основи електромагнетне обраде метала се

заснивају на теорији металуршких процеса и магнетохидродинамици, а у коју спадају електромагнетизам и механика флуида. Магнетохидродинамика као научна област бави се проучавањем интеракције између електромагнетног поља и феномена струјања флуида. Када су у питању растопи метала, главни задатак магнетохидродинамике је добијање података који омогућавају изучавање утицаја дејства електромагнетне силе на растоп метала. Електромагнетна сила у овом случају представља нову променљиву величину која се јавља приликом очвршћавања растопа метала и главни проблем је сагледавање њеног утицаја како на ток очвршћавања тако и на друге силе и појаве (гравитациона сила, инерциона сила, вискозитет, површински напон и сл.) који су већ присутни у систему.

Може се рећи да је примена електромагнетног поља у металуршким процесима као први проблем истакла енергетску ефикасност, а да решење овог проблема углавном води до принципијелно нових технолошких поступака.

Највећи број метода и уређаја примењене магнетохидродинамике је заснован на коришћењу електромагнетне силе. У најпростијем случају то је сила која делује на проводник кроз који протиче електрична струја, а који је смештен у магнетно поље. Уколико се замисли да уместо чврстог линеарног проводника имамо одређену запремину растопа метала кроз који протиче електрична струја, можемо ову запремину мисаоно поделити на елементарне проводнике тако да на сваки од њих при узајамном деловању електричне струје и магнетног поља аналогно линеарном проводнику, делује електромагнетна сила. Овде је важно напоменути да ова појава нема никакве везе са магнетним привлачењем (сви метални растопи су практично немагнетни) него је за коришћење електромагнетне силе важно само да је средина електропроводна.

Алуминијумска легура EN AW 7075, која је предмет истраживања у овој докторској дисертацији, је комерцијална легура кој се одликује изузетним механичким својствима и има веома разноврсну и широку примену. Међутим, за њу су карактеристични бројни недостаци који настају у току процеса очвршћавања: порозност, топле пукотине, неуједначена величина зрна и кристална сегрегација. У циљу елиминације металуршких грешака још у одливцима, као предуслова за

добијање финалних производа високог квалитета и рационализације потрошње енергије, постоји потреба за усавршавањем континуираног поступка ливења, ове легуре, применом нискофреквентног електромагнетног поља.

У првом делу рада дате су теоријске основе о алуминијумским легурама као и основне поставке електромагнетизма, са посебним освртом на литературне податке о светским искуствима у овој области. Други део рада обухвата експеримент, резултате и њихову дискусију. У оквиру експерименталног дела дати су сви подаци о коришћеној легури EN AW 7075 (AlZn5, 5MgCu) и радним параметрима примењеног електромагнетног поља током ливења које је изведено у реалним производним условима. Примењена су четири режима ливења са строго контролисаним радним параметрима поља, при чему је варирана само фреквенција 10, 15, 20 и 30 Hz. Одливак –еталон добијен је истим поступком полуконтинуираног ливења само без присуства поља. Такође је дат режим хомогенизационог жарења (480 °C/8h) изабраних одливака. На основу резултата који су добијени микроструктурном и механичком карактеризацијом, скенирајућом електронском микроскопијом, диференцијално термијском анализом, мерењем електропроводљивости као и испитивањем хемијске сегрегације узорака, који су добијени под дејством електромагнетног поља и без њега одређиван је утицај поља на добијене карактеристике одливака.

Покушаји одређивања зависности радних параметара процеса ливења и добијених карактеристика одливака су присутни већ дуже време, али примена математичких модела -хеометрије, у решавању овог проблема је први пут примењена у металуршкој пракси. У оквиру ове дисертације циљ је био да се одреде најутицајнији фактори на карактеристике одливака чиме се може постићи рационализација технолошког процеса производње алуминијумских легура.

Кроз поступак нумеричке симулације процеса ковања, применом савремених софтверских пакета, испитана је могућност даље прераде алуминијумске легуре EN AW 7075 која је добијена поступком ливења под дејством електромагнетног поља. Коришћењем поступака нумеричких симулација омогућава се виртуелна провера и успешан одабир радних параметара процеса.

Задатак ове докторске дисертације био је да се експериментално утврде последице мешања растопа легуре EN AW 7075 у току њеног очвршћавања, које је изазвано применом електромагнетног поља. Овај рад управо треба да допринесе познавању утицаја нискофреквентног електромагнетног поља (10, 15, 20 и 30 Hz) на добијену микроструктуру (морфологију, величину, количину и расподелу фаза), а самим тим и на механичка својства у ливеном стању. Циљ је био да се избором оптималних радних параметара у току процеса ливења, остваре такве карактеристике одливака које би водиле до скраћења времена трајања процеса хомогенизационог жарења и целокупног технолошког процеса производње и прераде алуминијумске легуре EN AW 7075, а самим тим и до значајне уштеде енергије.

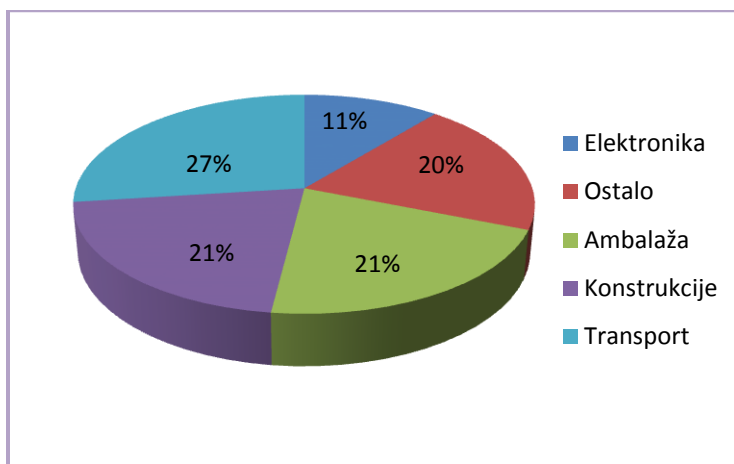
Ова докторска дисертација је резултат истраживања у оквиру пројекта „Развој технолошких поступака ливења под утицајем електромагнетног поља и технологија пластичне прераде у топлом стању четворокомпонентних легура Al-Zn за специјалне намене“, ТР 34002, чији је руководилац проф. др Звонко Гулишија, научни саветник, а који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у оквиру програма технолошког развоја у периоду од 01. 01.2011. – 30. 06. 2016. године.

## **2. АЛУМИНИЈУМ И АЛУМИНИЈУМСКЕ ЛЕГУРЕ**

Алуминијум је после железа други по реду метал који се користи у савременој индустрији. Употребљава се као чист метал у електротехници, прехранбеној, хемијској и другим гранама индустрије али му је много значајнија примена у виду његових вишекомпонентних легура које су нашле примену у скоро свим индустријским областима, а посебно се издвајају аутомобилска, авио, војна индустрија и грађевинарство. Због специфичности својстава, пре свега односа чврстоће и масе, легуре алуминијума су обезбедиле значајно место на светском тржишту.

Поред ниске специфичне масе, значајне особине алуминијума су и добра електрична и топлотна проводљивост, добра ливкост, способност обликовања и задовољавајућа корозиона отпорност [1]. Легирањем, термичком обрадом, хладном деформацијом као и комбинацијом ових поступака може се повећати релативно ниска чврстоћа алуминијума. Алуминијум спада и у еколошки прихватљиве материјале јер се лако рециклира. Алуминијумске легуре се лако обрађују разним методама пластичне прераде као што су извлачење, ваљање, а посебно су погодне за производњу пресовањем сложених шупљих и пуних пресека. Сама производња као и потражња за овим материјалом свакодневно расте.

Главни легирајући елементи алуминијума су: бакар, магнезијум, силицијум, цинк и манган. У групу елемената са мањим учешћем спадају железо, хром, титан, олово, кобалт, калај и никл. У односу на врсту и степен легираности, као и начин производње разликују се легуре за ливење и легуре за пластичну прераду. Не постоји јасна граница између ових легура, тако да постоје и случајеви када се легуре за пластичну прераду користе и за ливење. Одливци од легура за ливење се производе ливењем у пешчаним и металним калупима док се легуре за пластичну прераду добијају поступцима ваљања, извлачења и пресовања. На Слици 1. шематски је приказана примена алуминијума у различитим индустријским гранама.



Слика 1. Примена алуминијума у индустрији [2]

## 2.1 Класификација алуминијумских легура

Легуре алуминијума се деле на две групе:

- легуре за ливење
- легуре за пластичну деформацију ( ливене и механички прерађене)

и две подгрупе:

- термички обрадиве (легуре које ојачавају термичком обрадом тј термичким таложењем)
- термички необрадиве (легуре које ојачавају растварањем легирајућих елемената у чврстом раствору и деформацијом)

Алуминијумске легуре су у зависности од главних легирајућег елемента и стања производа подељене у серије. Усвојен је нумерички систем означавања помоћу четвороцифрених арапских бројева од којих први дефинише серију према преовлађујућим легирајућим елементима. Постоји осам серија:

- **1xxx**- То су легуре које имају најмање 99% чистог алуминијума и најчешће се користе у електронској и хемијској индустрији.
- **2xxx**-Легуре алуминијума са бакром, магнезијумом и силицијумом (Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Si) имају велику примену у авионској индустрији.



- **3xxx**- Легура алуминијума са манганом (Al-Mn) имају отпорност на корозију.
- **4xxx**- Легуре алуминијума са силицијумом, користе се у индустрији заваривања и лемљења.
- **5xxx**- Легуре алуминијума са магнезијумом, имају добру отпорност према корозији и користе се углавном у бродоградњи.
- **6xxx** Легуре алуминијума са силицијумом и магнезијумом (Al-Si-Mg) имају примену у грађевинарству.
- **7xxx**-Легуре алуминијума, цинка и магнезијума (Al-Zn-Mg) одликују се високом чврстоћом и због тога углавном имају примену у авио, аутомобилској и војној индустрији.
- **8xxx**- Алуминијумске легуре са калајем и литијумом.

### **2.1.1 Термички необрадиве легуре**

Термички необрадиве алуминијумске легуре, задовољавајућу чврстоћу углавном постижу: ојачавањем преко чврстог раствора, ојачавањем преко конституената секундарних фаза и деформационим ојачавањем. Додавањем легирајућих елемената и њиховом уградњом у решетку основног метала, стварањем чврстог раствора, углавном се повећавају тврдоћа, затезна чврстоћа и граница течења док се издужење и контракција смањују. Да би допринео ојачавању додати елемент мора имати велику растворљивост у алуминијуму на температури жарења, мора бити задржан у чврстом раствору после спорог хлађења са температуре жарења и не сме реаговати са другим елементима и стварати нерастворне фазе.

Неки легирајући елементи Fe, Mn, Ni, Ti и Cr као и њихове комбинације граде секундарне фазе са релативно малом растворљивошћу у чврстом раствору. Присуство већих удела интерметалних једињења ових елемената такође повећава чврстоћу и тврдоћу.

Највећи ефекат се постиже хладном пластичном деформацијом. Хладном деформацијом, повећава се густина дислокација и долази до повећања деформационе отпорности материјала, односно повећања тврдоће и чврстоће.

Механизам пластичне деформације се повезује са премештањем несавршености кристалне грађе метала пре свега дислокација. Кретање дислокација ометају различите препреке типа енергетских чворова, накупине атома, нечистоћа или различите дисперзионо излучене фазе које су распоређене управно или под углом у односу на правац кретања дислокација. Наилазећи на грешку дислокација је обилази, остављајући на њој дислокациону петљу, која повећава отпорност кретању наредних дислокација и повећава густину дислокација. Увећање отпора кретању наредних дислокација захтева повећање сила за њихово покретање. На тај начин зависно од кретања дислокација и у сагласности са растом величине пластичне деформације, расте сила потребна за њихово кретање, за даљу пластичну деформацију, односно метал са увећањем степена пластичне деформације ојачава.

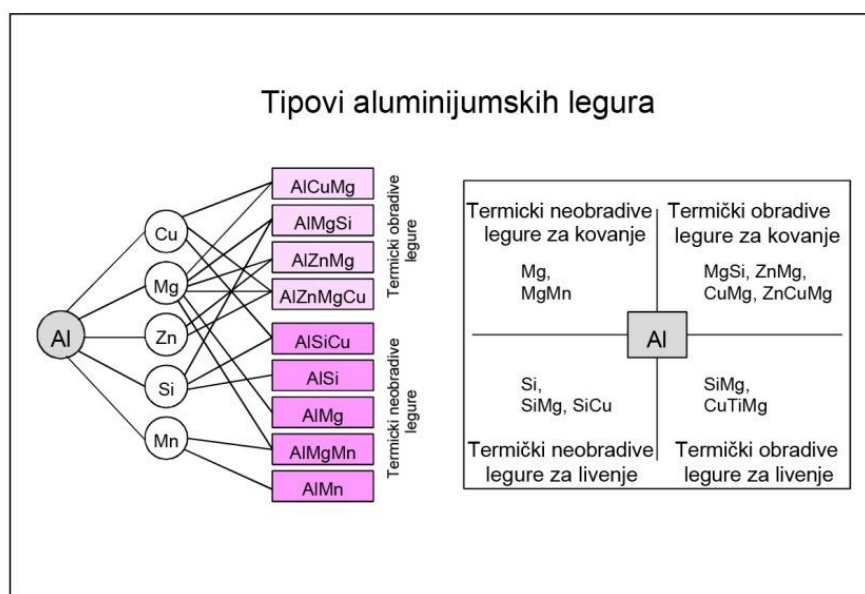
### **2.1.2 Термички обрадиве легуре**

Особине термички обрадивих алуминијумских легура постижу се углавном преко посебне термичке обраде- отврдњавање старењем, (дисперзионо отврдњавање), која обухвата:

- растварајуће жарење којим се на повишеним температурама, неопходни легирајући елементи растварају у Al матрици.
- каљење, директним хлађењем са температуре растварајућег жарења, а потребна брзина хлађења се подешава зависно од типа легуре.
- старење на собној температури (природно старење) или на температури између 120 и 180 °C (вештачко старење).

Растварајуће жарење омогућава да се чврсти раствор обогати легирајућим компонентама које утичу на отврдњавање. Уз довољно брзо хлађење (каљење) обогаћени раствор се трансформише у суперпресићено стање. Током старења, почиње стварање талоба из суперпресићеног чврстог раствора. Код природног старења настају кохерентни талози (GPI зоне), што значи да остају непо ремећени односи између кристалних решетки чврстог раствора и талоба и настаје само еластично деформисање решетки. Код вештачког старења настају метастабилне фазе

чија грађа кристалне решетке одступа од грађе решетке чврстог раствора (GPII зоне), али која показује одређену кохерентност у односу на равни решетке матрице. Разлике у међуатомском растојању доводе до тзв. кохерентних напона. Кохерентност између решетки матрице и делимично кохерентних талоба је ограничена. Некохерентни талози имају грађу решетке различиту од матрице. Растворени атоми и различити типови талоба ометају кретање дислокација, што доводи до повећања чврстоће. Алуминијумске легуре које су термички обрадиве могу се ковати поступком топлог ковања. На Слици 2. приказани су типови алуминијумских легура.

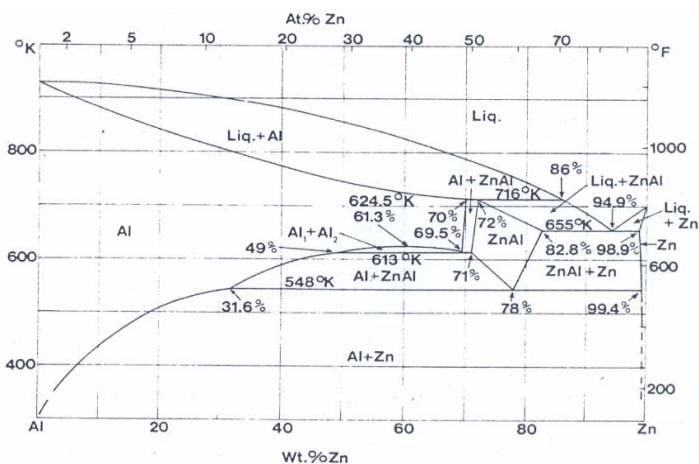


Слика 2. Типови алуминијумских легура [3]

### 2.1.3 Систем Al-Zn-Mg-Cu

За анализу система Al-Zn-Mg-Cu важни су тројни системи Al-Zn-Mg, Al-Cu-Mg и Al-Cu-Zn. На основу анализе фазних састава [4-7] ових система у равнотежи са Al чврстим раствором могу бити интерметалне фазе: систем Al-Zn-Mg-  $\eta$ (MgZn<sub>2</sub>),  $\theta$ (MgZn<sub>5</sub>) или (Mg<sub>2</sub>Zn<sub>11</sub>), T(Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub>) или (Mg,Cu)<sub>32</sub>, (Al,Zn)<sub>49</sub> и  $\beta$ (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>) или (Al<sub>4</sub>Mg<sub>3</sub>); систем Al-Cu-Mg-  $\theta$ (CuAl<sub>2</sub>), S(Al<sub>2</sub>CuMg), T(Al<sub>6</sub>CuMg<sub>4</sub>) и  $\beta$ (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>); систем Al-Cu-Zn-  $\theta$ (CuAl<sub>2</sub>), T(Al<sub>3</sub>Cu<sub>5</sub>Zn<sub>2</sub>) и (CuZn<sub>5</sub>).

Све комерцијалне легуре које обухватају ову серију садрже више цинка него магнезијума.



Слика 3. Дијаграм стања Al-Zn

Свега неколико комерцијалних легура ове серије са садржајем  $Mg < 1$ , због своје структуре и својстава су много ближе групи легура Al-Mg односно серији 5xxx него серији 7xxx. Легуре серије 7xxx припадају и легурама за ливење и легурама за пластичну деформацију али због своје ниске ливкости највећи део легура ове серије припада групи за пластичну деформацију. Цинк и магнезијум су главни легирајући елементи ове серије. Висок Zn:Mg однос даје високу чврстоћу, способност за термичку обрадивост и осетљивост на напонску корозију док мали Zn:Mg однос омогућава добру заварљивост и ниску прокалаивост. Бакар у овој серији легура има ограничен ојачавајућу ефекат и благо смањује напонску корозију. Гвожђе и силицијум су обично нечистоће у алуминијуму и њихов утицај је ограничен. Хром, манган и цирконијум имају ојачавајући утицај на легуру али њихов главни задатак је да контролишу напонску корозију, док титанијум и бор имају улогу модификатора. Укупна количина цинка, магнезијума и бакра одређује својства легуре па према томе и њену употребу. Уколико је укупна количина ових елемената преко 9% чврстоћа је доминантна али су отпорност на корозију, обрадивост и заварљивост подређене у односу на високу чврстоћу. Ако је количина ових елемената између 6-8% чврстоћа је и даље висока али су обрадивост и заварљивост знатно бољи. Количина од 5-6% ових елемената обезбеђује најбољу обрадивост, а осетљивост на напонску корозију практично нестаје.

*Утицај електромагнетног поља током ливења на карактеристике одливака  
алуминијумских легура*

У скоро свим алуминијумским легурама, алуминијум формира чврст раствор у коме су дисперговане друге фазе. У легурама које су прописно хомогенизоване највећи део цинка, бакра и магнезијума је у чврстом раствору и само мала количина њихових фаза је видљива. Највећи део присутних фаза су на бази гвожђа, силицијума, мангана, хрома и цирконијума. У ливеном или жареном стању присутне су и фазе цинка, магнезијума и бакра, а њихова количина и расподела зависи од брзине хлађења и других легирајућих елемената. Од односа Zn:Mg зависи које ће фазе бити присутне у систему. Ако је овај однос већи од 2 формира се MgZn<sub>2</sub>, а уколико је однос мањи формира се Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub>Al<sub>2</sub> фаза. Бакар се понаша врло слично цинку и највећи део се раствара у поменутиим једињењима. Само у изузетним случајевима јављају се CuMgAl<sub>2</sub>, CuFe или CuMn фазе. На Слици 4. приказане су фазе које се могу појавити у Al-Zn-Mg-Cu систему у зависности од садржаја легирајућих елемената.

Mg	< 1% Mg in solid soln.	Zn:Mg $\ll$ 1 Mg <sub>3</sub> Al <sub>8</sub>	Zn:Mg = 1-2 Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	Zn:Mg > 2.2 MgZn <sub>2</sub>	with Si Mg <sub>2</sub> Si	Cu > Mg CuMgAl <sub>2</sub>	Cr > Mg Cr <sub>2</sub> Mg <sub>3</sub> Al <sub>18</sub>	Mn > Mg (MgMn) <sub>3</sub> Al <sub>10</sub>
Zn	< 3% Zn in solid soln.	> 3% Zn Zn:Mg < 2.2 Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	> 3% Zn Zn:Mg > 2 MgZn <sub>2</sub>	Mn > Zn Mn <sub>3</sub> ZnAl <sub>24</sub>				
Cu	< 1% Cu in solid soln.	> 1% Cu in soln. in MgZn <sub>2</sub> or Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	Cu > Mg CuMgAl <sub>2</sub>	Cu $\gg$ Mg CuAl <sub>2</sub>	Fe > Cu Cu <sub>2</sub> FeAl <sub>7</sub>	Fe + Mn > 1.5% (CuFeMn)Al <sub>6</sub>	Mn > 1% Fe < 0.2% Cu <sub>2</sub> Mn <sub>3</sub> Al <sub>20</sub>	
Fe	Fe $\gg$ Si FeAl <sub>3</sub>	Fe < 3 Si Fe <sub>2</sub> SiAl <sub>8</sub>	Si < Fe Mn > 1/2 Fe (FeMn)Al <sub>6</sub>	Si < Fe Cr > 1/2 Fe (FeCr)Al <sub>7</sub>	Si > Fe Mn > 1/2 Fe (FeMn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> Al <sub>15</sub>	Si > Fe Cr > 1/2 Fe (CrFe) <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> Al <sub>13</sub>	Fe > Cu Si, Mn, Cr < 1/5 Fe Cu <sub>2</sub> FeAl <sub>7</sub>	
Si	Mg <sub>2</sub> Si Si $\ll$ Mn	Mg > 3 Zn Fe <sub>2</sub> SiAl <sub>8</sub>	Zn > 5%, Si > 3 Fe Si > Fe, Mg < 3 Zn Mn > 1/2 Fe (FeMn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> Al <sub>15</sub>	Si > Fe, Mg < 3 Zn Cr > 1/2 Fe (CrFe) <sub>4</sub> Si <sub>4</sub> Al <sub>13</sub>				
Mn	(FeMn)Al <sub>6</sub>	Mn > Cu, Fe < Mn Cu <sub>2</sub> Mn <sub>3</sub> Al <sub>20</sub>	Si > Mn Zn > 5% (FeMn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> Al <sub>15</sub>	Cr = Mn (CrMn)Al <sub>12</sub>	Mn > Mg Fe < Mn (MgMn) <sub>3</sub> Al <sub>10</sub>	Mn > Zn Mn <sub>3</sub> ZnAl <sub>24</sub>		
Cr	Si < Cr (CrFe)Al <sub>7</sub>	Mn = Cr, Fe < Mn (CrMn)Al <sub>12</sub>						
Zr	No Cr, Mn ZrAl <sub>3</sub>	Mn > Zr in soln. in MnAl <sub>6</sub>	Cr > Zr in soln. in CrAl <sub>7</sub>					

Слика 4. Присутне фазе у легурама серије 7xxx [1]

Легура EN AW 7075, (AlZn5,5MgCu), која је коришћена у експерименталном делу рада, припада серији алуминијумских легура 7xxx. Њена добра механичка својства сврстали су је у ред једне од најкоришћенијих легура алуминијума. Позната је по високим механчким својствима као и отпорношћу на замор и корозију. Нашла је примену у скоро свим гранама индустрије као што су аутомобилска, авио и војна

индустрија и користи се за израду високо одговорних делова. Главни легирајући елемент код ове легуре је Zn, растворљивост Zn у алуминијуму дата је у Табели 1.

Табела 1. Растворљивост Zn у чврстом раствору алуминијума [1]

Температура, К	Максимална растворљивост у чврстом раствору	
	Wt %	At%
350	2.5	1.25
400	6.2	2.80
450	11.5	5.50
500	18.0	8.00
548	31.6	15.90
600	43.5	24.00
613	49.0	28.80
624	61.3	38.70
716	70.0	49.30

Основни легирајући елементи цинк, магнезијум и бакар имају велику растворљивост у чврстом раствору у алуминијуму. С обзиром да су ови елементи присутни у већем уделу њихов утицај на природу и количински удео интерметалних фаза је одлучујући. Додатни легирајући елементи хром и манган су присутни у малим количинама што смањује вероватноћу појаве интерметалних фаза на бази ових елемената. Од свих присутних елемената најнижу растворљивост има железо па је овај елемент одлучујући за количину нерастворних интерметалних фаза са атомима других присутних елемената. Хемијски састав легуре EN AW 7075 дат је у Табели 2.

Табела 2. Хемијски састав легуре EN AW 7075 по стандарду EN 573-3 [8]

Елемент wt %	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
мин	0.0	0.0	1.2	0.0	2.1	0.18	5.1	0.1
макс	0.4	0.4	2.0	0.3	2.9	0.28	6.1	0.2

Основна физичка својства легуре дата су у Табели 3.

Табела 3. Физичка својства легуре EN AW 7075 [8]

Карактеристика	Вредност
Густина (20 °C)	2800 kg/m <sup>3</sup>
Тачка тлопљења	480 – 635 °C
Топлотна проводљивост (20 °C)	130 W/mK
Модул еластичности	71000 МПа

Главна механичка својства легуре приказана су у Табели 4.

Табела 4. Механичка својства легуре EN AW 7075 [8]

Карактеристика	Вредност
Затезна чврстоћа	530 МПа
Граница течења	460 МПа
Издужење	7 %
Тврдоћа (20 °C)	135 НВ

### 3. ТЕХНОЛОШКИ ПОСТУПАК ПРОИЗВОДЊЕ И ПРЕРАДЕ АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА

#### *Топљење алуминијума*

Вертикално континуирано ливење са директним хлађењем (Direct Chill casting или DC casting) је најчешће коришћен начин производње алуминијумских одливака. Овај поступак се користи више деценија, а одликује се ливењем већег броја одливака одједном у кристализаторима који су фиксирани у ливној плочи. Процес започиње топљењем метала у пећима које могу бити на течном или гасном гориву, електроотпорне или индукционе. Избор пећи зависи од технолошког поступка, капацитета, финансијских могућности и др. Употреба индукционих пећи је све више у употреби јер су поуздане, лаке за коришћење и омогућавају добру контролу температуре. У односу на пећи које користе гасно или течном гориво имају предност јер је смањен унос неметалних укључака и оксида у лив. Гасне пећи су се показале

као економичније једино када су потребе ливења веће од 20 t. Пре самог ливења мора се постићи састав жељене легуре. Шаржу углавном чине рециклирани повратни материјал, примарни алуминијум, предлегура и мастер легуре. Легирање алуминијума се у већини случајева врши мастер легурама. Оне представљају комбинацију легура или мешавине елемената додатих у пећ за добијање одређеног хемијског састава или да доведу до специфичних реакција као што су дезоксидација, десулфуризација, дегазација или модификација. Мастер легуре треба да имају:

- нису температуру топљења;
- хомогену расподелу легирајућих елемената;
- мали степен оксидације;
- отпорност према корозији.

Алуминијумске мастер легуре могу бити:

- рафинатори зрна који садрже титан са или без бора који контролишу структуру до добијања финих зрна у ливеној структури, а резултат је добијање бољих механичких својстава;
- модификатори у Al-Si легурама који мењају микроструктурне особине метала повећавајући чврстоћу и смањујући кртост;
- елементи који ојачавају и са променом хемијског састава метала повећавају чврстоћу и отпорност на хабање;
- алуминијумске легуре са берилијумом врше контролу оксидације лива стварајући танак слој оксида на површини.

У индустријским условим обично постоје пећи за дораду лива у које се сипа предходно истопљен метал у примарним пећима.

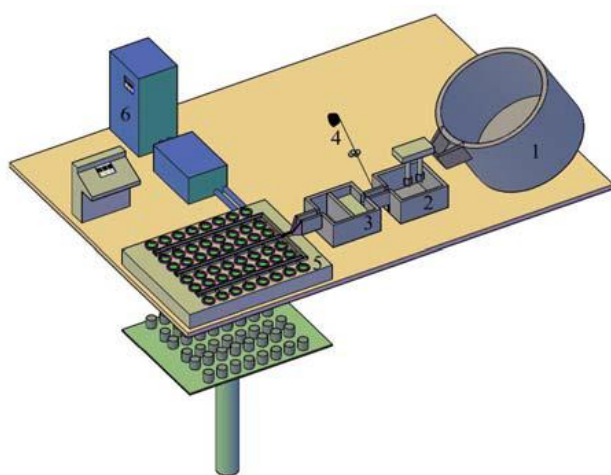
### ***Полуконтинуирани поступак ливења алуминијумских легура***

Најчешће коришћен начин ливења алуминијумских легура је полуконтинуирано ливење са директним хлађењем (DC casting). Овим поступком може се истовремено одлити већи број трупаца у алуминијумским кристализаторима који су фиксирани у ливној плочи, док се дно очврслих трупаца помера на доле [9]. Померање дна врши



се помоћу хидрауличног клипа чији максимални ход одређује дужину трупаца. Само хлађење кристализатора врши се директним протоком воде. Одржавање нивоа лива у кристализаторима врши се помоћу топлих глава (Hot-Top system) или помоћу дизни са пловком (Open-Top system).

Податак да производња алуминијумских легура све више расте говори и о значају усавршавања њихове производње. У том смислу постоји интерес за изучавањем процеса који утичу на формирање хомогеније структуре, а тиме и на побољшање механичких својстава легура. Примена механичких вибрација и ултразвука су неке од метода које се данас замењују употребом електромагнетног поља. На слици 5. дат је шематски приказ полуконтинуираног процеса ливења у елктромагнетном пољу.



1. Пећ
2. Дегазација
3. Филтер
4. Модификатор
5. Ливна плоча
6. Контролно управљачки систем

Слика 5. Шематски приказ полуконтинуираног процеса ливења [10]

### *Дегазација*

Алуминијумски лив увек садржи одређену количину нечистоћа и гасова (водоник, алкални метали, алкалне соли и други неметални укључци) који имају штетан утицај на квалитет алуминијумских одливака. Поступком дегазације врши се уклањање заосталих гасова из лива. Водоник значајно учествује у стварању порозности. У самом ливу може се јавити примарна или интердендритна порозност и

---

секундарна порозност. Примарна порозност се јавља када је концентрација водоника висока и она се неунформно распоређује у самом металу. Ова врста порозности је врло непожељна јер изазива пуцање приликом топле прераде. За разлику од примарне секундарна порозност садржи fine поре које су унформно распоређене. Оне се могу повећати приликом жарења али генерално нису толико опасне као примарне. Из ових разлога количина водоника у ливу треба да се смањи на најмању могућу меру, имајући у виду чињеницу да се растворљивост водоника повећава са порастом температуре, односно водоник је много више растворљив у течном него у чврстом стању. Висока концентрација водоника може потицати из:

- пећне атмосфере, ово је више изражено код гасних пећи где се већа количина водоника може појавити услед непотпуног сагоревања горива;
- шаржа, инготи и секундарни материјал могу садржати оксиде и разне нечистоће;
- соли које се користе за третирање алуминијумског лива, оне су хигроскопне, а водоник може настати разлагањем влаге;
- реакција између лива и кокиле, услед турбулентног кретања лива приликом изливања водоник може бити усисан из ваздуха.

Од поступака за дегазацију најчешће се примењује SNIF поступак (Spining nozzle inert flotation). Он се заснива на проласку смеше гасова кроз течни лив у ливном каналу непосредно пре уливања у калуп или кристализатор, да би се смањила могућност поновног растварања водоника у течном ливу. Смеша гасова се обично састоји од 95% аргона и 5% хлора. Лив из пећи пролази кроз дегазатор, позиција 2 на Слици 5. Дегазатор се састоји из две ротирајуће графитне осовине које кроз средину имају канале за довођење инерног гаса под притиском. Графитне осовине су повезане са електромотором а на својим крајевима имају проширење ради ефикаснијег мешања и веће контактне површине са ливом. Аргон који улази у лив кроз поре осовине везује за себе елементарни водоник и преноси га у шљаку на површину лива. У реакцији са хлором уклањају се алкални метали. Степен дегазације односно уклањања нечистоћа из течног лива зависи од почетне концентрације водоника, времена проласка гаса кроз лив и интензитета мешања, а може се приказати једначином (1).

$$\frac{\ln(\%H)}{\%H_i} = \frac{H \cdot \rho_w \cdot K_m \cdot A \cdot t}{W} \quad (1)$$

Где су:

$\% H_i$ - почетна концентрација водоника у ливу;

$\% H$ - концентрација водоника у времену  $t$ ;

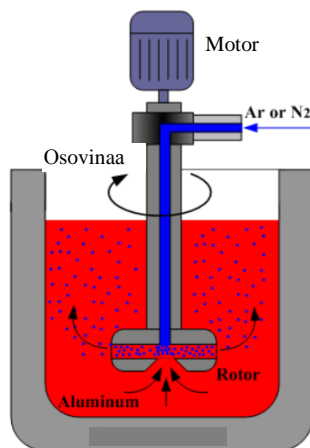
$K_m$ - коефицијент преноса масе водоника у  $\text{kmol/m}^3$ ;

$\rho_w$ - густина течног метала у  $\text{kg/dm}^3$ ;

$A$ - површина гасних мехурова у  $\text{mm}^2$ ;

$W$ - маса металног лива у  $\text{kg}$ .

Параметри  $A$  и  $K_m$  се повећавају са смањењем величине гасних мехурова тако да се степен уклањања водоника повећава са смањењем величине рупа на графитној глави. Степен дегазације још зависи и од почетне концентрације водоника, што је већа иницијална концентрација водоника већи је степен дегазације.

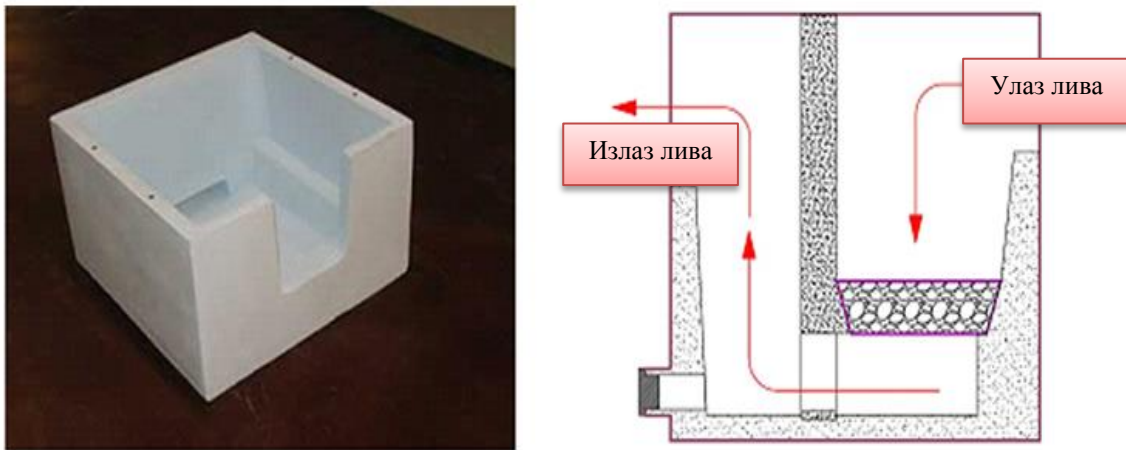


Слика 6. Шематски приказ SNIF процеса [11]

### **Филтрирање лива**

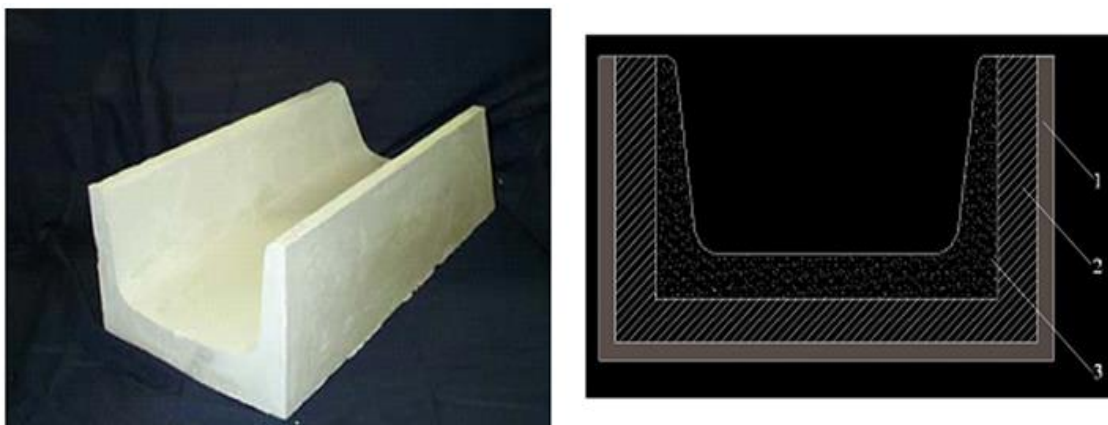
Из дегазатора лив даље иде на филтрирање у филтер бокс, позиција 3 на Слици 5. Ту се лив филтрира од крупнијих честица и неметалних укључака. Филтери су сифонског типа са хоризонталним полагањем филтера, а облога је од синтерованог

ватроотпорног материјала. Шематски приказ филтер бокса дат је на Слици 7. Облога треба да буде отпорна на температурне шокове, велике механичке чврстоће и инертна према алуминијумским легурама и неерозивна. Филтер боксови се загревају како би се елиминисала сва везана вода из материјала. Сам филтер се прави од минерала алуминијума велике чистоће који има добру механичку чврстоћу, отпорност према агресивном деловању течног алуминијума и мале температурне дилатације. Филтер треба да идеално належе у лежиште носача како би се спречило цурење лива. Финоћа филтера може бити различита у зависности од индустријских потреба.



Слика 7. Шематски приказ филтер бокса [10]

Транспорт лива се врши ливним каналима који су прилагођени конкретној ситуацији и захтевима. Носачи и оклоп канала су израђени од металног лима на који се поставља изолација. Изолација се прави од силицијум диоксида и глинице и карактеришу се dobrим изолационим својствима: отпорни су на хемијске агресивне супстанце, нису електро проводници, слабо пропуштају ваздух и не смеју бити ерозивни како би се смањила појава укључака у металу.



Слика 8. Канал за транспорт лива [10]

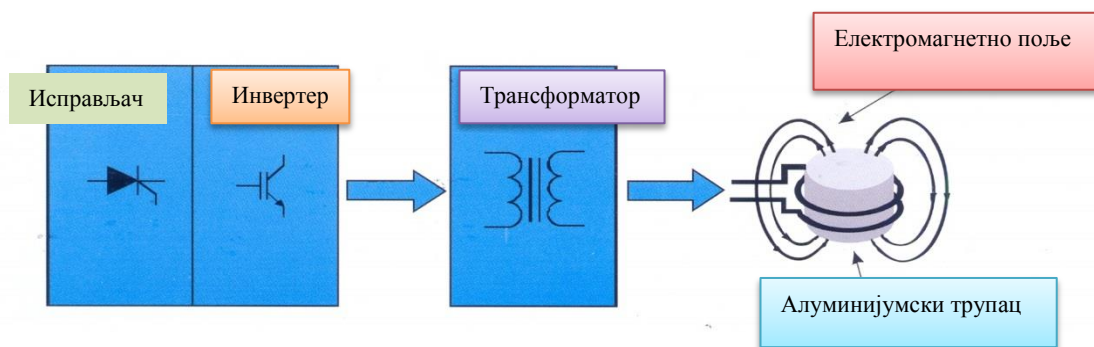
### **Модификација зрна**

Пре поступка филтрације у лив се додаје модификатор (позиција 4 на Слици 5.) ради рафинације или уситњавања металних зрна. За разумевање процеса модификације потребно је претпоставити да су процеси нуклеације и раста клица основа без које је немогуће објаснити механизам деловања модификатора. Према садашњим поставкама модификатор у малим концентрацијама реагује са једном од компоненти легуре и образује хемијско једињење типа тешко топљивих честица, чија је температура топљења виша од температуре топљења легуре каја се модифицира, или се адсорбује на границама растућих кристала и тиме спречава њихов даљи раст. У првом случају тешко топиве честице служе као вештачки центри кристализације. На основу тога може се закључити да се механизам модифицирања у принципу своди на повећање броја центара кристализације, што води стварању ситнозрне структуре, али и на отежавање раста примарних кристала адсорпцијом честица модификатора на границама кристала чиме се инхибира њихов раст и тиме смањује величина. Линеарна брзина раста примарних кристала у модифицираном стању, мања је него у немодифицираном, па се из тих разлога употребом одговарајућег модификатора овим кристалима стомира раст. Познато је и да се додатни ефекти у процесу модификације постижу дегазацијом, вибрацијом растопа, третирањем ултразвуком као и

центрифугирањем. Истраживања [12] показују да присуство растворених гасова у растопу утиче на добијање грубе структуре, а да дегазација позитивно утиче на уситњавање структуре и побољшање ефеката модификације. Дејство вибрација и ултразвучних таласа повећава вероватноћу спонтаног стварања центара кристализације. За модификацију алуминијумских легура углавном се користи TiB жица. Ово једињење се додаје у виду алуминијумске предлегура са 5% садржаја модификатора. Предлегура је у облику жице ради лакшег дозирања и контроле легирања. Додавање модификатора се врши у ливном каналу, а никако у пећи јер се тада постижу најбољи ефекти и равномерно растварање жице у ливу. Потребна количина модификатора зависи од више фактора: врсте легуре која се лије, количине лива, жељеног степена рафинације и намене полупроизвода. Обично се додаје 0.05-0.2 % рачунато на укупну количину лива. Титанијум образује fine честице типа  $TiAl_3$  или титанијум карбида које су fino дисперговане у растопу матала и служе као катализатори нуклеације. Приликом ливења у електромагнетном пољу смањује се количина модификатора, што је изузетно повољно са становишта количине титанијума у легури. Као други модификатор може се користити и стронцијум у предлегури али се он додаје у пећи непосредно пре ливења и обично се користи за легуре алуминијума са силицијумом. Број клица на зиду калупа утиче на величину зрна у ливеном стању. Модификатори мењају особине површине растопа, нарочито особине оксидних филмова и неметалних супстанци на површини растопа, као и особине квашења зида калупа растопом метала. Ова промена особина површине растопа веома утиче на нуклеацију и одвајање кристала од зида калупа током очвршћавања. Применом процеса модификације у изради легура долази до промена у величини, облику и распореду кристала што за последицу има промену механичких и технолошких својстава: ливкост, смањује се склоност ка пуцању на топлотом, смањује се порозност услед скупљања, а мања је и недоливеност. Неки елементи који се налазе у самом ливу могу смањити модификацију. Хром је један од њих јер се слабо раствара у алуминијуму и може сегрегирати на међуповршини. Хром-борид је мање стабилан него  $TiB_2$  и тако може раздвојити титанијум што доводи до слабије модификације.

### 3.1 Електромагнетни поступак ливења

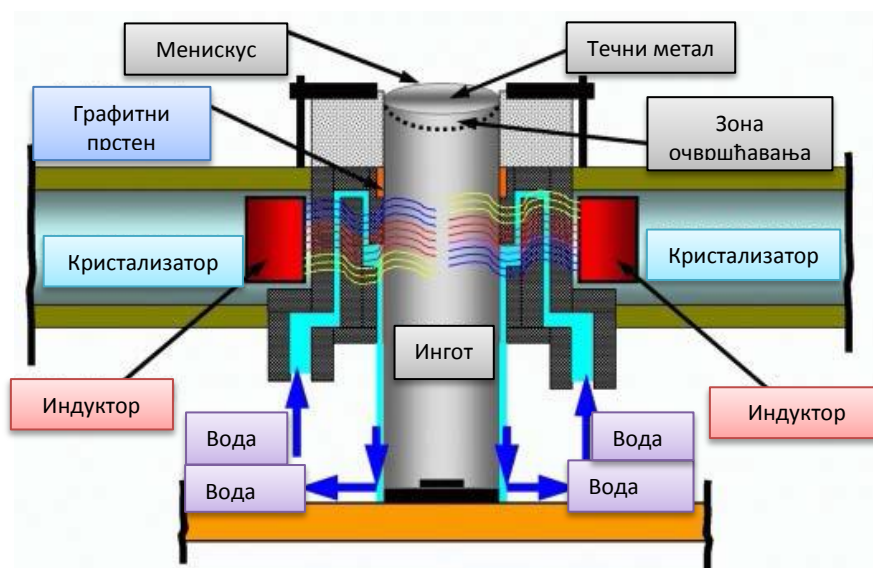
Наведени поступци спадају у припремне поступке, а само ливење се врши у ливној машини која се састоји од ливне плоче, претварача, трансформатора и пратеће опреме. Електрични напон из мреже се исправља, инвертује и потом трансформише у жељену фреквенцију и напонски ниво. Око сваке кокиле у ливној плочи постоје намотаји на које се доводи прилагођена електрична енергија. Трансформатор има улогу галванског раздвајања и снижавања радног напона у циљу безбедног рада. Претварач се састоји из високопоузданих и најмодернијих транзистора. Претварач и трансформатор се хладе водом. На Слици 9. приказана је блок шема уређаја.



Слика 9. Енергетска блок шема [10]

Потрошња електричне енергије је 3-5 kW по кокили зависно од легуре и величине ингота. Од уливног места лив се по ливној плочи разводи керамичким каналима, прво централним а потом посебним до сваког клистаризатора. Керамичка топла глава на клистаризатору има улогу да одржава константан ниво лива и стабилну температуру лива. Топла глава налаже на графитни прстен, чији је отвор мањег пречника него што је пречник кристализатора, да би делимично раздвојио лив у топлој глави од материјала у кристализатору који почиње да очвршћава. Ово је врло битно код ливне плоче са електромагнетним пољем јер је ту присутно интезивно мешање лива. Кристализатор је направљен од алуминијума, а у свом горњем делу где

је највећи контакт са растопом постављен је графитни прстен који спречава локално лепљење материјала што позитивно утиче на квалитет површине ингота. Кристализатори се са споље стране хладе контактано, а према излазној страни имају по обиму избушене отворе кроз које протиче вода која хлади и кристализатор и ингот. У унутрашњости ливне плоче око сваког кристализатора се налазе намотаји који генеришу електромагнетно поље. Намотаји су постављени тако да је електромагнетно поље најјаче у зони графитног прстена где је процес кристализације најзначајнији. Намотаји су међусобно повезани тако да су из плоче изведена само два прикључка за напајање. Плоча се електричном енергијом напаја из електричног фреквентног претварача (детаљ 6 на Сlici 5.), који електрични напон из мреже претвара у напон одговарајућег нивоа, таласног облика и учестаности. Фреквенција је променљива величина и подешава се зависно од типа легуре [13]. Напајање на ливну плочу иде преко трансформатора који има улогу да трансформише електричну енергију на напон мањи од 50V (што представља безбедни ниво), и да истовремено подигне струју на високе вредности како би се генерисало јако електромагнетно поље.



Слика 10. Шематски приказ кристализатора са електромагнетним пољем [10]



### **3.2 Хомогенизационо жарење алуминијумских легура**

Хомогенизација или дифузионо жарење је поступак термичке обраде који се користи за добијање хомогеније микроструктуре ливених ингота, а самим тим и побољшање механичких својстава као и могућности пластичне прераде. Дифузионо жарење има за циљ отклањање дендритних сегрегација које су типичне за ливену микроструктуру. Дендритна сегрегација која се јавља услед неравнотежних услова кристализације, испољава се у виду хемијске микронехомогености унутар кристала чврстог раствора и појави неравнотежних секундарних фаза. Дифузионо жарење [14] се изводи на температури која се налази у температурном интервалу између солвус и солидус линије легуре. При томе се, обзиром на присуство неравнотежног еутектикума у структури ливене легуре, температура хомогенизације смешта у подручје испод еутектичке температуре, тј испод температуре топљења неравнотежног еутектикума. Температуре дифузионог жарења већине техничких легура алуминијума креће се у интервалу од 450°C до 520°C, а држање на температури жарења износи од 4 до 30 часова. После држања на одређеној температури изводи се контролисано хлађење. При условима неравнотежне кристализације, због слабе дифузије у чврстој фази, не долази до изједначавања састава у погледу садржаја легирајућих елемената између првобитно насталих слојева кристала и касније образованих слојева кристала. На тај начи, микроструктура очврсле легуре састоји се из нехомогених кристала  $\alpha$  - чврстог раствора и неравнотежног еутектикума. Анализа састава дендритних ћелија показује да су спољашњи слојеви кристала много богатији легирајућим елементом у односу на унутрашње слојеве кристала.

Као последица структурних промена односно удаљавања од равнотежног стања у процесу кристализације техничке ливене легуре имају следеће основне недостатке:

- пластичност ливене легуре се смањује ако се као последица дендритне сегрегације у структури појављује неравнотежна крта фаза у облику грубих честица смештених на границама дендритних ћелија;

- у току процеса пластичне деформације микроподручја различитог хемијског састава могу да доведу до појаве тракасте структуре, односно анизотропије особина;
- како дендритна сегрегација снижава температуру солидус линије легура, па у случају брзог загревања пред каљење или механичку прераду, може да дође до делимичног топљења делова у чијој се микроструктури налази неравнотежни еутектикум;
- унутаркристална сегрегација чврстог раствора снижава отпорност легуре према електрохемијској корозији, јер долази до образовања микрогалванских парова због разлике у хемијском саставу унутрашњих и спољашњих слојева дендритних ћелија;
- структура и особине ливене структуре нису постојани са временом. У току рада на повишеним температурама у структури легуре започињу процеси који постепено мењају особине, често и изван допуштених граничних вредности.

Основне структурне промене при дифузионом жарењу састоје се у изједначавању састава чврстог раствора и делимичног или потпуног растварања неравнотежних фаза. У основи ових процеса лежи дифузија.

Изједначавање састава унутар  $\alpha$ -фазе доводи до смањивања његове концентрације на граници са  $\beta$ -фазом тако да периферни слој дендритне ћелије постаје незасићен у односу на  $\beta$ -фазу. Зато се  $\beta$ -фаза раствара и поново подиже концентрација у периферном слоју  $\alpha$ -раствора до равнотежне концентрације. На тај начин се  $\alpha/\beta$  граница постепено помера у страну  $\beta$ -фазе која се раствара све више, а састав  $\alpha$ -фазе се по пресеку дендритне ћелије изједначава. Ако је легура према дијаграму стања двофазна, тада се при хомогенизацији раствара вишак неравнотежне секундарне фазе тако да после жарења остаје у структури њена одређена равнотежна количина.

Брзину дифузије карактерише коефицијент дифузије  $D$ . Он зависи од природе легуре, врсте и састава чврстог раствора, величине зрна, а посебно од температуре. Температурна зависност одговара експоненцијалном закону:

$$D = A \cdot \exp^{-Q/RT} \quad (2)$$

Где су:

*Q*- енергија активације

*R*- гасна константа

*A*- константа која зависи од типа кристалне решетке

Енергија активације интерстицијских елемената је мања у односу енергију активације дифузије супституцијских елемената који из овог разлога дифундују много спорије. Са друге стране енергија активације дифузије уздуж граница зрна је мања него у зрну, тако да се у ситнозрној структури са развијеном граничном површином дифузија одиграва много брже него у крупнозрној легури.

Температура која улази у израз за коефицијент дифузије указује да релативно мало повећање температуре може знатно да убрза дифузију. Истовремено брзина дифузионих процеса се смањује са напредовањем хомогенизације структуре при дифузионом жарењу јер се умањује концентрациони градијент. Из овога се може закључити да је хомогенизација структуре најинтезивнија у почетном периоду жарења. Основни параметри жарења су температура и време. Са повећањем температуре или продужавањем времена држања на температури хомогенизација протиче потпуније. Брзина загревања и хлађења при дифузионом жарењу имају другостепени значај.

### **3.3 Пластична прерада**

#### **3.3.1 Пресовање алуминијумских легура**

Алуминијумске легуре и алуминијум спадају у групу највише пресованих материјала. Већина алуминијумских производа који су у комерцијалној употеби потичу од пресованог алуминијума. Сам процес пресовања није ни мало једноставан за контролисање и добијање испресованог профила са жељеним механичким својствима. Осим квалитетног хомогенизованог трупца, температуре реципијента, алата, главни проблем за добијање добрих механичких својстава је температура растворног жарења при изласку профила из пресе са које се кали до собне

температуре. На пример алуминијумске легуре серије 2xxx имају температурни интервал растворног жарења свега 5 °C.

Параметри који утичу на механичка својства алуминијумских профила су :

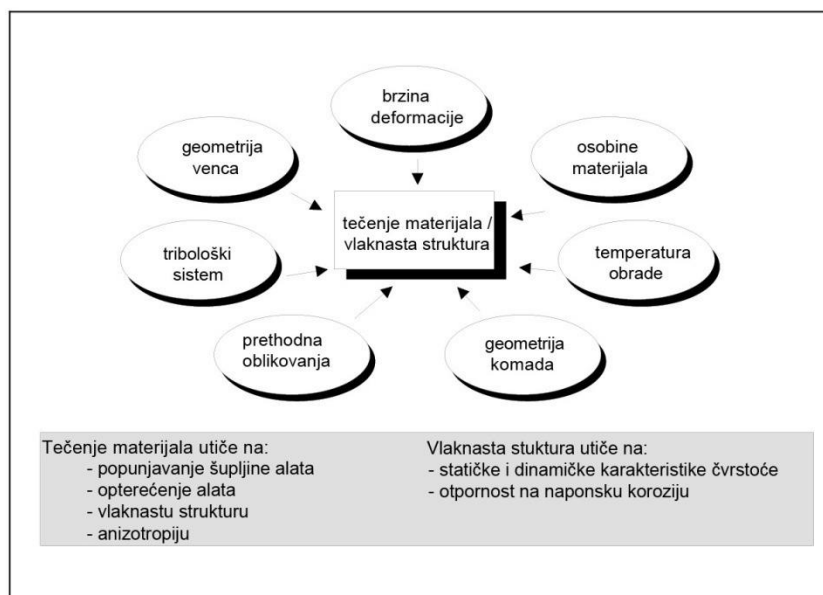
- ливење (грешке у материјалу, микропорозност сегрегације и др);
- термичка обрада -хомогенизација (температура и брзина хлађења);
- каљење профила (врста хлађење и температура са које се хлади);
- хладна прерада и
- старење.

Процес пресовања започиње допремањем материјала на транспортну траку тестере. Тестером се трупци секу на потребну димензију, а максимална величина ограничена је величином реципијента пресе. Исечени трупци се предгревају у пећи, тако да се температура трупаца пре уласка у реципијент пресе креће од 350-510 °C у зависности од врсте легуре. Грејање алата и реципијента врши се ради смањивања површинског трења и равномерније расподеле температуре у току самог процеса. Уколико није постигнута задовољавајућа температура реципијента долази до лепљења материјала за површину услед повећаног трења између површине реципијента и самог материјала. После пресовања алуминијумски профил иде на каљење односно хлађење које се врши воденим млазницама или принудним струјањем ваздуха помоћу вентилатора. Након каљења у наставку процеса профил се исправља (у колико има деформација), сече и шаље у пећ за старење. Старење се врши на два начина: на собној температури, природно старење и на повишеним температурама 120-190 °C, вештачко старење. Старење се врши ради ојачавања материјала на принципу таложног ојачавања. Који ће од ова два начина бити примењен зависи од врсте алуминијумске легуре и намене.

### **3.3.2 Топло ковање алуминијумских легура**

Алуминијумске легуре које су намењене обради топлим ковањем омогућавају добијање делова тачних димензија, квалитетне површине са минималним захтевом за додатну обраду. Степен деформације приликом ковања алуминијумских легура може

бити знатно већи од степена деформације приликом ковања челика или легура бакра. Ковањем алуминијумских легура високе чврстоће омогућава се израда одговорних делова који имају примену у авионској или аутомобилској индустрији. Развој прецизног ковања, на бази традиционалног топлог ковања, омогућава израду компликованих отковака са такозваном влакнастом структуром, која прати контуру отковка који има задовољавајућу микроструктуру и одговарајућа механичка својства. На Слици 11. приказани су фактори који утичу на успешно попуњавање шупљине калупа и квалитет остварене структуре отковака [3].



Слика 11. Фактори који утичу на течење материјала и квалитет отковака [3].

Алуминијумске легуре се могу ковати, распон је велики од чистог алуминијума до легура високе чврстоће, најчешће се кују термички обрадиве легуре средње и високе чврстоће. Алуминијумске легуре које се кују су врло осетљиве на промену температуре ковања. При нижим температурама ковања може доћи до непотпуне рекристализације па самим тим и до деформисане и непожељне микроструктуре. Појава крупних зрна у нехомогеној структури доводи до лоших механичких својстава отковака. Повећавањем степена деформације, у појединим фазама ковања, долази до повећавања чврстоће отковака. Насупрот томе, повећавање температуре ковања и продужавање времена обраде, доводи до смањења чврстоће отковака. Температуре ковања алуминијумских легура зависи од врсте легуре и налазе се у

интервалу од 320 до 480 °С. Алат се мора претходно загрејати, како би се избегла термичка напрезања. Главни проблем приликом ковања алуминијумских легура представља одржавање константне температуре комада нашта битно утиче брзина деформације. Температурни интервали ковања су уски и морају се поштовати. При порасту брзине деформације, део доведене енергије се претвара у топлотну, па се мора водити рачуна о врсти машине на којој се врши обрада (чекићи или пресе). Познато је да температура и брзина деформације имају супротан ефекат на процес ојачања, пораст брзине доводи до пораста напона течења, а већа температура смањује ојачање. Топло ковање алуминијумских легура се обично врши у такозваним отвореним алатима са венцом које подразумева веће додатке за обраду резањем и веће углове ковачких нагиба. Поступак топлог ковања обухвата следеће фазе:

- дефинисање конструкционо – технолошких карактеристика отковка;
- класификација облика отковака;
- анализа процеса ковања у калупу;
- одређивање облика канала за венац;
- одређивање облика и димензија припремка;
- дефинисање термичке обраде;
- дефинисање припремног и завршног ковања;
- дефинисање ковања и калибрисања;
- дефинисање опсецања отковка и чишћење;
- конструкција алата и избор потребне машине и опреме.

При нумеричкој симулацији поједини елементи набројаних фаза представљају улаз у симулацију, односно предмет самог моделовања. На пример, облик канала за венац се бира из препорука, али његова геометрија може бити и измењена, уколико то значајно утиче на течење метала унутар гравуре.

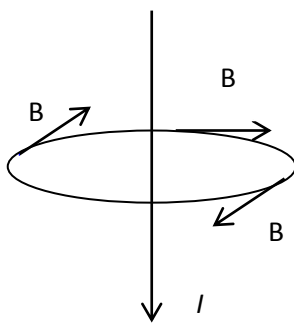
## **4. ЛИТЕРАТУРНИ ПРЕГЛЕД**

### **4.1 Својства и примена електромагнетног поља у металургији**

Електромагнетно поље је физичко поље које се шири кроз простор и које потиче од наелектрисаних честица. Оно описује једну од четири фундаменталне природне силе-електромагнетизам. Може се сматрати комбинацијом електричног и магнетног поља [15, 16].

Наелектрисана честица која се креће изазива у околном простору магнетно поље. То је специјалан облик кретања, чија природа није поуздано позната, (није познато да ли се ради о емитовању специјалних честица из наелектривања у кретању, или о неким променама у структури околине или о једном и другом). Разна кретања наелектривања изазивају магнетно поље, не само транслаторно него и ротационо па чак и око сопствене осе. Свако наелектривање изазива и електрично поље, па се онда види да су електрично и магнетно поље природно нераздвојно повезани. То је у ствари електромагнетно поље али и поред те нераздруживости магнетног и електричног поља могуће их је и одвојено посматрати.

Магнетно поље је оријентисано у зависности од кретања количине електрицитета што га изазивају. Тако се и то поље слично електростатичком може приказивати помоћу магнетних линија сила. Главна карактеристична физичка величина за магнетно поље јесте индукција магнетног поља. То је векторска величина која се обележава са  $\vec{B}$ . Вектор  $\vec{B}$  је увек тангенцијалан на линију силе у тачки где представља поље. Оријентација индукције магнетног поља шематски је приказана на Слици 12.



Слика 12. Оријентација индукције магнетног поља [16]

Правилем десног завртња ( Махвеллово сврдло) одређује се оријентација индукције магнетног поља, што је повезано и условљено оријентацијом струје у

проводнику. Промена врсте (знака) наелектрисања, изазива промену смера вектора  $\vec{B}$  а такође и промену смера кретања, односно смера брзине те наелектрисане честице. Посматрано магнетно поље је поље струјног проводника и наелектрисане честице у кретању. Иначе струјни проводник и наелектрисана честица могу се у разним случајевима налазити и у магнетном пољу, које није њихово, него је за њих спољашње поље, које су изазвали други струјни проводници или друга наелектрисана тела (честице) у кретању односно магнети.

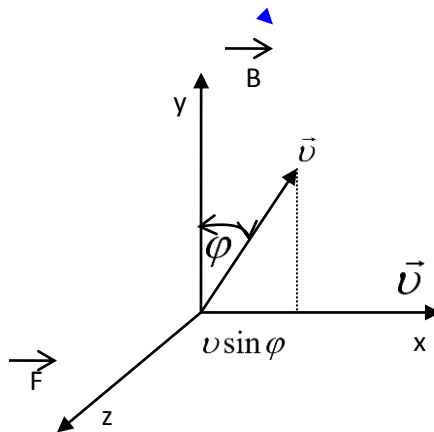
Електромагнетна сила (*Lorentzova електромагнетна сила*) којом магнетно поље индукције  $\vec{B}$  дејствује на наелектрисану честицу количине електрицитета  $e$  која се креће брзином  $\vec{v}$  једнака је производу те количине електрицитета и векторског производа брзине те честице  $\vec{v}$  и вектора индукције  $\vec{B}$  (једначина 3):

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B} \quad (3)$$

Исти закон важи и за кретање ма које количине електрицитета  $q$ , што се може написати на следећи начин:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (4)$$

Шематски приказ тог дејства дат је на Слици 13.



Слика 13. Шематски приказ електромагнетне силе [16]



Израз за електромагнетну силу којом електромагнетно поље дејствује на неку количину електрицитета може се написати следећим изразом:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (5)$$

где је  $\vec{E}$  јачина електричног, а  $\vec{B}$  индукција магнетног поља. Ова сила је такође Лоренцова сила и треба имати у виду да она представља векторски збир одговарајућих компонената. Еквивалентно, закон Лоренцове силе може се изказати и у следећем облику:

$$\vec{F} = \int_V (\rho\vec{E} + \vec{J} \times \vec{B}) \cdot d\vec{V} \quad (6)$$

где је  $\rho$  густина наелектрисања, а  $J$  густина струје.

У металуршким процесима електромагнетно поље може бити искоришћено у различите циљеве:

- као средство интензификације процеса преноса масе и топлоте у растопу што омогућава скраћивање времена припреме метала и побољшање његовог квалитета;
- као средство остваривања нових технолошких процеса и
- као средство контроле и управљања различитих типова појава везаних са магнетохидродинамичким и топлотним нестабилностима.

Електромагнетно поље има примену [17-23] као физичко средство за управљање процесом кристализације у циљу контролисања структуре при очвршћавању, рафинацију метала, смањење количине гасова и неметалних укључака.

Теоријски основи електромагнетне обраде метала заснивају се на теорији металуршких процеса и магнетохидродинамици која обухвата електромагнетизам и механику флуида. То је поље науке које изучава интеракцију електромагнетног поља и феномена струјања флуида. Највећи број метода електромагнетне обраде метала заснован је на коришћењу електромагнетне силе. У најпростијем случају то је сила која делује на проводник кроз који протиче електрична струја, а који је смештен у

магнетно поље. Уколико сада замислимо да уместо чврстог линеарног проводника имамо одређену запремину металног растопа кроз који протиче електрична струја, можемо ову запремину мисаоно поделити на елементарне проводнике тако да на сваки од њих, при узајамном деловању електричне струје и магнетног поља аналогно линеарном чврстом проводнику делује електромагнетна сила. Овде је важно напоменути да ова појава нема никакве везе са магнетним привлачењем, сви растопи метала су практично немагнетни, него је за коришћење електромагнетне силе важно само то да је средина електропроводна. Фундаментална поставка електромагнетне обраде метала превасходно води рачуна о универзалним својствима електромагнетног поља и специфичних последица које оно изазива у зависности од начина његове примене и техничко технолошких карактеристика примењених уређаја при чему није од примарног значаја врста метала који се обрађује [20]. Са друге стране, приказу примене електромагнетног поља у металуршким процесима се прилази са аспекта специфичности технолошких поступака и особина различитих металних система као на пример, алуминијума и његових легура, бакра и његових легура, гвожђа и челика.

Литературни подаци [24] показују да полуконтинуирани поступак ливења под дејством електромагнетног поља има низ предности у односу на конвенционалне поступке ливења. Наиме електромагнетне силе које настају интеракцијом вртложних струја индукованих у металу са магнетним пољем индуктора, изазивају: већи проток флуида, принудну конвекцију, равномерно температурно поље и слабији утицај гравитације. На овај начин се мењају услови очвршћавања. Добијени инготи су квалитетнији, структура је финија и униформнија по пресеку са смањењем сегрегација легирајућих елемената и порозности. Осим тога, због смањеног контактеног притиска (што је такође последица деловања електромагнетног поља) између калупа и метала, квалитет површине је побољшан тако да није потребна већа додатна машинска обрада. У свету постоје одређена истраживања [25-30] у циљу испитивања утицаја електромагнетних и магнетнохидродинамичких појава у алуминијумским одливцима, али је мало пажње посвећено карактеризацији микроструктуре и механичких својстава.

Приликом ливења у присуству електромагнетног поља наизменична струја генерише временски променљиво магнетно поље у истопљеној маси што опет повећава индуковану струју у истопљеној маси и инготу. Стога је истопљена маса подвргнута електромагнетним силама које су проузроковане интеракцијом индуковане струје и магнетног поља. Лоренцова сила присутна у систему, [29], састоји се из два дела изражена на следећи начин:

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} = -\nabla \left( \frac{1}{2} \mu \vec{B}^2 \right) + \frac{1}{\mu} (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} \quad (7)$$

Где је:

$B$  -интезитет магнетне индукције

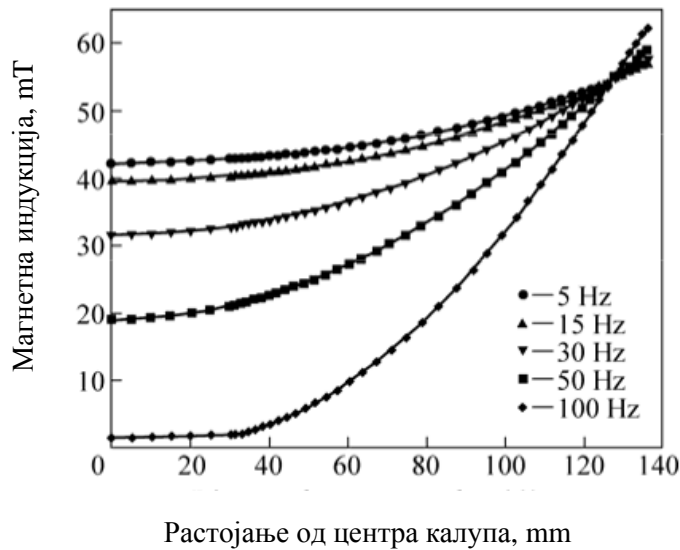
$J$  -густина струје генерисана у истопљеној маси,  $A/m^2$

$\mu$  -пермеабилност истопљене масе,  $H/m$

$\nabla$  -набла или Хамилтонов оператор

Први члан десне стране једначине (7), (вертикална компонента), је обрнута компонента што има за резултат принудну конвекцију и проток у истопљеној маси. Други члан, (хоризонтална компонента), су потенцијалне силе уравнотежене са статичким притиском истопљене масе што има за резултат формирање конвексне површине и смањење контактне притиска између калупа и метала те изостају периферна зона метала нехомогене структуре као и механички дефекти на површини ингота. У свету су вршена истраживања у циљу испитивања утицаја електромагнетних и магнетно- хидродинамичких појава у алуминијумским одливцима, али је врло мало пажње посвећено микроструктурној карактеризацији.

Друга теорија утицаја електромагнетног поља на квалитет одливака односи се на такозвани „skin“ ефекат (дубина продирања магнетног поља у растопу) магнетног поља и струје. Утицај фреквенције електромагнетног поља на интезитет магнетног поља унутар кристализатора, односно растопа приказан је на Слици 14.



Слика 14. Магнетна индукција у растопу после успостављања електромагнетног поља при различитим фреквенцијама [31]

Са слике се види да при опадању фреквенције магнетног поља интензитет магнетног поља ка центру кристализатора расте тако да ниске фреквенције магнетног поља имају јак утицај на карактеристике растопа метала. За разлику од конвенционалног континуираног поступка ливења са директним хлађењем у кристализаторима, ливење легура у присуству електромагнетног поља се одвија у полутечном (кашастом) стању услед нижих температура, што у већини процеса ливења повећава број центара нуклеације и побољшава рафинацију микроструктуре.

Дубина продирања електромагнетног поља унутар растопа [32],  $\delta$  (“дубина скина”), може се изразити преко једначине (8):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma \mu f \pi}} \quad (8)$$

Где је:

$\sigma$  –електрична проводљивост (једнака је реципрочној вредности специфичне електричне отпорности),

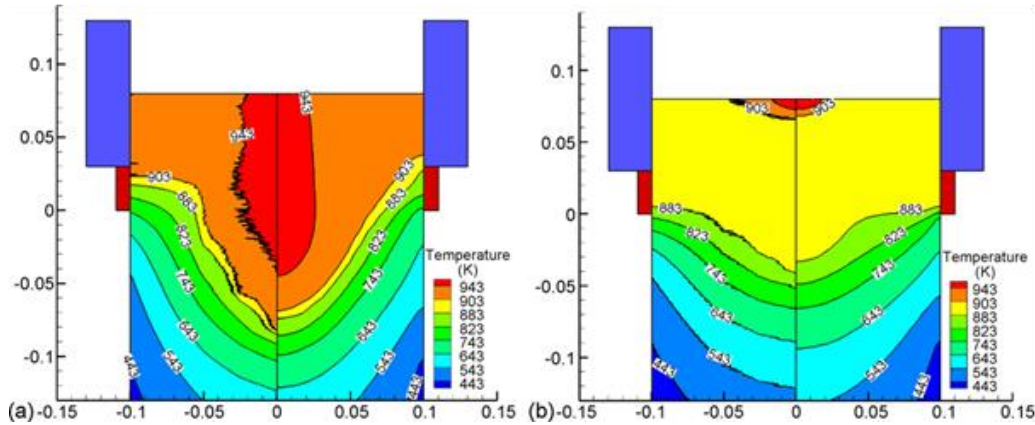
$\mu$  -је пермеабилност течног метала и

$f$  -је фреквенција.

Из једначине се види да када је радна фреквенција релативно велика (50Hz и више), дубина продирања електромагнетног поља је мала и густина деловања сила је значајно концентрисана на површини растопа. Са смањењем фреквенције долази до пораста деловања и интензитета електромагнетног поља, индукционе струје, а тиме и густине Лоренцових сила кроз масу растопа, што доводи до доминације ротационог дела силе и успоставља се принудно струјање унутар растопа. Са даљим смањењем фреквенције (мање од 20Hz) густина магнетног флуksа је релативно уједначена по пресеку растопа, а ротациона сила опет слаби, тако да је дистрибуција легирајућих елемената по маси одливка неуједначена [24].

Овде је значајно да се спомене и укаже на појаву издвајања крте еутектичке фазе са ниском тачком топљења на границама зрна, која је богата легирајућим елементима. На основу расподеле удела легирајућих елемената, при ливењу без електромагнетног поља количина ове еутектичке фазе је много већа него са присуством електромагнетног поља и распоређена је по ободу одливака гдје постоји повећана концентрација легирајућих елемената. Појава ових микросегрегација у структури значајно погоршава механичка својства алуминијумских легура, нарочито особину отпорности материјала ка појави прслина. Код ливених легура са присуством електромагнетног поља ова еутектичка фаза знатно је тања по границама зрна што значајно повећава механичка својства ливеног ингота.

Нумеричком симулацијом и мерењем утврђен је утицај електромагнетног поља на температурни градијент унутар растопа током ливења легура, Слика 15. Са ове слике се види да је расподела температуре много униформнија унутар растопа приликом ливења алуминијумских легура у присуству електромагнетног поља него код класичног поступка ливења без дејства електромагнетног поља. [33-34].



Слика 15. Температурна поља мерена код конвенцијалног континуираног поступка ливења (a) и код ливења у присуству електромагнетног поља (b) [33]

Утицај електромагнетног поља може се понекад изразити и преко густине електромагнетног поља. Магнетни флуks или магнетни ток, који се представља грчким словом  $\Phi$ , је физичка величина која описује магнетно поље у околини покретног наелектрисања. Уколико магнетно поље замишљамо помоћу магнетних линија сила које се шире у простору, тада је флуks број линија која пролази кроз неку затворену контуру. SI јединица за магнетни флуks је Wb (Вебер), Vs (Волт секунд), док је јединица која описује индукцију магнетног поља  $\text{Wb/m}^2$  или T (Тесла). Магнетни флуks кроз елемент нормалан у односу на смер магнетне индукције (или магнетног поља) је производ вредности магнетне индукције и елементарне површине. Уопште магнетни флуks је дефинисан скаларним производом вектора магнетне индукције и вектора магнетне површине. Гаусов закон магнетизма један од четири Максвелове једначине, говори да је магнетни флуks кроз затворену контуру једнак нули. Овај закон је последица тога што се магнетски дипол не може раставити на елементарне половине северни и јужни пол. Магнетни флуks се дефинише као интеграл магнетне индукције кроз неку површину:

$$\vec{\Phi}_m = \iint \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad (9)$$

где је:

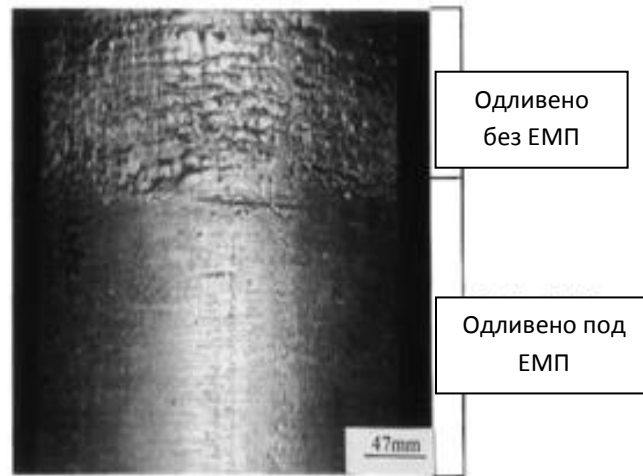
$\Phi_m$  –магнетни флукс, Wb;

S –површина

#### 4.2 Светска искуства у примени електромагнетног поља у поступку ливења алуминијумских легура

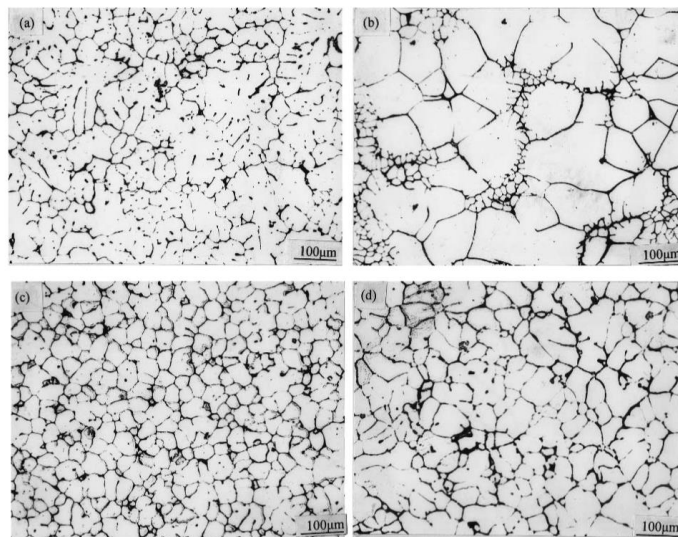
Прва истраживања примене електромагнетног поља у металургији забележена су крајем прошлог века и то углавном у индустрији челика. Позната светска фирма „АВВ“ има велико искуство у прављењу електромагнетних производа за металуршку индустрију (посебно за индустрију челика) [35-37]. Електромагнетна опрема значајно побољшава квалитет и продуктивност код контилива и ванпећне рафинације челика. Познати производи „АВВ“ фирме су: индукциони мешачи и „know-how“ технологија за међулонце (ванпећна металургија), електромагнетни мешачи за континуирано ливење гредица, блумова и слабова, електромагнетне кочнице и кристализатор са контролом течења који смањују појаву разних металуршких грешака.

Истраживања групе кинеских аутора [38-40], су међу првима из области примене електромагнетног поља приликом ливења алуминијумских легура. Група аутора Z. Zhao, J. Cui, J. Dong, и др. [39] испитивала је утицај нискофреквентног електромагнетног поља, (low frequency electromagnetic field), приликом полуконтинуираног процеса ливења алуминијумске легуре Al-Zn-Mg-Cu. У њиховим експериментима електромагнетно поље је постављено око кристализатора. Опсег фреквенције поља кретао се од 15Hz до 50Hz, а „јачина електромагнетног поља“ од 12.000 до 20.000 At (At-ампер навојак). Резултати које су добили показују позитиван утицај примене електромагнетног поља на квалитет површине ингота. На Слици 16. види се површина ингота који је одливан под дејством и без дејства електромагнетног поља.



Слика 16. Површина ингота добијена без и под дејством електромагнетног поља [39]

Код ингота који су одливени под истом „јачином електромагнетног поља“ од 18.000 At али под различитим фреквенцијама од 15Hz, 25Hz, 35Hz и 50Hz примећена је значајна разлика у добијеној микроструктури и величини зрна. На Слици 17. приказана је микроструктура ингота добијених под различитим условима ливења.



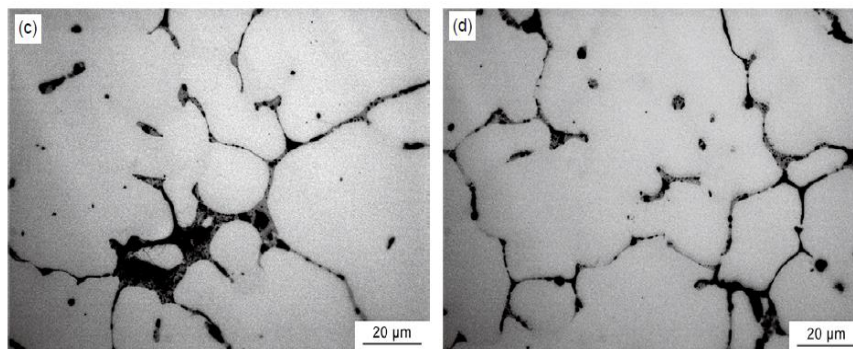
Слика 17. Микроструктура ингота добијених DC поступком (a) центар, (b) ивица, и добијених LFEC поступком (c) центар и (d) ивица [39]



При фреквенцији од 15Hz структура је униформна, претежно дендритна са просечном величином зрна од 100 $\mu$ m. Повећањем фреквенције на 25 и 35Hz микроструктура постаје финија и више у облику розета са просечном величином зрна од 32 $\mu$ m при фреквенцији од 25Hz и 38 $\mu$ m при фреквенцији од 35Hz. При даљем повећању фреквенције розете постају све веће, а просечна величина зрна је порасла до 62 $\mu$ m. Од механичких својстава испитивали су чврстоћу лома и запажено је да инготи који су одливени под дејством електромагнетног поља имају већу чврстоћу лома (264-324 МПа) у односу на инготе одливане без дејства поља (260 МПа). Највећа вредност чврстоће лома (324 МПа) добијена је када је фреквенција електромагнетног поља била 25Hz и када је „јачина поља“ била 20 000At. Ова група аутора у својим истраживањима дошла је до закључка да су оптимални услови ливења при „јачини поља“ од 18.000 до 20.000At и при фреквенцији од 25 до 35Hz. При нижој јачини поља не постиже се задовољавајуће уситњавање зрна као ни расподела легирајућих елемената, а при већим вредностима „јачине поља“ може да дође до разарања мениска растопа што доводи до порозности и оксидације.

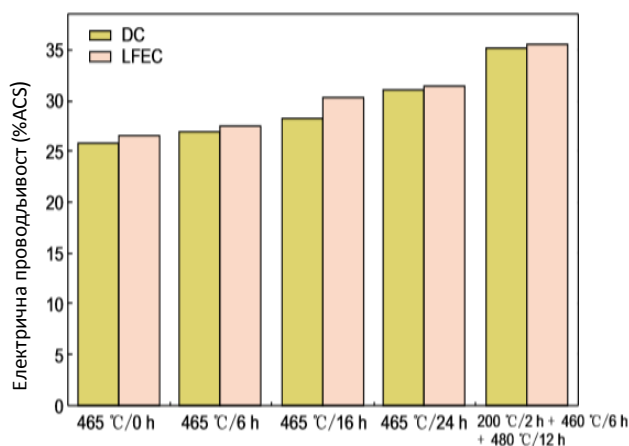
У раду групе кинеских истраживача [41] испитан је утицај хомогенизационог жарења на микроструктуру и електропроводљивост алуминијумске легуре 7075 која је одливена под дејством ниско фреквентног електромагнетног поља и без дејства поља. Узорци који су одливени на оба начина били су подвргнути различитим режимима хомогенизационог жарења. Први режим (једностепено жарење) је жарење на 465 °C/24h, и други режим жарења је био тростепен прво на 200 °C/2h, затим 460 °C/6h и на крају 480 °C/12h. Резултати су показали да се ниско топиве неравнотежне еутектичке фазе континуално растварају у основи како се време жарења код једностепеног жарења повећава. Диференцијална термичка анализа је показала да се ендотермални пик неравнотежних фаза не мења једностепеним хомогенизационом жарењем, али да се применом тростепеног хомогенизационог жарења може смањити. Такође је утврђено да процес хомогенизационог жарења има већи утицај на узорке који су одливени под дејством електромагнетног поља у односу на узорке који су одливени без поља. При истим условима хомогенизационог жарења, узорци који су

одливени под дејством електромагнетног поља имају мањи садржај ниско топивих фаза и имају већу електричну проводљивост у односу на узорке који су добијени без дејства поља. На Слици 18. је приказана микроструктура узорака који су добијени без дејства електромагнетног поља (ЕМП) и са његовим дејством.



Слика 18. Микроструктура узорака добијених без дејства ЕМП и са ЕМП [41]

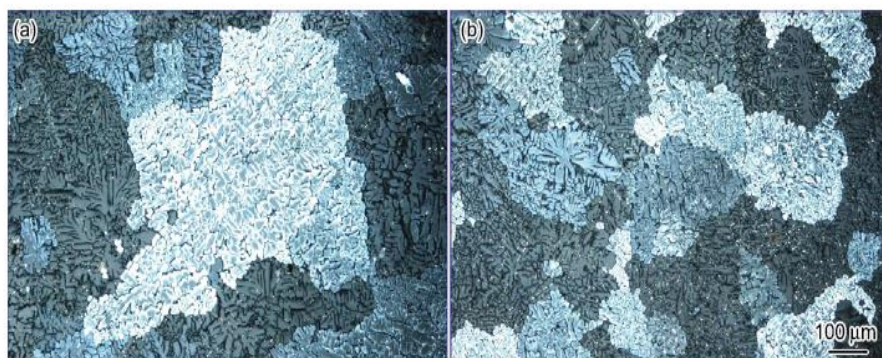
Утицај различитих режима хомогенизационог жарења код узорака који су добијени нискофреквентним електромагнетним поступком ливења (LFEC) и узорака добијених без поља (DC) приказан је на Слици 19.



Слика 19. Утицај различитих режима хомогенизационог жарења на електричну проводљивост Al 7075 легуре [41]

Група кинеских аутора је у свом раду [42, 43] показала утицај примене нискофреквентног електромагнетног поља на микроструктуру и механичка својства

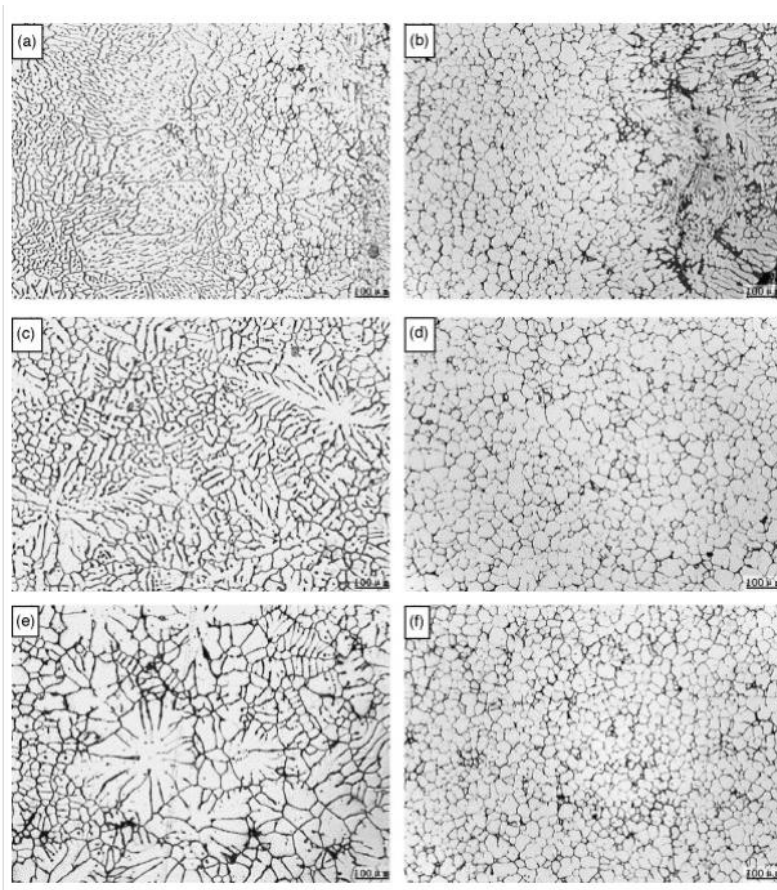
2024 алуминијумске легуре која је одливена хоризонталним полуконтинуираним поступком ливења. Одливци алуминијумске легуре 2042 величине 40x200 mm одливени су на два начина ради поређења, први је на конвенционални начин без примене електромагнетног поља, а други је у присуству поља. Њихов експеримент се састојао од топљења алуминијума у електротпорној пећи, додавању легирајућих елемената Cu, Mn и Mg на 760 °C, дегазације, уклањања шљаке и сипања метала у међулонац. Након одлежавања растопа у међулонцу (око 20 min), растоп се даље сипа у кристализатор ради формирања ингота са електромагнетним пољем и без њега. Примењено електромагнетно поље је имало фреквенцију 40Hz и јачину струје од 200A. Брзина ливења била је 240 mm/min, температура ливења је одржавана на 710 °C. На Слици 20. приказана је микроструктура алуминијумске легуре 2024 одливане без дејства електромагнетног поља (а) и под утицајем поља (б).



Слика 20. Микроструктура Al 2024 легуре одливане без ЕМП (а) и под дејством ЕМП (б) [42]

Са слика се види да је електромагнетно поље значајно утицало на смањење величине зрна легуре у ливеном стању. Што се тиче механичких својстава приметили су да је дошло до повећања вредности затезне чврстоће. Приликом конвенционалног полуконтинуираног поступка ливења просечна вредност затезне чврстоће била је 287 МПа и просечна вредност издужења била је 6.56 %. Међутим приликом ливења под дејством електромагнетног поља просечна вредност затезне чврстоће била је 325 МПа и просечна вредност издужења износила је 13.7%. Утицај електромагнетног поља ниске фреквенције приликом континуираног поступка ливења алуминијумске легуре

Al-Zn-Mg-Cu испитивала је и група аутора [44]. У њиховим експериментима електромагнетно поље је постављено око кристализатора. Ливење је вршено са фреквенцијом електромагнетног поља од 25 Hz док се магнетни флуks мењао и имао је следеће вредности 0 mT; 17.1 mT; 25 mT; 32 mT; 39.5 mT; и 46 mT. Резултати које су добили показују велики утицај електромагнетног поља на квалитет ингота. Микроструктура ингота који су одливени под дејством електромагнетног поља је финија у поређењу са грубом микроструктуром узорака одливених без поља. Добијена микроструктура од ивице према центру приказана је на Слици 21.



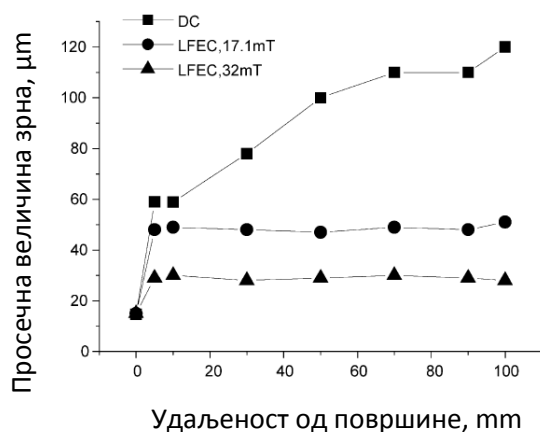
Слика 21. Микроструктура узорака одливених DC и LFEC поступком (a) и (b) ивица, (c) и (d) на половини радијуса, (e) и (f) центар, (a), (c) и (e) –DC поступак и (b), (d) и (f)–LFEC поступак [44]

Утицај густине магнетног флуksа на микроструктуру је следећи:

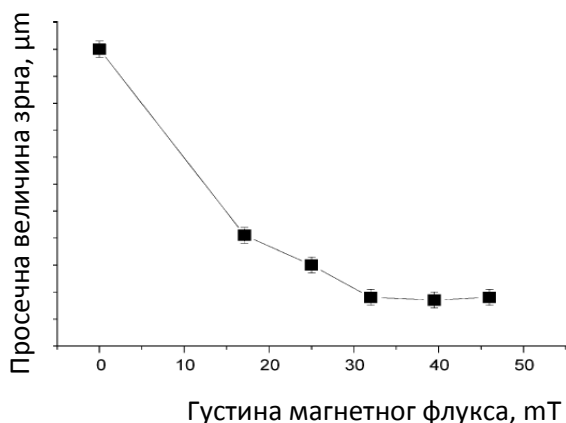
- са повећањем магнетног флуksа од 0 mT до 17.1 mT зрна су од врло грубих и дендритних постала финија и униформнија;

- повећањем густине магнетног флукса са 17.1 mT до 25 mT, а, затим до 32 mT зрна постају још финија и униформнија;
- са повећањем магнетног флукса од 32 mT до 39.5 mT, а затим и до 46 mT, величина и облик зрна не показују већу промену у односу на магнетни флукс од 32mT, па се може закључити да даље повећање магнетног флукса не утиче значајније на величину и облик зрна.

Од механичких својстава испитивана је затезна чврстоћа и тврдоћа. Запажено је да инготи који су одливени под дејством електромагнетног поља имају за око 15% већу затезну чврстоћу и за око 20% већу тврдоћу у односу на инготе одлирене без поља. Примећено је и да код ингота који су одливени са електромагнетним пољем нема велике разлике у тврдоћи између центра и ивице, док код ингота добијеног на конвенционални начин та разлика иде и до 40%. При ливењу под нискофреквентним електромагнетним пољем (25 Hz, 32 mT), микроструктуру алуминијумске легуре Al-Zn-Mg-Cu карактеришу зрна која су од ивице до центра фина, еквиаксијална и униформнија него код класично добијених ингота. Густина магнетног флукса има велики утицај на микроструктуру. Са повећањем његове густине зрна постају финија и униформнија. Међутим са повећањем густине магнетног флукса од 32mT до 46mT није примећена значајнија промена у микроструктури. На Слици 22., приказана је просечна величина зрна која је добијена при различитим условима ливења, а на Слици 23., приказан је утицај густине магнетног флукса на просечну величину зрна у централном делу ингота.

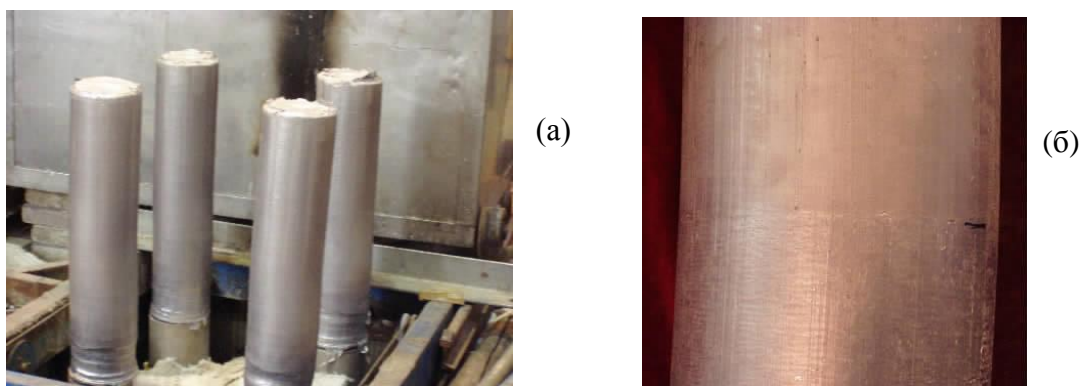


Слика 22. Просечна величина зрна добијена при различитим условима ливења [44]



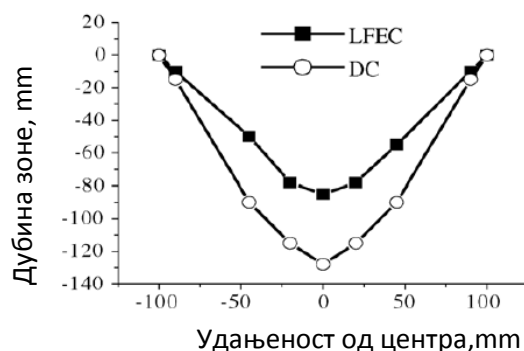
Слика 23. Утицај густине магнетног флукса на просечну величину зрна  
у централном делу ингота [44]

Ауторска група [45] је испитивала утицај нискофреквентног електромагнетног поља на очвршћавање алуминијумске легуре 6063 са параметрима јачина струје 120 А и фреквенцијом 15 Hz. Њихови резултати показују да је микроструктура добијена под дејством електромагнетног поља хомогенија и финија у односу на ону добијену без поља. За тумачење својих резултата користили су Лоренцову једначину, чија ротациона компонента изазива принудну конвекцију у растопу. На тај начин бољи проток течног лива омогућава стабилније ливење без пуцања ингота, али и смањење зоне менискуса због чега се брзина ливења у електромагнетном пољу може повећати. Такође ови аутори су дошли до закључка да се смањује температурни градијент и повећава хетерогена нуклеација. Сви ови ефекти резултирају значајном променом у добијеном квалитету микроструктуре и саме површине ингота. На Слици 24. приказан је изглед за четири ингота од алуминијумске легуре 6063 који су добијени ливењем у нискофреквентном електромагнетном пољу (а) и изглед површине ингота добијен под дејством поља и без њега (б).



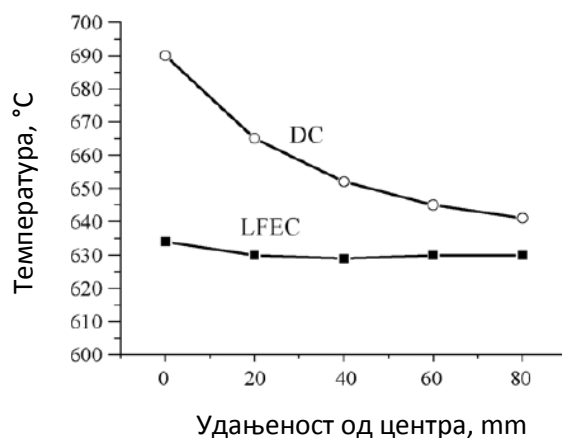
Слика 24. Инготи од Al 6063 легуре добијени LFEC поступком (а) и изглед површине  
ингота добијен LFEC и DC поступком (б) [45]

Испитивања су још вршена и при промени јачине струје од 100А до 140А, док је фреквенција била константна и износила је 15Hz. При истој фреквенцији, ротациона компонента Лоренцове силе и магнетни флуks при промени струје мењају и принудну конвекцију растопа чиме се изазивају позитивни ефекти који утичу на облик зрна, она се мењају од усмерених до финих и униформних. Истраживачи [46] су на основу њиховог рада закључили да примена електромагнетног поља, приликом ливења алуминијумске легуре Al-Zn-Mg-Cu-Zr високе чврстоће, не само да делује на уједначавање температурног градијента и на униформну расподелу легирајућих елемената, већ да се смањује и дубина зоне очвршћавања. На Слици 25. приказана је дубина слоја очвршћавања приликом ливења без дејства електромагнетног поља (DC поступак) и приликом ливења са пољем (LFEC поступак).



Слика 25. Дубина зоне очвршћавања у DC и LIMF поступку [46]

Као што се види са слике дубина зоне очвршћавања приликом ливења без електромагнетног поља је око 125 mm док је дубина ове зоне приликом ливења са пољем око 85 mm. Како је познато да се са повећањем дубине зоне очвршћавања повећавају и унутрашња напрезања, може се очекивати да приликом ливења у присуству електромагнетног поља дође до значајног смањења унутрашњих напрезања. Ово ће се савим сигурно одразити и на добијени квалитет ингота.



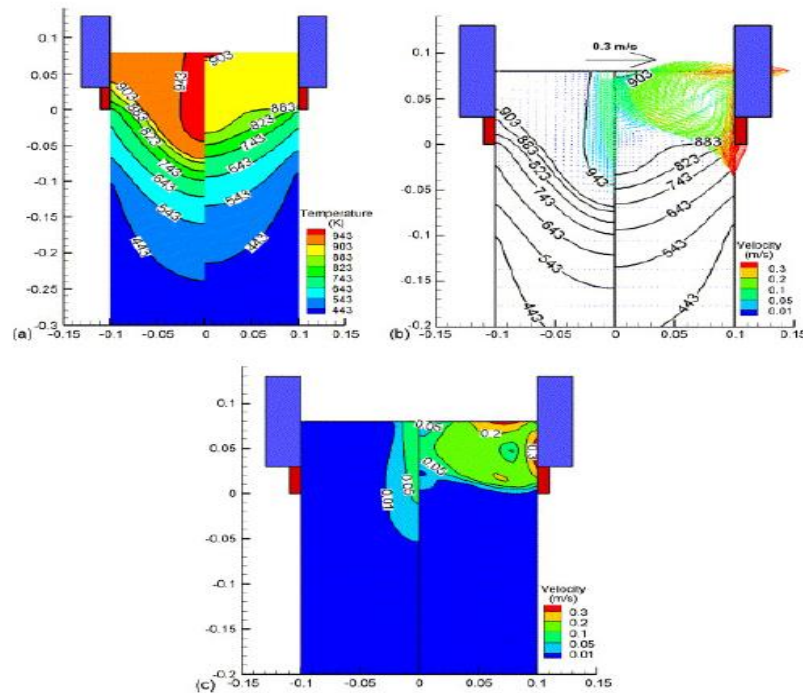
Слика 26. Температурни градијент за DC и LFEC поступак [46]

Температурни градијент је мерен помоћу пет термопарова који су постављени дуж пречника на око 15 mm испод менискуса унутар кристализатора. Температурни градијенти за поступак ливења без дејства електромагнетног поља (DC поступак) и за поступак ливења са пољем (LFEC поступак) приказани су на Слици 26. Са слике се види да је температура испод менискуса код LFEC поступка много униформнија и нижа него код DC поступка. Температурна разлика између центра и ивице код ингота добијених под дејством електромагнетног поља је око 5°C, док је температурна разлика између центра и ивице код ингота добијених без поља знатно већа и износи око 45°C. Код конвенционалног DC поступка топлији метал се помера полако од центра ингота према ивици под утицајем конвекције. Међутим, код LFEC поступка топлији метал у центру ингота се помера према ивици дуж површине растопа и хладнији метал са ивице ингота се помера према центру брзо услед дејства



електромагнетне силе. Ово доводи до стварања равномерног температурног поља и смањења унутрашњих напрезања.

На Слици 27. приказани су резултати нумеричке симулације коју су у свом раду приказали аутори [47, 48], изучавајући утицај електромагнетног поља приликом ливења алуминијумских легура.



Слика 27. Упоредни приказ симулације за DC поступак (лева половина сваке слике)  
LFEC поступак (десна половина сваке слике) [47, 48]

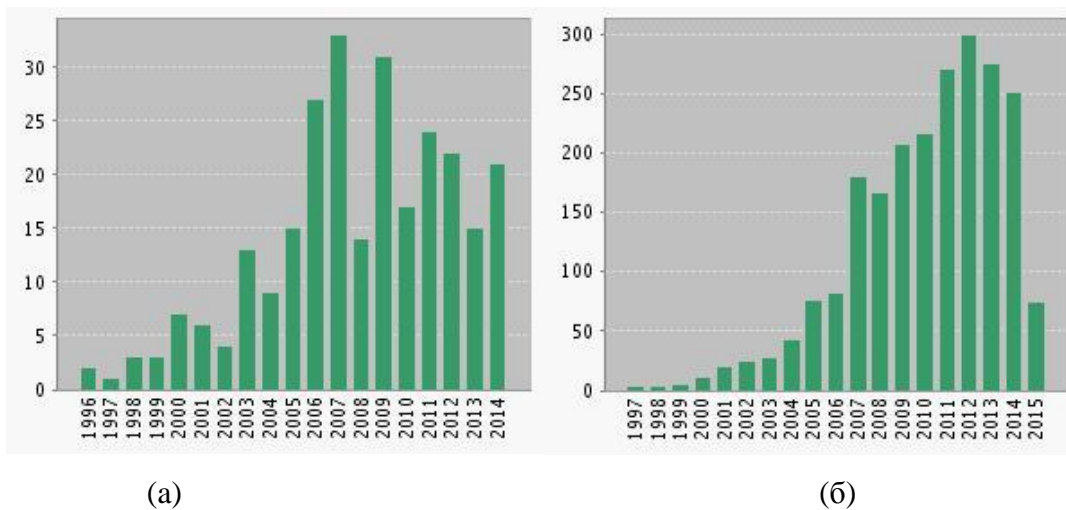
Слике приказују температурни профил (горе лево), векторе брзина (горе десно) и контуре брзина (на дну) у присуству електромагнетног поља и без његовог присуства. Вектори брзина као и контуре брзина су потпуно измењене у присуству електромагнетног поља. Када се електромагнетно поље примени смер кретања растопа се мења и мала циркулација је присутна у близини фронта очвршћавања у центру ингота. У ствари, поређењем са DC поступком максимална брзина се повећава неколико пута, а место максималне брзине се помера од улазне области према контактної регији између метала и калупа. Овај феномен се може објаснити појавом принудне конвекције која је резултат ротационе компоненте

електромагнетне силе. Температурни профил показује такође значајну промену када се електромагнетно поље примени. Прво, примећено је да су температурне контуре у десном делу померене навише у односу на леви део, што резултира промени облика зоне очвршћавања. Зона очвршћавања приликом ливења у електромагнетном пољу се знатно смањује у односу на зону очвршћавања у одсуству електромагнетног поља, а температура у растопу је нижа и униформнија. Разлози за измену температурног поља су енергична принудна конвекција изазвана мешањем и повећани топлотни флуks дуж хоризонталног правца услед принудне конвекције у фронту очвршћавања. Код конвенционалног DC поступка растоп који има већу температуру прво достиже очвршћавајући фронт, након што је метал сипан и дубина зоне очвршћавања је релативно висока код овог поступка. Поред тога, како је брзина протока у зони очвршћавања врло мала, пренос топлоте зависи искључиво од конвекције што резултира неравномерним температурним пољем у растопљеној зони. Међутим код LFEC поступка, услед деловања електромагнетног поља, растоп повишене температуре из улазне регије прво достиже контактну површину између метала и калупа дуж слободне површине и температура се брзо смањује. Након што се охлади од калупа, растоп достиже фронт очвршћавања са нижом температуром што резултира и смањењу зоне очвршћавања у односу на DC поступак. На основу овога може се закључити да је температурно поље у растопу далеко униформније код LFEC поступка него код DC поступка. Уколико је фреквенција електромагнетног поља оптимална мешање је присутно у целој запремини растопљеног метала. Ако је фреквенција изнад оптималне вредности, мешање (услед Лоренцове силе) се појачава у периферној области и знатно се смањује у другим деловима растопа. Са друге стране уколико је фреквенција испод оптималне вредности, утицај Лоренцове силе је присутан у целом растопу али је он врло слаб због ниског градијента магнетног поља. Група аутора Cao Z., Jia F., Zhang X., и Hao H. [49] испитивала је утицај електромагнетног поља приликом континуираног процеса ливења алуминијумске легуре 2024. Електромагнетно поље постављено је око кристализатора, радни параметри односно фреквенција износила је 50Hz, а „јачина поља“ износила је 15.000 At. Упоредивањем узорака који су добијени без дејства и под дејством поља дошли

су до закључка да се узорци који су одливени под дејством поља одликују финијом и хомогенијом микроструктуром са ситнијим зрном у односу на узорке добијене без дејства поља. С обзиром да микроструктура директно утиче на механичка својства примећено је да узорци добијени под дејством поља имају три пута веће вредности замора материјала у односу на узорке добијене без дејства поља и то не само у ливеном стању већ и након термичке обраде. Такође је примећено да је тврдоћа по Роквелу дупло већа код узорака одливених под дејством поља (31.72) у поређењу са узорцима добијених без дејства поља (16.02), као и то да се узорци добијени под дејством поља одликују добром отпорношћу на хабање.

Аутори [50] објавили су своја истраживања која се као и код предходне групе аутора односе на утицај електромагнетног поља приликом континуираног процеса ливења алуминијумске легуре 2024. Они су у својим експериментима мењали фреквенцију поља од 10 до 100 Hz док је „јачина поља“ износила 5.000 и 10.000 At. На основу добијених резултата закључили су да су најоптималнији услови ливења фреквенција поља од 30Hz и „јачина поља“ од 10.000 At. Добијена микроструктура узорака одливених под дејством поља фреквенције 30 Hz је знатно хомогенија и са ситнијим зрном него она што је добијена код узорака који су одливени под дејством поља веће фреквенције од 100 Hz. Такође је запажено и смањење интердендритне порозности и дендритне сегрегације код узорака одливених са фреквенцијом од 30 Hz. Исти тренд промене резултата примећен је и приликом повећања „јачине поља“ са 5.000 на 10.000 At. Повећање „јачине поља“ посебно је утицало на равномернију расподелу главног легирајућег елемента Си. Из наведених литературних прегледа као и прегледом литературе [51] може се видети да различите групе аутора имају јединствен став о последицама примене електромагнетног поља у току процеса ливења. Применом електромагнетног поља мењају се услови очвршћавања легуре. Ово поље изазива већи проток флуида, принудну конвекцију, равномерно температурно поље, слабији утицај гравитације као и смањени контактни притисак између калупа и метала. Инготи одливени под дејством електромагнетног поља генерално су квалитетнији од ингота који су одливени без дејства поља. Константан раст броја публикованих радова из области примене електромагнетног поља

приликом ливења алуминијумских легура и број цитата указују на актуелност и значај истраживања у овој области. На Слици 28. (а) графички је представљен број радова, из области примене електромагнетног поља приликом ливења алуминијумских легура, по годинама од 1996. до 2015. Укупан број радова за тај период је 267. Слика 28. (б) приказује број цитата, из области примене електромагнетног поља приликом ливења алуминијумских легура, за исти временски период, према *Thomson Reuters ISI Web of Science* [52] бази података. Укупан број цитираних чланака је 1438, а просечан број цитата по раду је 8.40. *Thomson Reuters ISI Web of Science* је свеобухватна платформа за претраживање, која обухвата много различитих типова садржаја за преглед: чланци у часописима, патенти, интернет (web) сајтови, зборници са конференција, садржаји са отвореним приступом. Највећи број објављених чланака забележен је средином прошле деценије, затим следи пад и поновни раст у последњих неколико година, што показује да је ова област недовољно испитана и врло интересантна за истраживаче.



Слика 28. Број публикованих радова (а) и број цитата (б) према  
*ISI Web of Science* од 1996-2014

## **5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО**

## 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО

Експериментални део ове докторске дисертације је урађен у реалним производним условима у фабрици „11 март“, Сребреница. Експерименти су вршени у циљу испитивања утицаја електромагнетног поља приликом очвршћавања растопа алуминијумске легуре EN AW 7075, (AlZn5,5MgCu), на добијену микроструктуру, а самим тим и на њена механичка својства. Хемијски састав испитиване легуре дат је у Табели 5.

Табела 5. Хемијски састав испитиване легуре EN AW 7075

Елемент	Zn	Mg	Mn	Cu	Cr	Fe	Si	Ti
wt %	6.10	2.50	0.30	2.00	0.27	0.40	0.40	0.20

Испитивања су вршена на узорцима легуре који су одливени без дејства електромагнетног поља и под дејством електромагнетног поља. Радни параметри под којима су узорци одливени су строго контролисани и дефинисани су вредностима фреквенције (Hz), „јачине електромагнетног поља“, изражене кроз број ампер навојака (At-ampere turns) и јачине струје (A). Иако је јачина електромагнетног поља:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (10)$$

где је:  $N$ - број намотаја,  $I$ -јачина струје, а  $l$ - дужина калема, у овој тези ће се условно (под знацима навода) за јачину поља узети производ јачине струје у (A) и броја намотаја као што је усвојено у производној пракси. Ознаке узорака као и вредности радних параметара под којима су узорци добијени приказани су у Табели 6. Мењане су вредности само фреквенције (Табела 6.) јер су досадашња истраживања показала да је то најутицајнији параметар на услове очвршћавања, а тиме и на квалитет и карактеристике добијених одливака.

Табела 6. Вредности радних параметара при ливењу под којима су узорци одливени

Узорак	Фреквенција (Hz)	„Јачина поља“ (At)	Јачина струје (A)	Број намотаја у калему (N)
0	0	0	0	-
1	10	18000	250	72
2	15	18000	250	72
3	20	18000	250	72
4	30	18000	250	72
1 хом	10	18000	250	72
2 хом	15	18000	250	72

Узорак 0 служио је као еталон. Он је одливен без присуства електромагнетног поља, да би се могао пратити утицај поља на микроструктуру, механичка својства и остале карактеристике, код узорака у ливеном стању 1, 2, 3 и 4. Узорци 1 хом и 2 хом су након ливења хомогенизовани јер је њихова микроструктура у ливеном стању била незадовољавајућа. Ради праћења утицаја електромагнетног поља упоређивани су резултати који су добијени применом различитих метода које су описане у Поглављу 6.

Експериментални део рада састоји се из:

- полуконтинуираног поступка ливења без електромагнетног поља и са електромагнетним пољем и
- хомогенизационог жарења на 480 °C у трајању од 8h.

Сви узорци на којима су извршена испитивања су добијени топљењем у средње фреквентној индукционој пећи Ajax Magnethermic IP-208/ПП4 и поступком вертикалног полуконтинуираног ливења без електромагнетног поља и са електромагнетним пољем. Узорци су кружног попречног пресека  $\varnothing 90$  mm и ливени су на ливној плочи ELING LP-05 у фабрици „11 март“, Сребреница. Температура ливења била је у интервалу 710-720 °C. Узорци који су ливени у присуству електромагнетног поља одливени су при различитим вредностима фреквенције: 10

Hz, 15 Hz, 20 Hz и 30 Hz. Ове вредности фреквенција су изабране на бази досадашњих сопствених истраживања и оних доступних у литератури. Она су показала да само ниже фреквенције имају ефекта па су напред наведене због тога изабране. Циљ је био да се испита утицај нижих фреквенција поља, са малим разликама, како би се одредили оптимални радни параметри који омогућавају добијање задовољавајућих карактеристика одливака. На тај начин би се могло утицати на скраћење поступка хомогенизационог жарења чиме би се појевтинио производња. Такође су примењени математички модели у обради производних параметара електромагнетног процеса ливења ради прогнозирања својстава легуре. Истовремено је примењена нумеричка симулација процеса топлог ковања испитиване легуре.

## **5.1 Полукоинтинуирано ливење EN AW 7075 легуре**

### ***Опис опреме***

Савремена индукциона постројења за топљење метала имају све већу примену у односу на класичне начине са спољашњим извором енергије, због својих економских и експлоатационих предности. Код индукционог грејања пренос електричне енергије од извора до радног предмета врши се посредством јаког променљивог магнетног поља. Вртложне струје које се индукују у радном предмету, остварују директно развијање топлоте у грејном материјалу. Одсуство посредног преношења топлотне енергије, обезбеђује висок коефицијент корисног дејства и велики производни учинак. За припрему и одржавање течног метала коришћена је електрична индукциона пећ Ajax Magnethermic IP 208/PP4. Ова пећ је специјалног каналног типа, односно топлота се развија у три канала индуктора. Каналне индукционе пећи су поуздане, лаке за коришћење, омогућавају добру регулацију температуре и мешање материјала. За разлику од гасних пећи, унос неметалних укључака и оксида у материјал је смањен на минимум. Добро мешање материјала остварено је самим принципом рада пећи, јер лив циркулише кроз канал индуктора на дну, а ту се остварује велика



концентрација снаге на малој површини што резултује веома брзим циклусом грејања и остварује се велика циркулација течног метала који се преноси до површине. Ово је нарочито битно у раду са тврдим легурама из серије 2xxx и 7xxx код којих, уколико нема доброг мешања, долази до стварања сегрегација легирајућих елемената. Топљењем метала у индукционој каналној пећи постиже се хомогеност састава и температуре, добар квалитет и чистоћа лива као и минимално присуство гасова (водоника и кисеоника) у металу.

Техничке карактеристике пећи Ajax Magnethermic IP 208/PP4 су:

- називна снага: 250 kW
- називни напон напајања: 3x380 V
- коефицијент корисног дејства: 0.95
- радна учестаност: 50Hz
- хлађење индуктора: водом
- температура излазне воде: 22-30 °C
- капацитет: 6 t

На Слици 29. приказана је пећ Ajax Magnethermic IP 208/PP4. Индуктор је направљен од бакарних цеви савијених око канала индуктора који се хладе водом. Струја унутар индуктора ствара јако променљиво електромагнетно поље и сталном апсорпцијом енергије из електромагнетног поља расте температура грејаног материјала. Унутрашњост индуктора обложена је специјалном облогом која је отпорна на термо шок и хемијску ерозију.



Слика 29. Пећ Ajax Magnethermic IP 208/PP4

Постројење се састоји од две функционално различите али међусобно зависне целине. Прва је електроорман са енергетским и електронским елементима инвертора и друга је систем где се врши топљење, кондензаторским батеријама, индукторима и носећом конструкцијом. Захваљујући квалитету уграђених електронских компоненти добијених полупроводничком технологијом и савременим начином пројектовања опреме поузданост постројења је висока, а процес одржавања поједностављен.

#### ***Ливна плоча за електромагнетни поступак ливења (Eling LP-05)***

Полуконтинуирани поступак са ливном плочом Eling LP-05 заснива се на принципу уливања истопљеног метала из пећи у кристализатор око кога је постављено електромагнетно поље. Одливени очврсли инготи се извлаче из кристализатора помоћу хидрауличног клипа који се покреће константном брзином на доле. Тип плоче који се користио у току експеримента је са топлим главама, а ниво лива се одржавао на принципу спојених судова. Од уливног места лив се по ливној плочи разводи керамичким каналима и то прво централним, а потом појединачним до сваког кристализатора. Топла глава на кристализатору је керамичка и она належе на графитни прстен. Сам кристализатор је направљен од алуминијума, а у горњем делу, где је најинтезивнији контакт са течним металом постављен је графитни прстен који спречава локално лепљење материјала. Ово је врло важно са становишта квалитета површине одливених ингота. На Слици 30. је приказан изглед ливне плоче са каналима.



Слика 30. Изглед ливне плоче са каналима

Кристализатори су једноделни, са спољне стране се хладе контактано, а према излазној страни имају по обиму избушене отворе кроз које циркулише вода и на тај начин се хладе и кристализатори и инготи. На Слици 31. приказан је узглед кристализатора.



Слика 31. Изглед кристализатора

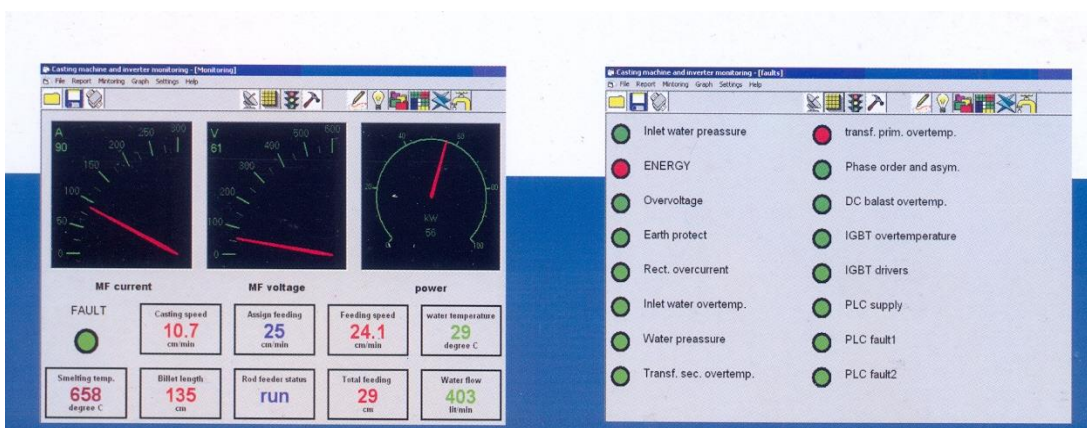
Ливна плоча је израђена од нерђајућег челика и у току рада испуњена је водом под притиском од око 0.5 bar-а. Са спољне стране плоча има само један прикључак за довод, а дистрибуција воде је изведена интерно. На тај начин се остварује да проток воде око свих кристализатора буде приближно једнак, што је врло важно за стабилност самог процеса ливења. Максималан проток воде је 100 l/min по једном ливном месту. За овај процес користи се стандардна техничка вода и није потребна дејонизација нити посебно пречишћавање. На главном доводу воде постављен је филтер за механичке нечистоће и на том месту су стављени сензори за мерење протока и температуре воде. Сензори су прикључени на дигиталне мерне инструменте који приказују мерене вредности на дисплеју и прослеђују их централном рачунару за аутоматизацију процесног система. Насупрот ливној плочи налази се преносни механизам са дигиталним оптичким енкодером ради мерења померања плоче, а повратном везом се регулише брзина кретања хидрауличног клипа или серво мотора.

### Систем за праћење и контролу процеса ливења

Индустријски рачунар на претварачу је повезан са централним рачунаром за аутоматизацију процесног система. На њему се приказују следећи подаци:

- напон на ливној плочи,
- струја у претварачу,
- ангажована снага,
- температура на неколико места у претварачу и трансформатору и
- евентуалне грешке.

Све грешке се памте у меморији и могу се у сваком тренутку излистати као историја грешака. На Слици 32. приказан је изглед контролно управљачког панела са централног рачунара.



Слика 32. Контролно управљачки панел са централног рачунара

Централни рачунар на пулту ливне машине прикупља све параметре процеса ливења: температуру лива, брзину ливења (задату и остварену у реалном времену), проток и температуру воде и друго. Овај централни рачунар такође прикупља информације од рачунара у инвертору. Такође постоји РС тачпанел на пулту који је повезан са централним рачунаром, који приказује параметре ливења, параметре са претварача, графике у реалном времену и обезбеђује архивирање ових података. Подаци из претходних поступака ливења се могу учитати из архиве и приказати.

Тачпанел на пулту је повезан на локалну мрежу, чиме се омогућава даљински надзор преко мреже или преко интернета.

Радни параметри под којима су узорци одливени су строго контролисани и дефинисани су вредностима јачине струје (А), фреквенције (Hz), и „јачине електромагнетног поља“ изражену кроз број ампер навојака (At-ampere turns). Вредности радних параметара приликом ливења дати су у Табели 6. на страни 58.

## **5.2 Хомогенизационо жарење**

Хомогенизационо жарење је једна у низу технолошких операција у току производње и прераде алуминијумских легура. Изводи се у пећима за жарење и представља дуготрајан и скуп поступак. Хомогенизационо жарење се примењује са циљем добијања хомогеније структуре. У експерименталном делу овог рада урађена је хомогенизација узорака 1 и 2, који су предходно одливени под дејством електромагнетног поља са фреквенцијом од 10 Hz и 15 Hz. Они су изабрани зато што је њихова микроструктура у ливеном стању била нехомогена, са великим уделом порозности и неметалних укључака, што ће се можда ублажити овом термичком обрадом. Температура хомогенизационог жарења износила је 480°C, а време трајања било је 8h, као што је уобичајено у производној пракси. Поређењем узорака у ливеном и хомогенизованом стању процењена је могућност елиминације или скраћења поступка хомогенизационог жарења. Овим би се остварила значајна уштеда енергије и скраћење времена трајања целокупног процеса производње и прераде алуминијумских легура.

## **6. МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА**

## **6. МЕТОДЕ ИСПИТИВАЊА**

У раду су урађена следећа испитивања уз примену одговарајућих метода:

- микроструктурна карактеризација
  - оптичка микроскопија
    - квалитативана и
    - квантитативна микроструктурна анализа
  - скенирајућа електронска микроскопија (SEM/EDX)
- одређивање хемијске сегрегације по попречном пресеку узорака
- диференцијална термијска анализа
- мерење електропроводљивости
- испитивање механичких својстава
  - мерење макротврдоће
  - испитивање затезањем
- примена математичких модела (хеометрија) у обради производних параметара при ливењу ради прогнозирања својстава легуре
- нумеричка симулација процеса топлог ковања јер је испитивана легура управо намењена топлом ковању.

### **6.1 Микроструктурна карактеризација**

У оквиру микроструктурне карактеризације коришћена је метода оптичке микроскопије и метода скенинг електронске микроскопије са EDX анализом.

#### **6.1.1 Оптичка микроскопија**

Методом оптичке микроскопије урађена је микроструктурна карактеризација на узорцима у ливеном стању (узорак 0, 1, 2, 3 и 4) и на узорцима који су хомогенизационо жарени (1 хом -10 Hz и 2 хом -15 Hz) на 480 °C у временском периоду од 8h.

Микроструктура је је испитивана на попречном пресеку узорака након уобичајене металографске припреме:

- брушења и полирања (полирано стање) ради одређивања порозности;
- брушења, полирања и нагризања у Келеровом реагенсу ради одређивања морфологије издвајања Al- чврстог раствора и интерметалних фаза-IMF и
- анодне оксидације узорака са Баркеровим реагенсом са циљем да се одреди величина и облик зрна као и присуство дендритне сегрегације.

За квантитативну микроструктурну анализу коришћен је уређај за анализу слике Leica Q 500. Линијском методом мерења одсечака које праве тестне линије са границама фаза, измерена је ширина секундарних дендритних грана (ћелија), DAS, и ширина међудендритног простора,  $L_{IMF}$ , у коме су излучене интерметалне фазе и еутектикум, као и њихов количински удео,  $V_{V IMF}$ . Ова анализа је рађена код узорака нагризаних у Келеровом реагенсу у ливеном и хомогенизованом стању (узорци 1хом и 2хом). Такође је истом методом одређена величина зрна, L, за узорке у ливеном и хомогенизованом стању, након анодне оксидације у Баркеровом реагенсу. Ови параметри су мера дисперзности структуре и директно утичу на механичка својства легуре, а последица су услова очвршћавања.

### **6.1.2 Скенирајућа електронска микроскопија SEM /EDX анализа**

Метода скенинг електронске микроскопије (SEM) и EDX (energy dispersive X-ray) анализа урађене су са циљем добијања комплетније микроструктурне карактеризације, односно ради добијања података о фазном саставу легуре као и испитивању евентуалног утицаја електромагнетног поља на фазни састав легуре. За разлику од оптичког микроскопа код кога се користи светлост и стаклена сочива за анализу слике, скенинг електронска микроскопија користи сноп електрона и електромагнетна сочива за добијање тродимензионалне слике. Помоћу скенинг електронске микроскопије могуће је постићи повећање и преко 300 000x, мада најчешћа примена у пракси не прелази 3000x. Током SEM испитивања сноп електрона се фокусира на малу запремину узорка преносећи енергију на то место.



Ови електрони којима се бомбардује узорак зову се примарни електрони и они изазивају избијање електрона из самог узорка. Избијени електрони познати као секундарни електрони бивају привучени позитивно наелектрисаном решетком или детектором што се онда преводи у сигнал. Да би се добила SEM слика електронским снопом се брзо прелази преко целе испитиване површине узорка што даје пуно таквих сигнала. Обрадом свих сакупљених сигнала са површине добија се слика топографије узорка. SEM може да буде опремљен и системом за EDX анализу. EDX анализа је техника која се користи за идентификацију елемената у саставу материјала као и за оцену њихових релативних односа концентрација на површини узорка. Примарни сноп електрона избија електроне из неке од унутрашњих љуски атома узорка. Та упражњена места бивају попуњена електронима са вишом енергијом из спољашњих љуски. При том, електрон из спољашње љуске отпушта део енергије емитовањем X зрака. Атом сваког елемента емитује X зраке са тачно одређеном количином енергије. На тај начин мерењем количине присутне енергије од X зрака може се одредити од које врсте атома она потиче.

SEM /EDX анализом испитани су узорци у ливеном стању и то узорак 0 (одливан без присуства електромагнетног поља), узорци 1, 2, 3 и 4 (одливени у присуству електромагнетног поља са различитим фреквенцијама: 10, 15, 20 и 30 Hz) и узорци 1 хом -10 Hz и 2 хом -15 Hz, који су хомогенизовани. Анализа је рађена на скенирајућем електронском микроскопу модел JEOL JSM-6610LV са интегрисаним системом за EDX анализу модел Oxford Instruments Xmax SDD 20mm<sup>2</sup>. Напон убрзања електрона на SEM -у био је 20 KV. Радни напон обезбеђује сноп примарних електрона на радном растојању од 10mm, који се фокусирају према површини узорка електромагнетним сочивима и померају се од тачке до тачке. Испитивани узорци су снимани при различитим увећањима која су дата на самим сликама. Јачина струје електронског снопа била је око 0.7 nA, а радни притисак око 25  $\mu$ Pa. EDX анализом су прикупљени спектри током 50s у енергетском опсегу 0-20 KV. Анализе су рађене у правоугаоним површинама. Детектовани су сви елементи присутни у узорку, тј. сви спектрални максимуми чији је интензитет већи од двоструке стандардне девијације

брзине линије спектра. Квантификација елемената извршена је према унутрашњим стандардима инструмента и нормализована је на 100%.

## **6.2 Одређивање хемијске сегрегације по попречном пресеку узорака**

Одређивање хемијске сегрегације урађено је са циљем да се одреди промена расподеле легирајућих елемената по попречном пресеку узорака (од површине до центра узорака). Шпон је узиман континуирано са неколико места (по тачкама) од површине према центру узорака. Анализа је урађена на узорку 0 (који је добијен без дејства електромагнетног поља) и узорку 4 (који је добијен под дејством електромагнетног поља фреквенције 30 Hz). Испитана је хемијска сегрегација за три легирајућа елемента цинк, магнезијум и бакар. Хемијска анализа узорака урађена је на уређају за спектралну анализу метала модел Eling SP 12.

## **6.3 Диференцијална термијска анализа**

Диференцијална термијска анализа, DTA, урађена је за узорак 0, који је одливан без дејства електромагнетног поља и за узорак 4, који је добијен под дејством електромагнетног поља фреквенције 30 Hz. Анализа је урађена је на уређају SHIMADZU DTA-50, Слика 33., од собне температуре до 700 °C. Референтни узорак је алумина, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Узимано је по 5.00 mg праха за анализу. Анализе су урађене у атмосфери азота, N<sub>2</sub>, при протоку од 20 ml/min и при брзини загревања 10 °C/min. Циљ ове анализе је био да се утврди да ли је дошло до промене фазног састава легуре приликом ливења у присуству електромагнетног поља.



Слика 33. Уређај SHIMATZU DTA -50

#### 6.4 Мерење електропроводљивости

Електрична проводљивост испитиваних узорака од алуминијумске легуре EN AW 7075 мерена је помоћу стандардног апарата - SIGMATEST 2.069-Foerster, Слика 34., којим се мери електрична проводљивост метала и легура који не поседују феромагнетна својства. Овај инструмент се користи за мерење електричне проводљивости на основу комплексне импедансе мерне сонде. Пречник мерне сонде је 8 mm, а мерни опсег је од 0.5 до 65 MS/m. Мерење електропроводљивости урађено је за све узорке у ливеном стању: 0, 1(10 Hz), 2 (15 Hz), 3 (20 Hz), и 4 (30 Hz), и за узорке 1 хом (10 Hz) и 2 хом (15 Hz) који су хомогенизовани.



Слика 34. Инструмент за мерење електричне проводљивости  
SIGMATEST 2.069 (Foerster)

## **6.5 Испитивање механичких својстава**

Механичка испитивања обухватила су одређивање основних механичких својстава на узорцима у ливеном стању: 0, 1 (10 Hz), 2 (15 Hz), 3 (20 Hz), 4 (30 Hz) и на узорцима који су хомогенизационо жарени 1хом (10 Hz) и 2хом (15 Hz). У оквиру ове анализе коришћена је метода испитивање затезањем и мерење макротврдоће по Бринелу.

### *Испитивање затезањем*

Испитивањем затезањем одређене су затезна чврстоћа ( $R_m$ ), граница течења, ( $R_p$ ) и издужење при разарању ( $A$ ). Испитивање је рађено на мерном систему Zwick/Roell Z 100 који је повезан са рачунаром ради софтверске обраде података, Слика 35. Уређај може да ради на собној и повишеним температурама.



Слика 35. Компјутеризовани мерни систем Zwick/Roell Z 100

Епрувете за испитивање затезањем израђене су по стандарду EN-10002-1, за мерење на собној температури. Епрувета је кружног пресека са навојем дужине 150 mm и пречника 8 mm.

Техничке карактеристике уређаја су:

- мерни опсег силе 0-100 kN,
- брзина покретне чељусти 0.0005 -200 mm/min,
- тачност померања покретне чељусти 0.02  $\mu$ m,
- максимална температура испитивања је 1200 °C, - максимална сила стежања је 180 kN при притиску у пнеуматској инсталацији од 10 bara,
- управљачки софтвер Testexpert (Zwick/Roll)

Одређивање механичких својстава урађено је на свим узорцима у ливеном стању: 0, 1, 2, 3 и 4 као и узорцима 1 хом и 2 хом који су хомогенизовани.

### ***Мерење макротврдоће***

Макротврдоћа испитиваних узорака одређена је Бринеловом методом. Коришћена је куглица од челика пречника 5mm и сила утискивања 250 daN. Време оптерећења је 30s. За сваки узорак вршена су по три мерења. Макротврдоћа је измерена на свим узорцима у ливеном (0, 1, 2, 3 и 4) и хомогенизованом (1 хом и 2 хом) стању.

## **6.6 Примена математичких модела у обради производних параметара при ливењу - хеометрија**

На основу серије експерименталних резултата из фабрике „11март“, Сребреница, који су добијени приликом електромагнетног поступка ливења легуре EN AW 7075, примењени су математички модели који се могу користити за предвиђање оптималних вредности механичких својстава легуре. У току експеримената вариране су различите вредности радних параметара: фреквенције (V), јачине струје (I) и „јачине поља (T)“ како би се испитао њихов утицај на механичка

својстава: затезну чврстоћу ( $R_m$ ), границу течења ( $R_p$ ), издужење при разарању ( $A$ ) и величину попречног пресека епрувете при кидању ( $S_0$ ). Практична примена математичких модела, као и оптимизација процеса имала би за циљ уштеду енергије, смањење потрошње сировина и минимизирање шкарта. У даљем тексту ће бити описане методе хеометрије које су коришћене у овој дисертацији.

### ***Дескриптивна статистика***

Дескриптивна статистика је употребљена за квантитативно описивање проучаваних својстава како би се описали подаци и сагледали њихови међусобни односи. Униваријантна анализа је урађена да би се утврдила расподела променљивих, укључујући централну тенденцију (средње вредности) и дисперзију (опсеги, стандардне девијације и варијансе). Резултати су интерпретирани на основу Tukey-евог HSD теста, на нивоу значајности  $p < 0,05$ , при нивоу поверења од 95%. Tukey-ев HSD (*honestly significant distance*) тест показује колико треба да су удаљене било које две средње вредности да би биле статистички различите. За разлику две средње вредности већу од стандардне девијације (SD), овим тестом се доказује да је статистички значајна. Tukey-евим HSD тестом података добијених различитим експерименталним мерењима, установљено је да је већина узорака статистички значајно различита на нивоу  $p < 0,05$ , чиме је доказано да су испитивани узорци довољно разнолики да би се приступило статистичкој анализи и математичком моделовању. Дескриптивна статистичка анализа, уз помоћ *Microsoft Excel 2007 softvera*, примењена је за израчунавање средњих вредности, стандардне девијације и варијансе променљивих.

### ***Анализа главних компоненти (PCA- principal components analysis )***

Термин анализа главних компоненти се односи на математичку методу за анализу података која гради линеарне вишепараметарске моделе на основу комплексног сета података. Линеарни вишепараметарски PCA модели развијају се

---

применом ортогоналних базних вектора, који се обично називају главне компоненте [53].

Анализа главних компоненти - РСА је вишепараметарска математичка метода у којој се испитују корелације између променљивих, а на основу тога се број променљивих смањује и одређују се нове, факторске координате. Ове трансформације (пресликавања) координата изводе се тако да прва факторска координата покрива највећу могућу варијансу система, а анализа се користи да се обезбеди највеће могуће раздвајање између група (кластера) које дефинишу променљиве. Ова метода препознавања сличности међу групама узорака се овде користи за карактеризацију и раздвајање узорака на основу уочених особина узорака (тј. на основу експерименталних мерења свих променљивих величина које се приписују одређеном узорку). РСА омогућава значајно смањивање броја променљивих, као и детектовање неких структурних зависности које постоје између експериментално мерених величина и различитих узорака. „Ауто скалирање“ се врло често користи за вишепараметарско поређење различитих комплексних узорака, при чему се узорци оцењују (рангирају) на основу средње вредности и стандардне девијације групе узорака. Пошто јединице, као ни скале различитих променљивих које описују поређене узорке нису исте, потребно је трансформисати податке свих мерења у тзв. стандардне оцене, бездимензионалне вредности које се добијају из разлике експерименталних (мерених) вредности и средње вредности, подељене са стандардном девијацијом групе узорака, према једначини:

$$\text{Стандардна оцена} = (x - \mu) / \sigma \quad (11)$$

при чему је  $x$  - мерени податак,  $\mu$  - средња вредност групе података, и  $\sigma$  - стандардна девијација. Целокупан скуп података се уводи у РСА анализу у облику "ауто-скалиране" матрице [54]. РСА ортогонално трансформише евентуално корелисане податке у скуп линеарно некорелисаних променљивих (главне компоненте). Факторске координате настају линеарним трансформацијама оригиналних променљивих, тако да првих неколико основних компоненти садрже већи део варијабилности оригиналног сета података. Трансформација је дефинисана тако да

прва главна компонента има највећу могућу варијансу (односно највећу могућу варијабилност података), а свака наредна компонента има највећу могућу варијансу под условом да буде ортогонална (тј. у корелацији) у односу на претходне компоненте. Најједноставнија врста PCA дели коваријансне (односно корелационе) матрице на тзв. својствене вредности (енгл. Eigenvalues), обично после центрирања средњих вредности (и нормализације) матрица за сваку променљиву. Сопствена вредност мери количину варијације која је описана помоћу факторских координата, при чему највећи утицај има прва основна компонента, а свака следећа мањи. Сопствена вредност већа од 1 указује да PCA урачунава више варијанси него оригиналне променљиве, тако да се обично за тумачење користе само те факторске координате. Резултати PCA анализе се обично тумаче на основу доприноса (енгл. score) променљивих у компонентама. PCA је најзаступљенија мултиваријациона анализа која открива међусобни однос података на начин који најбоље објашњава њихову варијансу [55]. PCA и корелациона анализа су урађене применом *StatSoft Statistica 10* програма [56].

***Полином другог реда (Second order polynomial model)  
Метода одзивне површине (Response Surface Methodology)***

Метода одзивне површине –(Response Surface Methodology -RSM) је развијена од стране аутора Box и Draper [57], а представља скуп математичких и статистичких поступака, који се примењују за формирање емпиријских модела и анализу процеса. Циљ методе је да се на основу пажљиво одабраног експерименталног плана оптимизују одзиви система ( $y$ ) који зависе од више независно променљивих параметара ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) како би се редуковали трошкови реализације великог броја експеримената [58]. Примена RSM методе обухвата три главне области: дизајн експеримента, фитовање модела и оптимизацију процеса [59].

Најчешће је одзивна функција  $y$  непозната, па се у општем облику може написати [60].

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + e \quad (12)$$



где су  $x_1, x_2, \dots, x_k$  независно промењиве величине,  $y$  је одзив или зависно промењива величина, а  $e$  представља остале утицајне факторе који нису обухваћени функцијом  $f$  (грешка мерења, утицај других фактора који не улазе у RSM једначине). Промењиве  $x_1, x_2, \dots, x_k$  у једначини (12) се обично представљају правим вредностима (нпр. 20°C), јер су изражене у мерним јединицама дате независно промењиве. Приликом примене RSM методе користе се кодиране вредности улазних величина које су углавном бездимензионе и тада функција има облик:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (13)$$

Свака од једначина назива се функција одзива, а њен геометријски приказ је одзивна површина. Одзиви система се представљају графички преко тродимензионалних површина или преко дводимензионалних контурних графика. Критична тачка приликом примене RSM методе је избор одговарајућег експерименталног плана. Најчешће коришћени експериментални планови у истраживањима су: Вох-Бехнкен дизајн (BBD), централни композитни план (CCD), потпуни експериментални план и др. Полином се показао као одговарајући облик одзивне функције, с обзиром да се квалитет фитовања експерименталних података може побољшати повећањем степена полинома. У већини случајева се користе полиноми првог или другог степена. Модели добијени на овакав начин су посебно погодни за решавање оптимизационих проблема, јер описују интеракције великог броја фактора, а и процена квалитета фитовања полиномских модела се може лако одредити [61]. Немогућност предвиђања вредности одзива изван испитиваног опсега процесних параметара је главни недостатак примене полиномских модела. Најједноставнији полином који се може применити је полином првог реда који у обзир узима само линеарне утицаје појединачних фактора:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (14)$$

Уколико постоји интеракција између испитиваних фактора, једначина добија следећи облик:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (15)$$

Ако је крајњи циљ поступка оптимизација процеса онда је неопходно користити полиноме другог реда за описивање одабраних одзива. Тада сваки од посматраних процесних параметара мора да има три или пет нивоа вредности у зависности од примењеног експерименталног плана. Полином другог степена са две променљиве има облик:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (16)$$

Полином другог степена се често користи у RSM и има следеће предности:

- полином другог степена је флексибилна функција и може имати различите облике;
- параметри једначине ( $\beta_i$ ) се једноставно одређују, метода најмањег квадрата се може применити у ову сврху.

Основни циљ примене RSM -а је одређивање оптималних параметара за описивање датог процеса. Уколико има више одзива које је потребно оптимизовати неопходно је наћи компромисно решење, тј. наћи оптималне услове за које ће сви посматрани одзиви бити у дефинисаном опсегу [62]. Други циљ примене RSM -а је утврђивање промене одзива система са променом процесних параметара. Предност RSM -а је у томе што је потребан мањи број експерименталних података да би се обезбедио довољан број информација за одређивање статистички валидних резултата. RSM једначине описују параметре система и њихов утицај на посматране одзиве система, одређују међузависности тестираних променљивих и испитују комбиноване ефекте параметара процеса на посматране одзиве, омогућавајући да се на ефикасан начин истражи процес.

### ***Анализа варијансе –Анова***

Пре одређивања ANN (Artificial neural network -вештачке неуронске мреже) модела препоручује се да се уради нека статистичка анализа доступних података као што је анализа варијансе - Анова у циљу провере утицаја улазних променљивих, преко излазних и да оправда касније коришћење ANN модела преко коефицијента

детерминације ( $r^2$ ). Све анализе и математички модели урађени су помоћу StatSoft Statistica 10.0 програма.

### **Вештачке неуронске мреже-ANN модели (Artificial Neural network)**

Неуронске мреже су системи сачињени од више једноставних елемената (неурона) који истовремено обрађују податке. Вештачке мреже “уче” из сетова података на основу којих се формира алгоритам методом проба-грешка, при чему се подешавају пропусни (тзв. тежински) коефицијенти између неурона. Обучавање неуронских мрежа се своди на учење из примера којих би требало да буде што више како би ANN била прецизнија. Подаци из скупа за учење се периодично пропуштају кроз мреже, а касније се добијене вредности упоређују са очекиваним и побољшавају мењањем тежинских коефицијената. При развијању ANN модела се, према препоруци из програма StatSoft Statistica, база података мерених вредности насумично дели на податке за учење (60%), проверу (20%) и тестирање неуронске мреже (20%). Део података који служе за проверу користи се за тестирање перформансе мреже у току процеса учења као индикатора нивоа генерализације и момента када је тај процес завршен. Подаци за тестирање служе за испитивање способности генерализације мреже. Због захтева алгоритма који се користи у прорачуну ANN, улазни и излазни подаци се уобичајено нормализују коришћењем једначине (17) у којој је  $q_i$  -ити члан који представља измерене вредности излазних параметара.

$$q_{i\text{norm.}} = \frac{q_i - \min(q_i)}{\max(q_i) - \min(q_i)} \quad (17)$$

Нормализоване променљиве имају вредности између 0 и 1, и немају никакво физичко значење. Сврха ових трансформација је промена расподеле улазних променљивих, како би се боље уклопила у расподелу предвиђених излаза. На овај начин се убрзава фаза учења мреже [63].

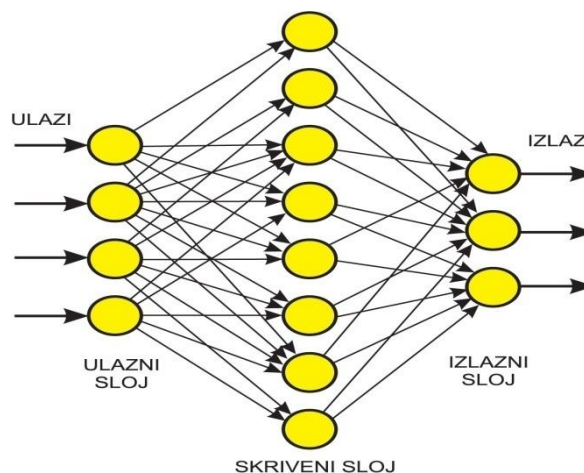
Неурони у мрежи су организовани у два или више слојева, где је први слој улазни, последњи излазни, а унутрашњи скривени слој, Слика 36. Ради развијања адекватне ANN мреже неопходно је изабрати оптимални број скривених слојева и неурона у њима. Више скривених слојева може довести до проблема локалних минимума и спорије конвергенције у току фазе учења мреже, далеко је повољнија примена само једног слоја. Организација слојева и начин њиховог повезивања специфична је за сваки задатак [64].

У оквиру ове докторске дисертације примењени су вишеслојни перцептрон модели (*Multi-Layer Perceptron* - MLP) који се састоје од укупно три слоја (улазног, скривеног и излазног), а представљају најуобичајенију и најфлексибилнију мрежу. Истраживања [65-67], су показала да су ови модели погодни за апроксимирање нелинеарних зависности.

Информација се преноси између слојева уз помоћ преносних и активационих функција, које су уобичајено линеарне за улазне и излазне слојеве, а нелинеарне у скривеном слоју. Најчешће нелинеарне активационе функције које се користе при рачунању ANN у StatSoft Statistica програм су: логаритамске, сигмоидалне, хиперболичке и тангентне функције (такође и експоненцијалне, синусне, и Гаусове). У већини примена, хиперболичке тангентне функције се понашају боље од осталих. MLP неуронске мреже „уче“ применом повратног простирања (*backpropagation*), при чему се решавање скупа нелинеарних једначина остварује употребом *Levenberg–Marquardt* алгоритма. Ова топологија ANN је једна од најчешће коришћених и проучаваних за различите инжењерске примене.

Средња квадратна грешка у израчунатој вредности неког излаза се шаље уназад кроз систем неурона, при чему долази до пропорционалних промена вредности тежинских коефицијената (*weights*) и нетачности рачунања (*biases*), које се повећавају или смањују, у зависности од правца грешке у предвиђању излаза у односу на експерименталну вредност, са циљем њеног минимизирања. Када су ове вредности измењене, улазни податак везан за други узорак улази у систем и процес се понавља. Циљ је да се обради што већи број узорака у фази учења, како би се обезбедио највиши квалитет излазних величина у односу на улазне, када је модел

развијен са најнижим вредностима SOS, ( Sum of Squares, сума квадрата) чиме се постиже оптимизација [68-71]. Да би се избегла прекомерна специјализација модела, примењује се поступак раног заустављања учења мреже, који је инкорпориран у поступак учења, у тренутку када се добију најмање вредности суме квадрата, SOS. [72]. Овако добијени модели типично имају велику предиктивну тачност на скупу примера за учење, а значајно нижу на новим, непознатим примерима података, или тестном скупу података.



Слика 36. Шематски приказ неуронске мреже са три слоја [72]

Првобитна процена потребног броја неурона добија се на основу једначине у којој  $x$  и  $y$  представљају број улазних и излазних неурона респективно, док је  $n$  број неурона у скривеном слоју, а  $m$  број тежинских коефицијената [73, 74], односно веза између слојева у неуронској мрежи :

$$m = n \cdot (x + 1) + y \cdot (n + 1) \quad (18)$$

Осим вредности SOS (сума квадрата), као параметар за проверу перформансе мрежа употребљен је корелациони коефицијент,  $r$ . Након одабира најбоље мреже, модел се може имплементирати коришћењем алгебарског система једначина ради предвиђања вредности механичких својстава  $S_0$ ,  $R_m$ ,  $R_p$  и  $A$ , заменом одговарајућих тежинских коефицијената и коефицијената у матрицама у једначини (19). Прорачуне је могуће извести у *Microsoft Office Excel*- у. Тежински коефицијенти везани за скривени слој, као и рачунске грешке односно остаци при рачунању, су груписани у матрицама  $W_1$  и  $B_1$ . Слично томе, коефицијенти који се односе на излазни слој су груписани у

матрицама  $W_2$  и  $B_2$ . Ако је  $Y$  матрикс излазних променљивих,  $f_1$  и  $f_2$  преносне функције у скривеном и излазном слоју респективно, а  $X$  матрикс улазних променљивих, ANN се може представити на следећи начин [71]:

$$Y = f_1(W_2 \cdot f_2(W_1 \cdot X + B_1) + B_2) \quad (19)$$

Тежински коефицијенти преносних функција неурона у матрицама  $W_1$  и  $W_2$  се одређују током обучавања мреже коришћењем оптимизације ради минимизовања грешака између излаза предвиђених мрежом и експерименталних података [73]. Грешке се рачунају на основу суме квадрата -SOS и BFGS (*Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno*) алгоритма, да би се конвергенција убрзала и стабилизовала [75].

Вештачке неуронске мреже -ANN представљају универзалне моделе који могу да користе било које линеарне или нелинеарне функције. Због флексибилности у апроксимацији функција, то су моћне методе у задацима који укључују класификацију модела, процену и предвиђање континуалних променљивих. Међутим, главни недостатак ANN је тешкоћа у интерпретацији стеченог знања на основу модела. Укратко, ANN модел функционише као „црна кутија“, односно не говори о томе како су добијени излази у моделу нити на који начин улази утичу на излазе [76]. Пошто веродостојност неког модела често зависи од могућности да се објасне закључци до којих се долази, понекад је потребно спровести и Sensitivity анализу [77-79].

### ***Фази синтетичка оптимизација (Fuzzy synthetic optimization )***

Фази теорија је осмишљена за описивање знања и закључивања на начин који се може једноставно представити на рачунару. Оснивач фази теорије био је професор Lofti A. Zadeh 1965. године, увођењем новог концепта заснованог на чињеници да математика може послужити за повезивање језика и људске интелигенције [80]. Реалност се боље описује речима него математичким формулама, а управо фази логика кроз своје изразе (фази скупове) пружа могућност једноставнијег моделовања стварности. Учестале промене и непредвидиве ситуације чине стваран свет фази

(нејасан, магловит), а фази техника нам пружа могућност да успешно управљамо реалним ситуацијама [81]. Применом класичне логике, могуће је користити једино информације које су потпуно тачне или потпуно погрешне. Немогуће је управљати информацијама које су непрецизне или некомплетне, иако такве информације могу понекад пружити боље решење проблема. Припадност скупу, у терминима класичне логике, означава се вредношћу 0, уколико елемент не припада скупу, а са вредношћу 1, када елемент припада скупу. Фази скупови су настали генерализацијом класичне поставке скупа, тако што је кодомен карактеристичне функције скупа проширен са скупа  $\{0, 1\}$  на јединични интервал. Тврдња у фази логици има више нивоа од потпуно тачног преко полу-тачног до потпуно погрешног. Иза фази логике стоји приближно уместо прецизног закључивања, а њен значај и велики потенцијал огледа се у чињеници да је људско размишљање по природи апроксимативно. Једна од најбитнијих особина фази логике јесте могућност да изрази степен неодређености у човековом размишљању и његову субјективност [82]. Постоје механизми у области фази логике, који налазе примену у дефинисању и проналажењу фази функционалних зависности у већим базама података, које мењају функцију класичних релација, интегришући непрецизности, неодређености и неједнозначности занемарљиве у реалним апликацијама и системима [83].

Значај и улога фази функционалних зависности је у пружању приступа информацијама из базе на један флексибилнији и приступачнији начин. Циљ није добијање што више информација, већ кориснија и ефикаснија знања, у смислу поседовања филтрираних информација уместо огромне количине података које су складиштене у посматраним релацијама. Због тога се у пракси, приликом доношења управљачких одлука, све више примењују сазнања добијена анализом фази функционалних зависности.

Фази логика се примењује у случајевима који су окарактерисани непостојањем математичког модела или постојањем модела који је исувише комплексан. Зато је фази логика нашла примену у теорији управљања, квантитативној анализи, експертским системима за дијагностику, планирање и предикцију, у веома разноврсним комерцијалним, информационим, инжењерским и индустријским

системима. Оптимизација параметара процеса је изведена коришћењем алгоритма фази синтетичка евалуација (Fuzzy Synthetic Evaluation - FSE) која је реализована у макро функцији у Microsoft Excel 2007. FSE је имплементиран, користећи резултате развијеног модела који су представљени излазним променљивима користећи једначину (20). Трапезоидна функција припадности [83, 84], која се користи у овом прорачуну, може се написати као:

$$F(x, a, m, n, b) = \begin{cases} a \leq x < m, & \frac{x-a}{m-a} \\ m \leq x < n, & 1 \\ n \leq x < b, & 1 - \frac{x-n}{b-n} \end{cases} \quad (20)$$

где је  $x$  зависно променљива било  $S_0$ ,  $Rm$ ,  $Rp$  и  $A$ , а вредности  $a$ ,  $b$ ,  $m$  и  $n$  су параметри функције. Интервал  $a - b$  представља опсег у коме се налазе мерене вредности, док је распон  $m - n$  распон очекиваних оптималних вредности у коме се крећу излазне променљиве.

## 6.7 Нумеричка симулација процеса топлог ковања легуре EN AW 7075

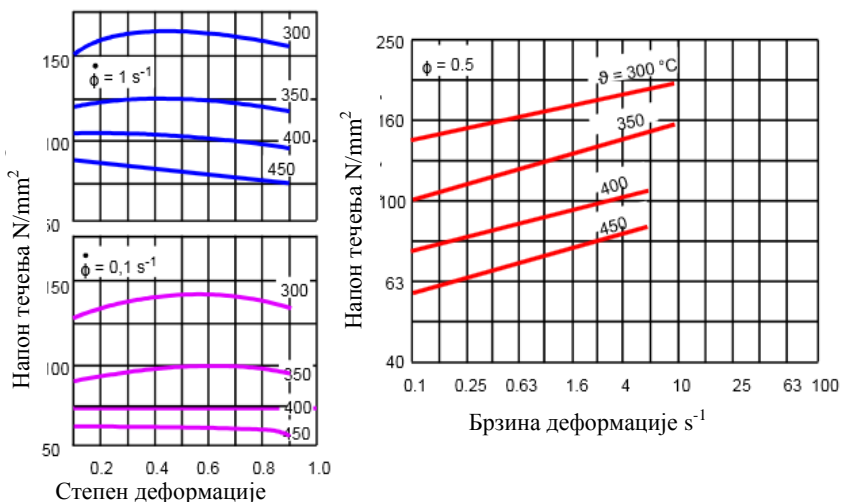
Нумеричка симулација са одговарајућим софтвером представља ефикасан и користан алат за предвиђање технолошких процеса и пратећих проблема уз значајно смањење времена и трошкова производње нових производа. Приликом пројектовања алата за поступак топлог ковања неопходно је у погонским условима вршити пробе или редизајнирање појединих елемената. Коришћењем симулација са моделима високе флексибилности омогућава се виртуелна провера и успешан одабир оптималних параметара геометрије пројектованог алата [85]. Нумеричке симулације су базиране на знањима о самој физици процеса и провереним експерименталним резултатима и користе се за предвиђање течења материјала, одређивање дистрибуције деформација, напона, температура, напрезања на алатима, потенцијалних извора дефеката и ломова, особина и микроструктуре производа.



Уопштено говорећи постоје два основна циља у примени нумеричке симулације у интегрисаном пројектовању производа и процеса то су:

- адекватна процена параметара процеса пројектовања алата и
- побољшање квалитета производа и смањење трошкова производње

У оквиру ове докторске дисертације за симулацију процеса топлог ковања коришћен је софтвер Simufact.forming 11 чија се лиценцирана инсталација налази на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Simufact.Forging 11 представља комбинацију сложеног солвера и једноставног корисничког окружења које је посебно прилагођено за 3D симулације запреминског обликовања. Метода коначних запремина је брза и прецизна и користи се за праћење деформисања материјала и аутоматско побољшавање елементарних малих површина на слободним површинама модела. У овом приступу деформисани материјал једноставно тече кроз фиксну мрежу коначних запремина пратећи контуре алата. У оквиру дисертације је урађена анализа за осносиметричан комад димензија  $\varnothing 90 \times 216 \text{ mm}$ . Материјал за ковање је алуминијумска легура EN AW 7075 која је одливена у присуству електромагнетног поља фреквенције 30 Hz. Да би се поступак нумеричког моделовања извео потребни су улазни подаци који описују феномене ојачања при ковању. На Слици 37. приказане су криве течења за алуминијумску легуру EN AW 7075 у зависности од температуре и брзине деформације.



Слика 37. Криве течења у зависности од температуре и брзине деформација за легуру EN AW 7075 [3]

За разлику од челика легуре алуминијума су врло осетљиве на промену брзине деформације. Хемијски састав наведене легуре дат је у Табели 5. на страни 58. Пре почетка обраде ковачки алат се загрева на температуру од 250 °С, а комад на температуру предвиђену за ову врсту материјала од 405 до 415 °С. Материјал од кога се израђује алат је  $\check{C}$  4751 (H13). Процес ковања се изводи у две операције претходним сабијањем и завршним ковањем на хидрауличној преси LASCO 1600. Фактор трења је  $m=0.6$ , а брзина деформисања 250 mm/s. При стартовању софтвера дефинише се процес обраде, односно метода која се користи за симулацију, а то је метода коначних запремина. После дефинисања методе којом се процес симулира врши се унос свих потребних елемената за симулацију. У овом случају то су материјал предмета обраде, материјал алата, преса на којој се врши ковање, модели горњег и доњег дела алата и радног комада. Познавање карактеристика материјала је од изузетног значаја за симулацију процеса обликовања материјала. Да би симулација била реализована потребно је да се изврши правилно позиционирање модела горњег и доњег дела алата и радног комада. Ова три модела се постављају у одговарајући положај помоћу палета алата за манипулацију моделима. Овим се завршава припрема елемената за симулацију.

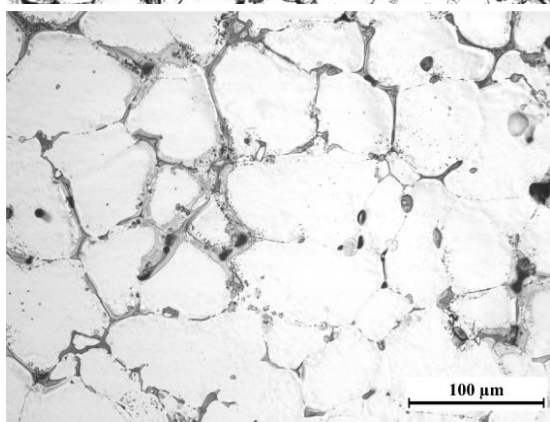
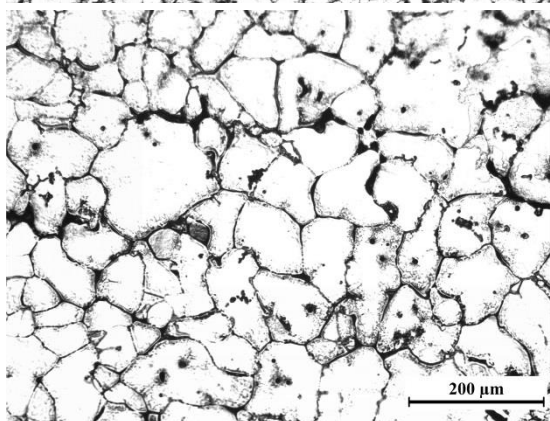
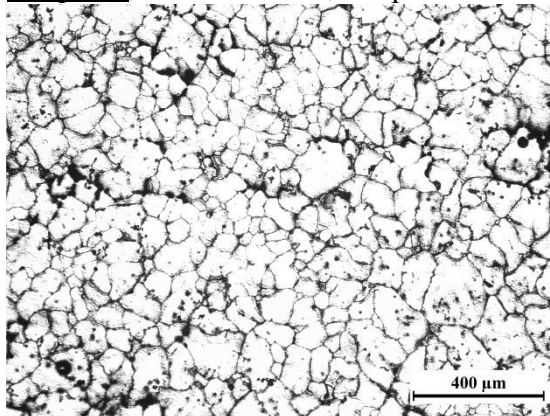
## **7. РЕЗУЛТАТИ**

## 7.1 Ливено стање

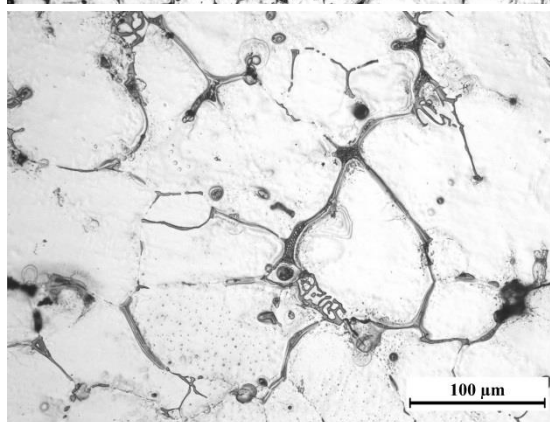
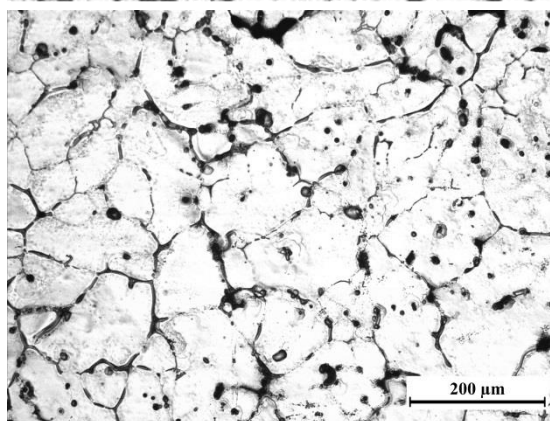
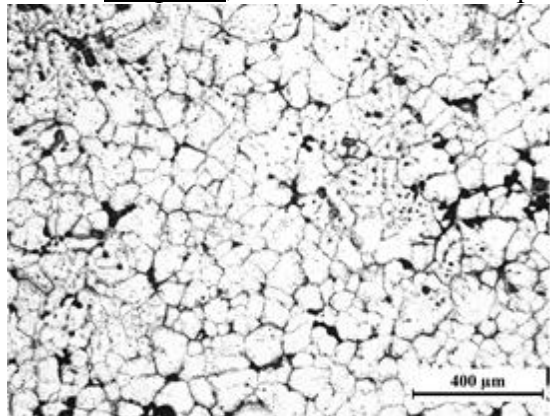
### 7.1.1 Оптичка микроскопија

На сликама 38, 39, 40, 41 и 42 приказан је карактеристичан изглед микроструктура при различитим повећањима по пресеку узорка 0, 1, 2, 3 и 4 добијених при условима ливења који су приказани у Табели 6., стр. 59. Сви узорци су нагризани у Келеровом реагенсу. Снимци су прављени близу површине и у центру пресека узорка, док је квантитативна микроструктурна анализа урађена по целом попречном пресеку.

Узорак 0, ливено стање, површина

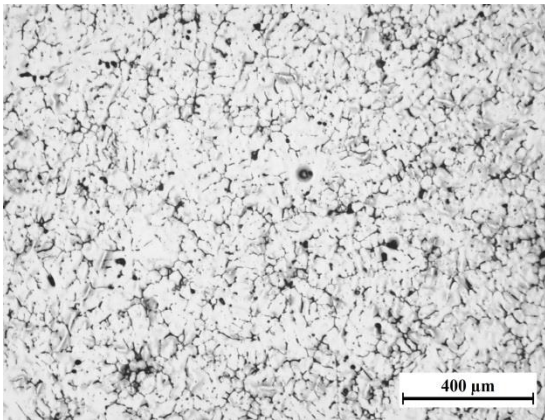


Узорак 0, ливено стање, центар

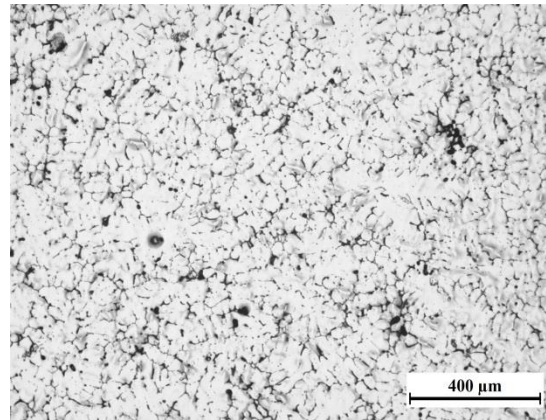


Слика 38. Микроструктура по пресеку узорка 0 (ливен без утицаја поља) при различитим увећањима, Келеров реагенс

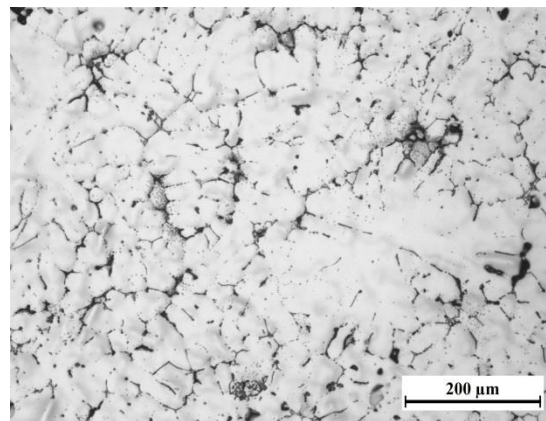
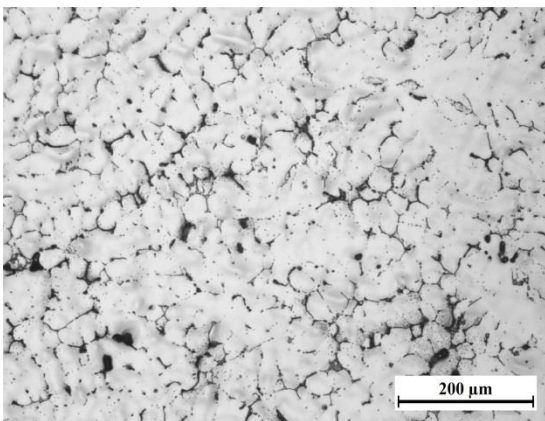
Узорак 1, ливено стање, површина



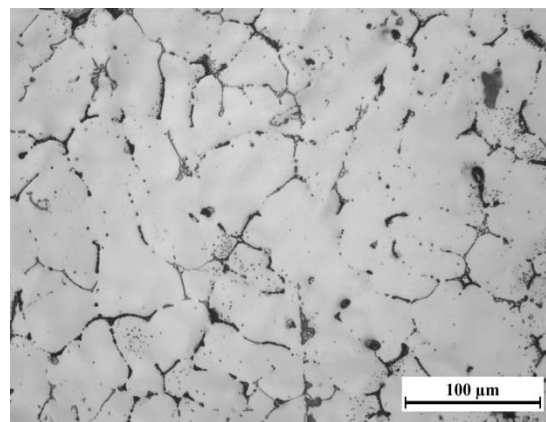
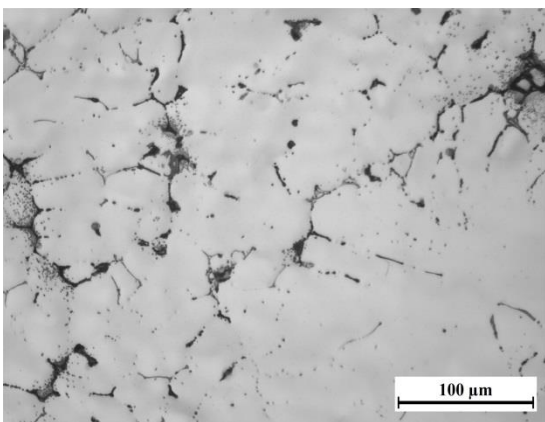
Узорак 1, ливено стање, центар



50x



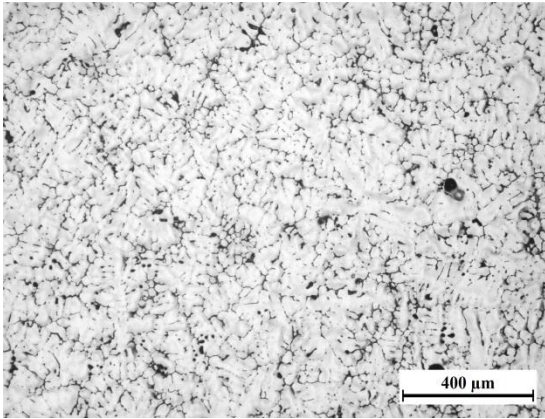
100x



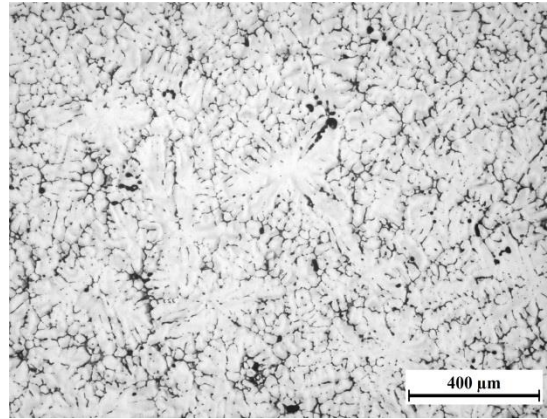
200x

Слика 39. Микроструктура по пресеку узорка 1 (10 Hz), при различитим увећањима,  
Келеров реагенс

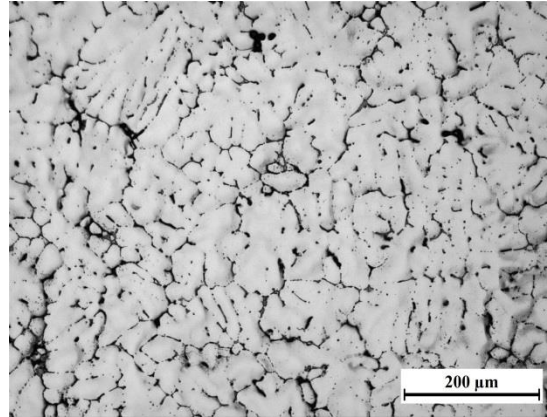
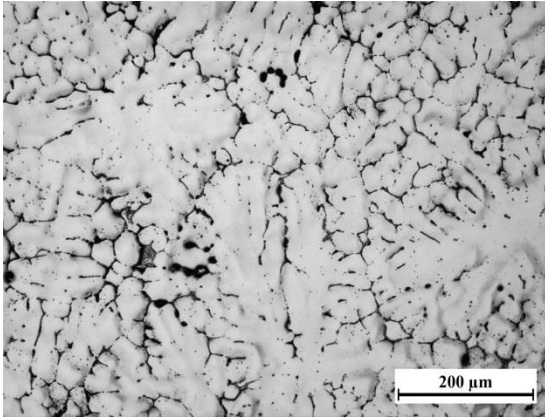
Узорак 2, ливено стање, површина



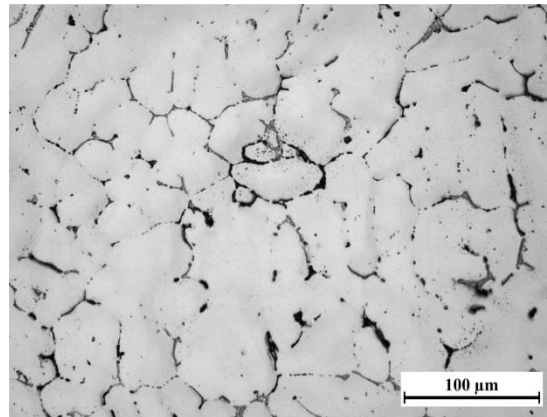
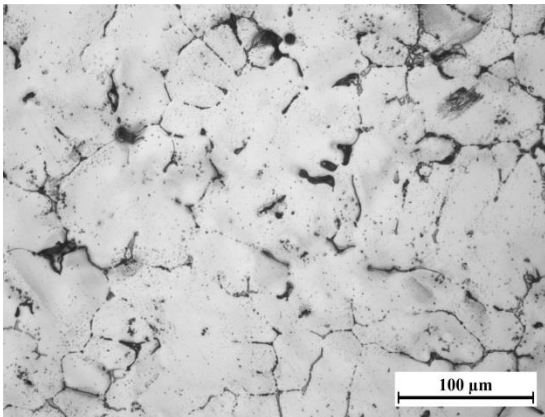
Узорак 2, ливено стање, центар



50x



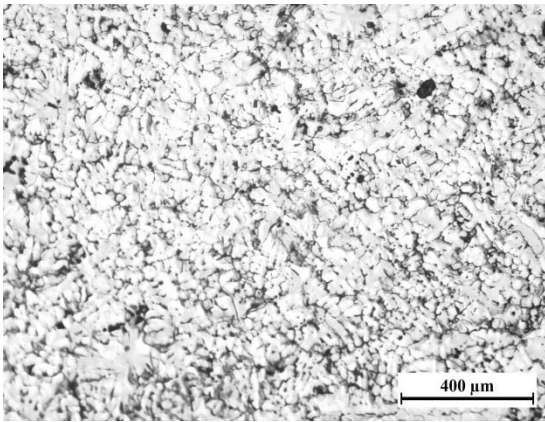
100x



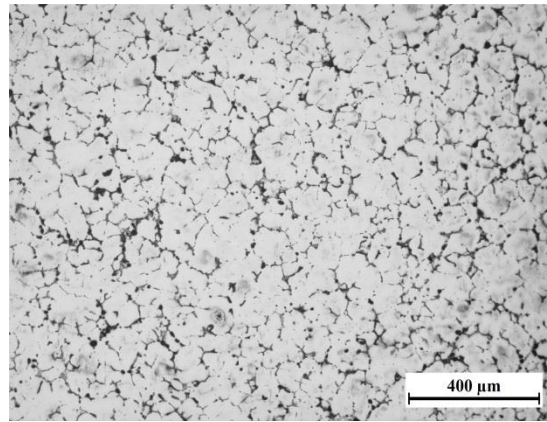
200x

Слика 40. Микроструктура по пресеку узорка 2 (15 Hz), при различитим увећањима,  
Келеров реагенс

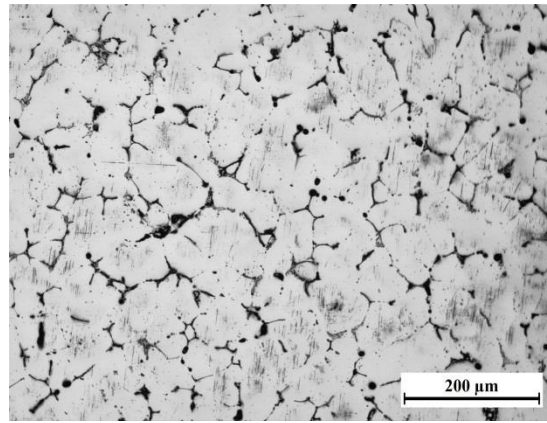
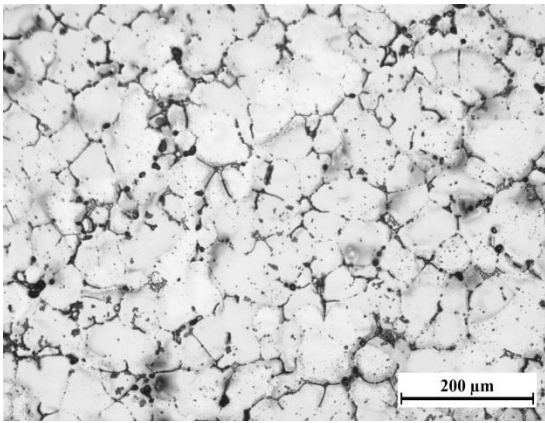
Узорак 3, ливено стање, површина



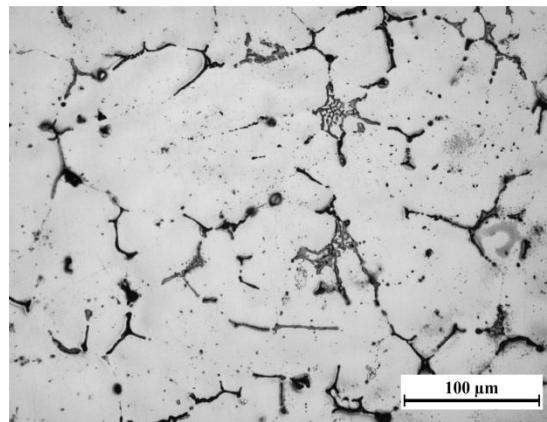
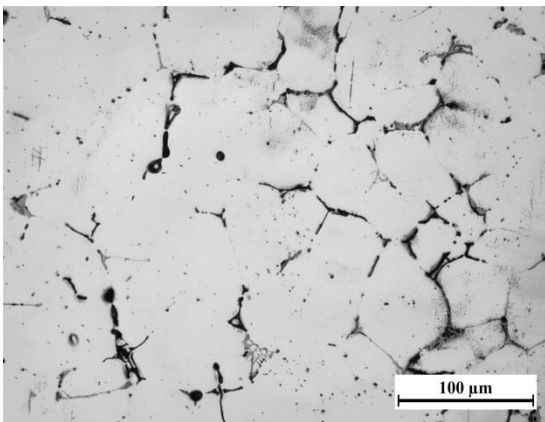
Узорак 3, ливено стање, центар



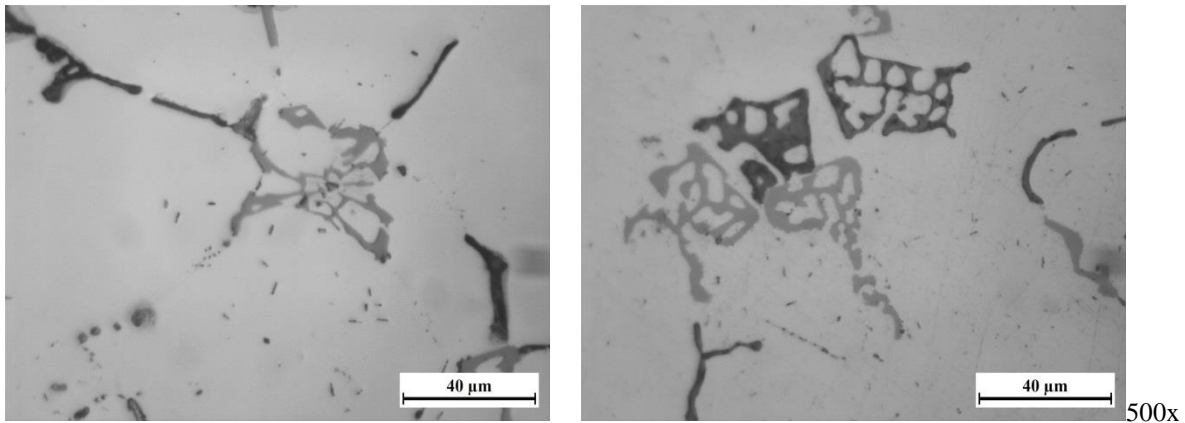
50x



100x

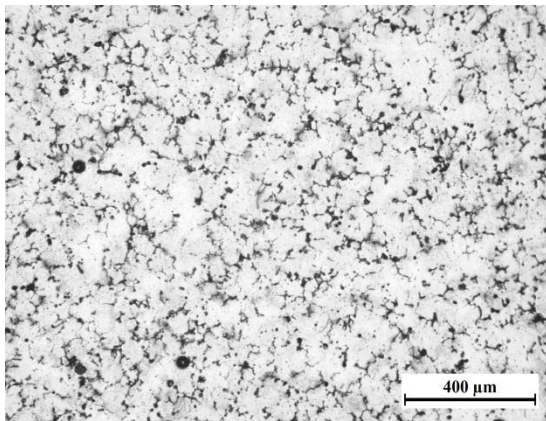


200x

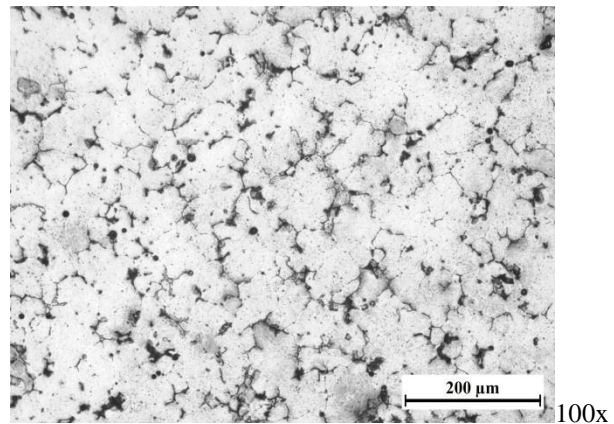
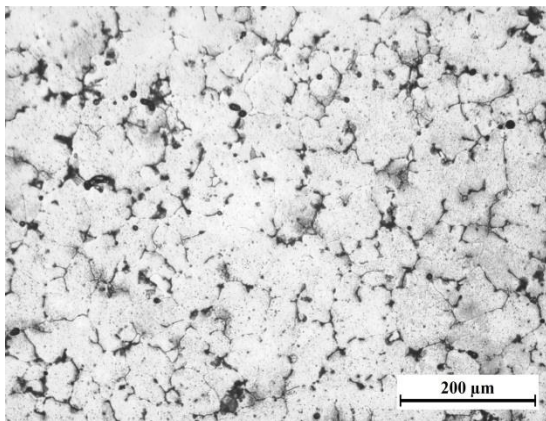
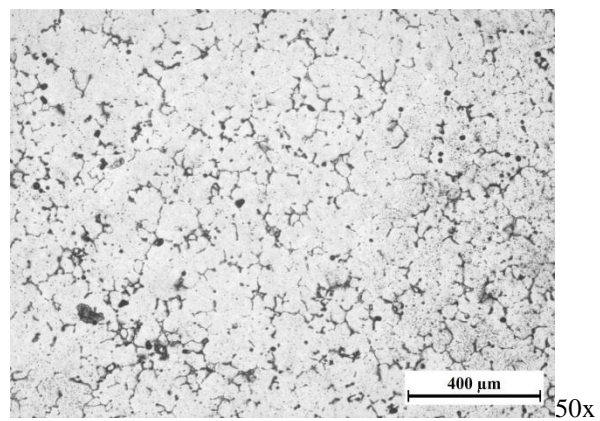


Слика 41. Микроструктура по пресеку узорка 3 (20 Hz), при различитим увећањима,  
Келеров реагенс

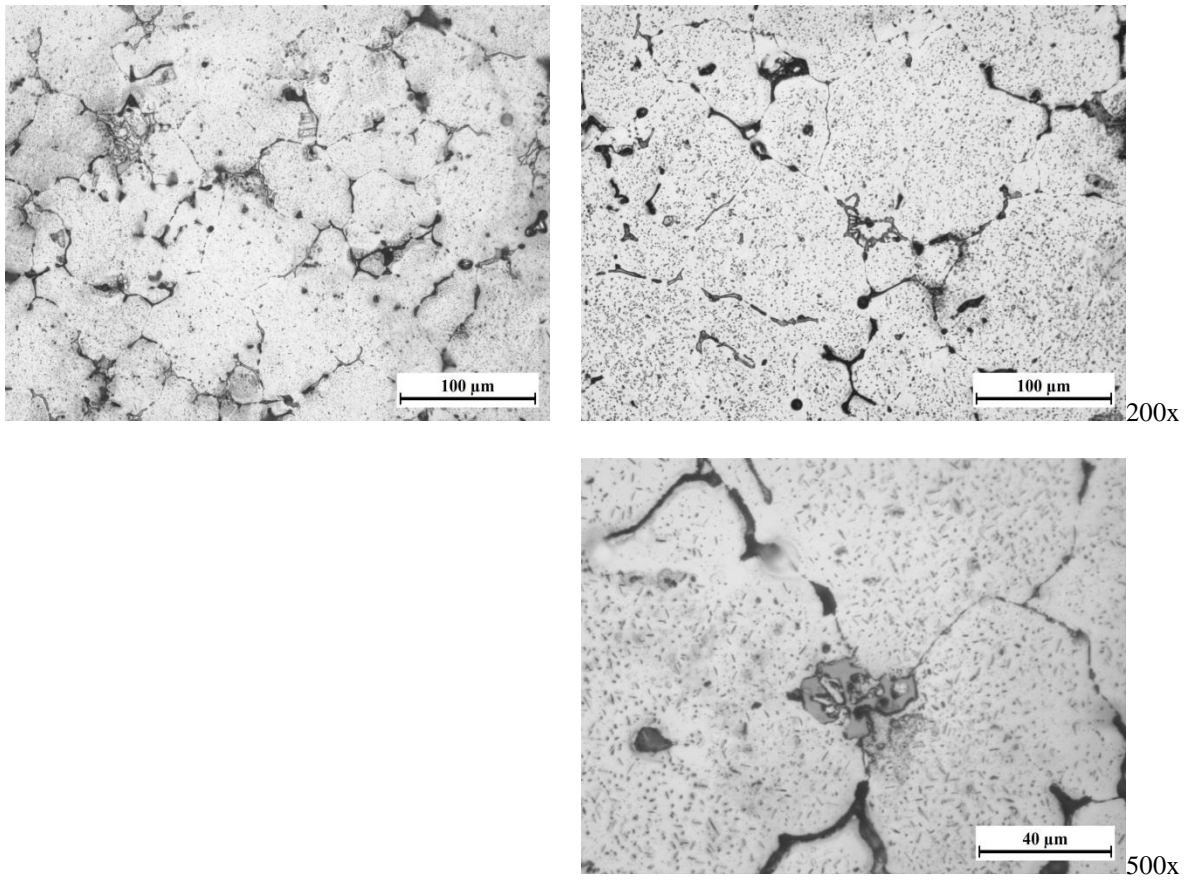
Узорак 4, ливено стање, површина



Узорак 4, ливено стање, центар







Слика 42. Микроструктура по пресеку узорка 4 (30 Hz), при различитим увећањима, Келеров реагенс

**Квантитативна микроструктурна анализа**

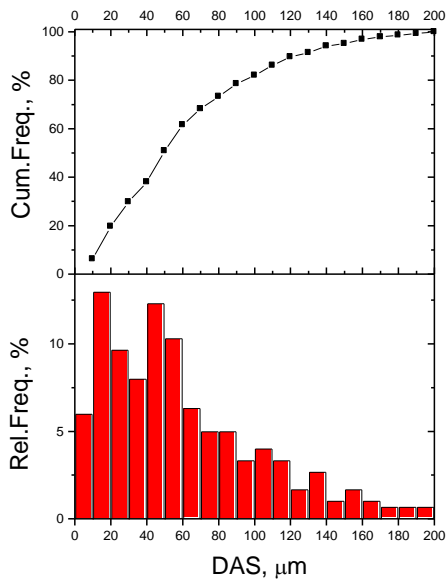
Резултати мерења геометријских параметара микроструктура ширина секундарних дендритних грана ,DAS, ширина међудендритног (међућелијског) простора у коме су излучене интерметалне фазе,  $L_{IMF}$ , и њихов количински удео  $V_{V IMF}$  приказани су у Табели 7. Дате су минималне, максималне и средње вредности мерених параметара. На Слици 43. приказани су хистограми расподеле вредности параметара DAS и  $L_{IMF}$  као и одговарајуће кумулативне криве у функцији фреквенције електромагнетног поља.

Табела 7. Измерене вредности структурних параметара узорак у ливеном стању

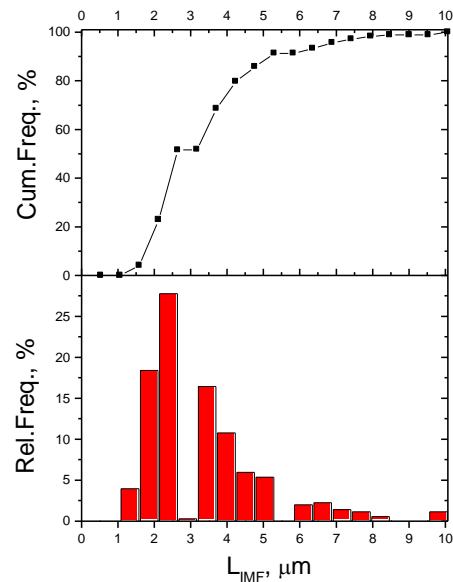
Параметар \ Узорак	DAS ( $\mu\text{m}$ )			$L_{IMF}$ ( $\mu\text{m}$ )			$V_{V IMF}$ (%)
	мин	макс	ср	мин	макс	ср	$V_{V IMF}$
0	2.06	305.23	66.35	1.30	29.94	3.63	6.55
1	1.95	254.46	64.69	1.30	16.27	3.26	7.08
2	1.95	348.83	57.90	1.30	30.59	3.11	7.21
3	3.90	218.67	49.37	1.33	31.89	2.93	7.40
4	3.90	197.19	47.12	0.65	13.67	2.68	8.73

**Узорак 0 (ливен без поља)**

Параметар DAS

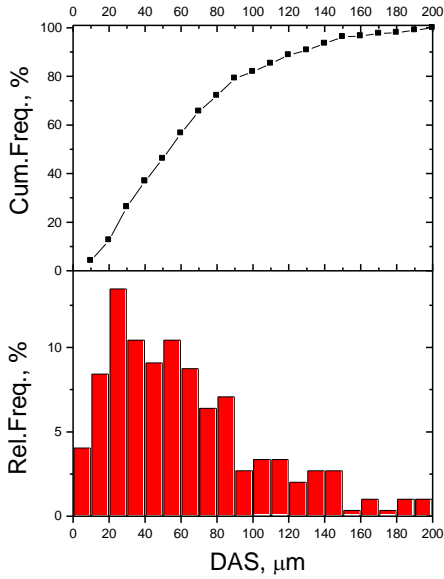


Параметар  $L_{IMF}$

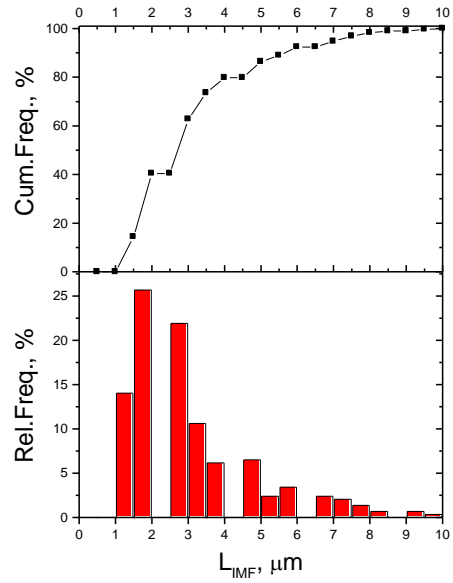


**Узорак 1 (10 Hz)**

Параметар DAS

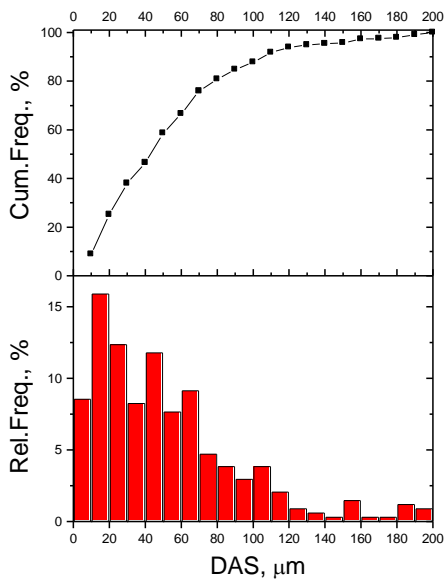


Параметар  $L_{\text{IMF}}$

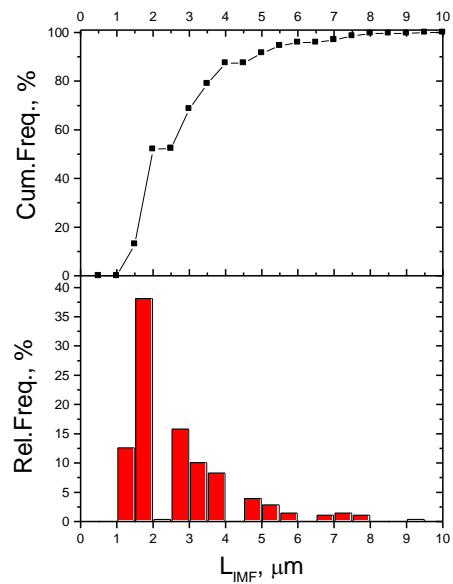


**Узорак 2 (15 Hz)**

Параметар DAS

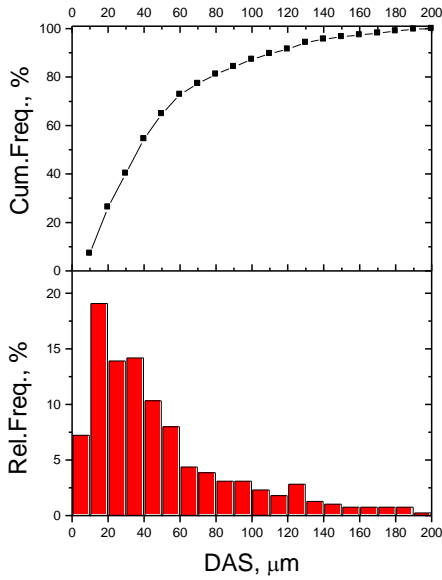


Параметар  $L_{\text{IMF}}$

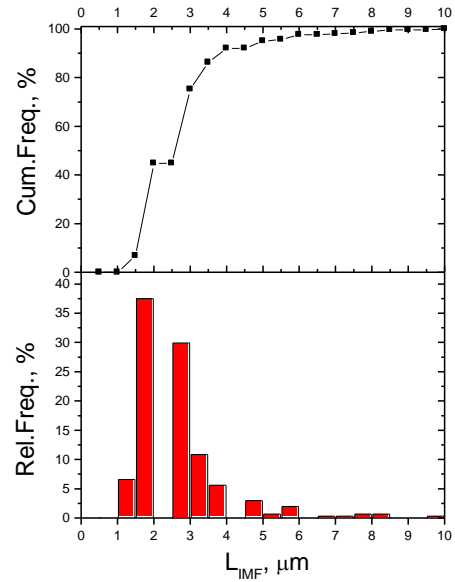


**Узорак 3 (20 Hz)**

Параметар DAS

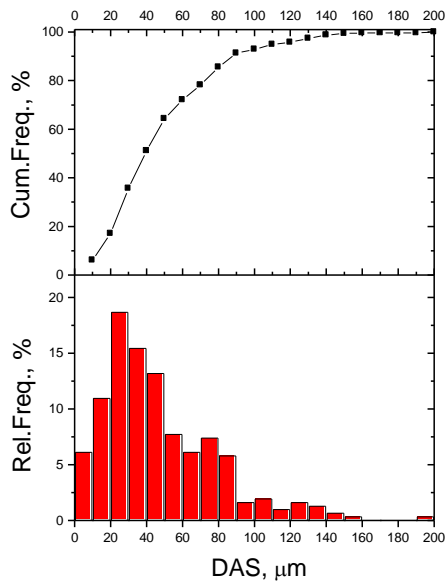


Параметар  $L_{\text{IMF}}$

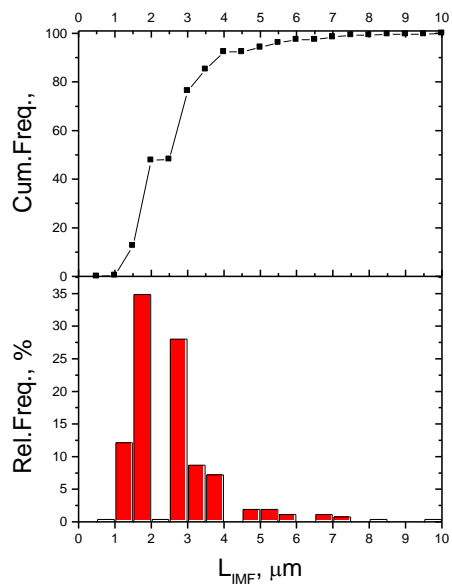


**Узорак 4 (30 Hz)**

Параметар DAS

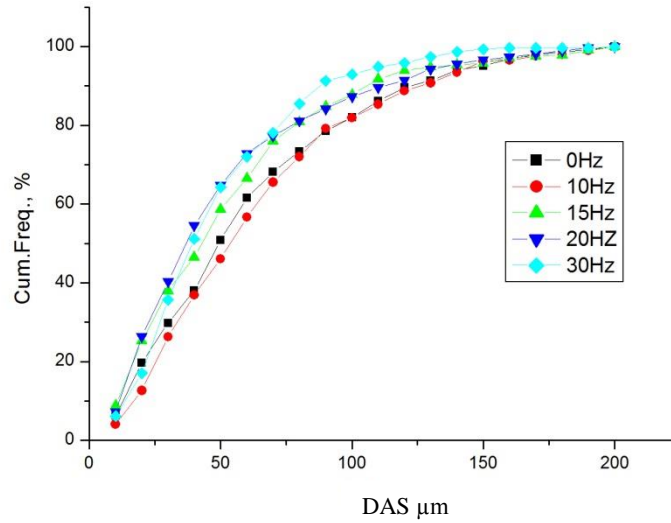


Параметар  $L_{\text{IMF}}$

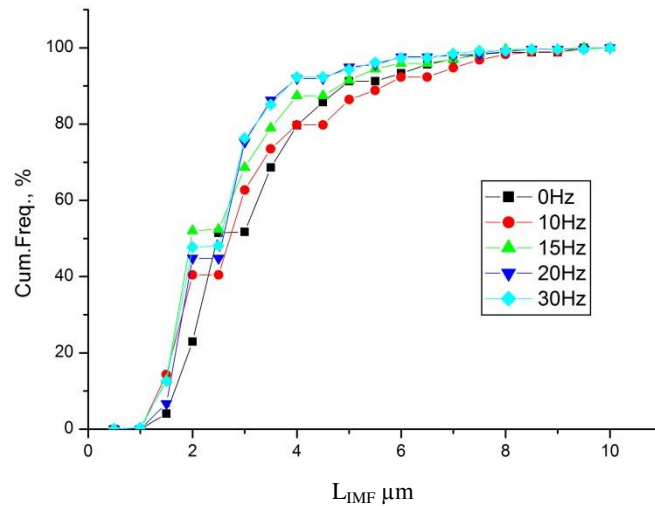


Слика 43. Хистограми и кумулативне криве расподеле вредности параметара DAS и  $L_{\text{IMF}}$  за узорке 0 (без поља), 1 (10 Hz), 2 (15 Hz), 3 (20 Hz), 4 (30 Hz)

Ради боље прегледности резултата мерења структурних параметара DAS и  $L_{IMF}$  на Слици 44. приказане су упоредно кумулативне криве испитаних узорака у ливеном стању.



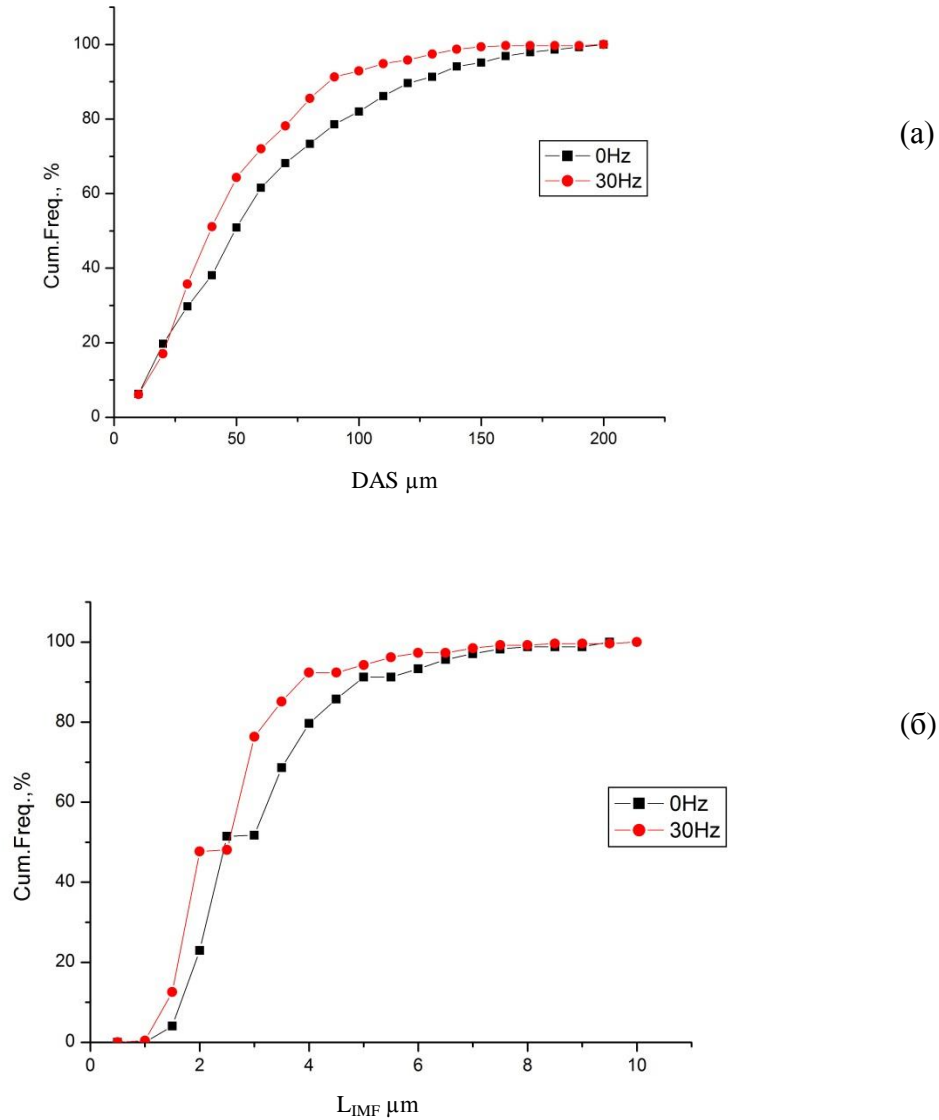
(a)



(б)

Слика 44. Кумулативне криве расподеле параметра DAS (а) и  $L_{IMF}$  (б) у функцији фреквенције електромагнетног поља, за узорке 0 (без поља), 1 (10Hz), 2 (15Hz), 3 (20Hz) и 4 (30Hz)

На Слици 45. су издвојено приказане, ради лакшег уочавања разлика, кумулативне криве расподеле параметара DAS и  $L_{IMF}$  за узорке 0 (без поља) и 4 (30 Hz) између којих су показане највеће разлике.

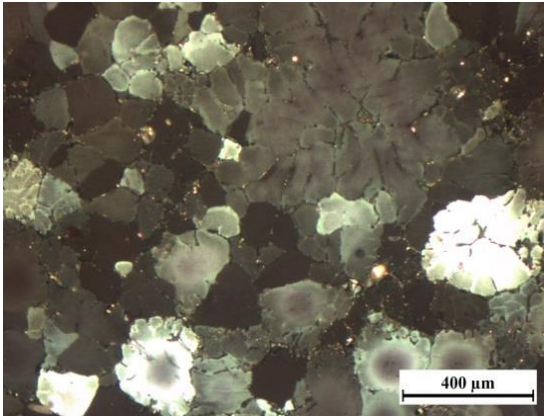


Слика 45. Кумулативне криве расподеле параметра DAS (а) и  $L_{IMF}$  (б) у функцији фреквенције електромагнетног поља, за узорке 0 (без поља) и 4 (30 Hz)

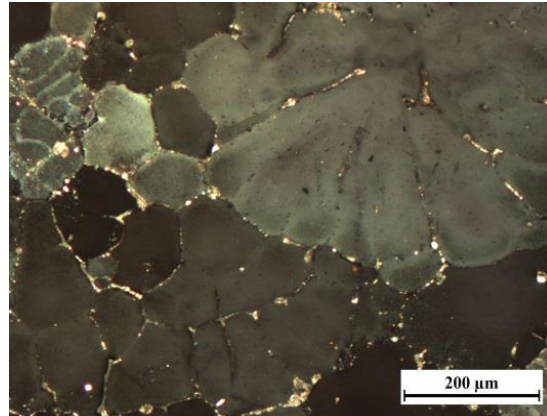
**Величина зрна**

На слици 46. приказан је изглед зрна, након анодне оксидације у Баркеровом реагенсу, за узорке 0 (без поља), 1 (10Hz), 2 (15Hz), 3 (20Hz) и 4 (30Hz).

**Узорак 0**

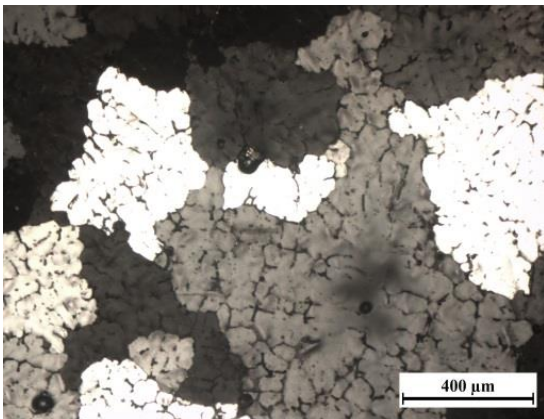


50x

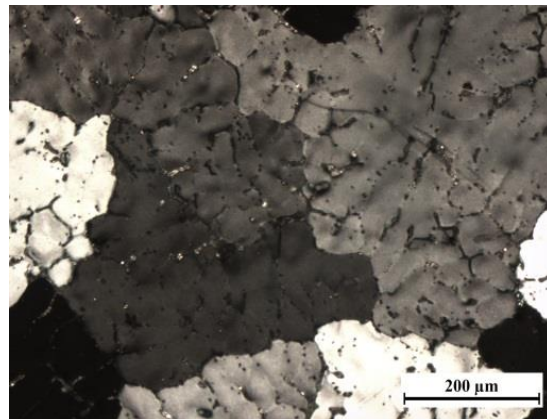


100x

**Узорак 1 (10Hz)**

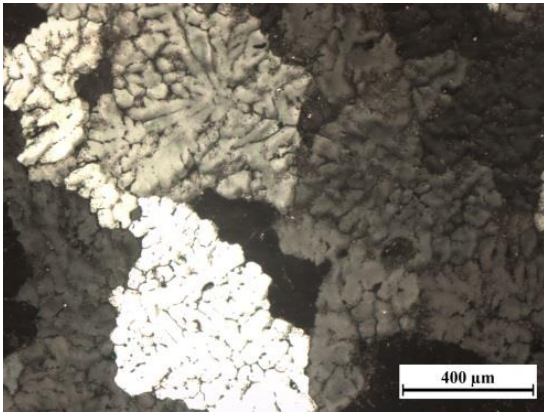


50 x

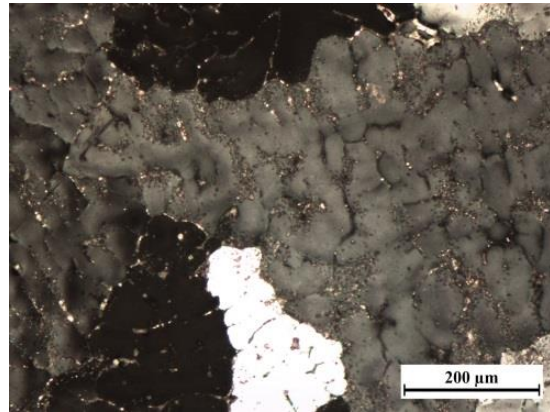


100x

**Узорак 2 (15 Hz)**

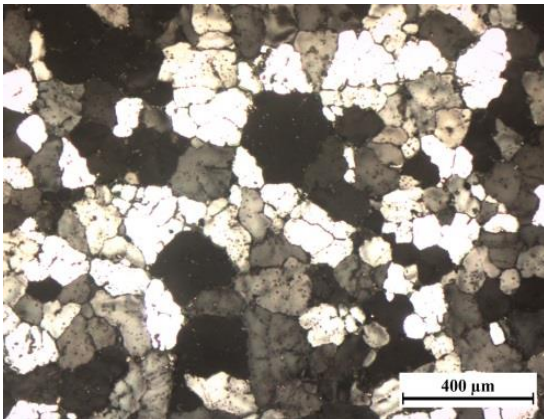


50x

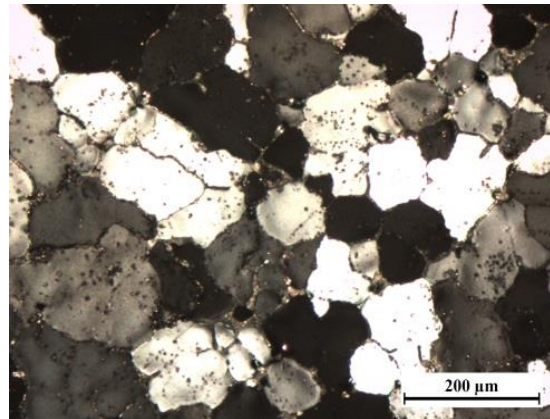


100x

**Узорак 3 (20 Hz)**

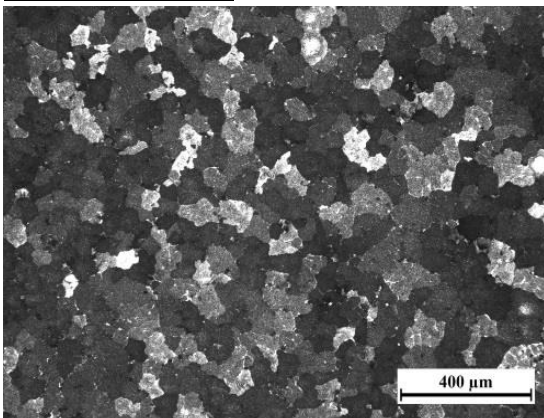


50x

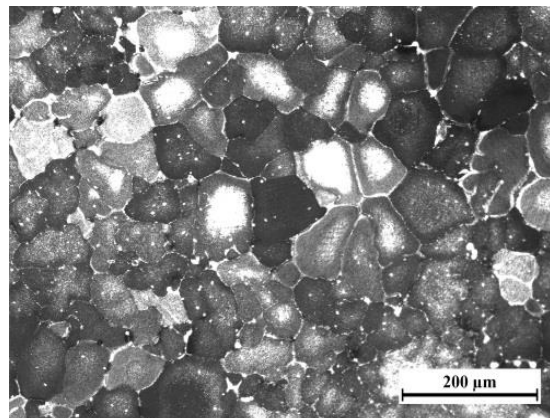


100x

**Узорак 4 (30Hz)**



50x



100x

Слика 46. Изглед зрна код узорака 0 (без поља), 1 (10Hz), 2 (15Hz), 3 (20Hz) и 4 (30Hz), Баркеров реагенс, поларизовано светло, 50x и 100x

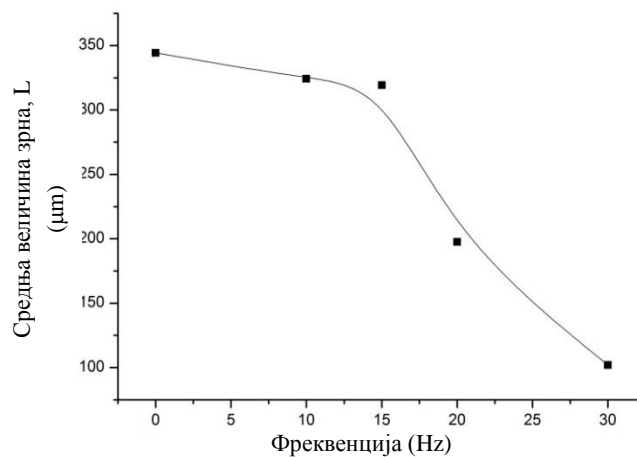


Измерене минималне, максималне и средње вредности величине зрна, L, приказане су у Табели 8.

Табела 8. Измерене вредности величине зрна, L, за узорке у ливеном стању

Величина зрна, L ( $\mu\text{m}$ ) Узорак	Мин	Макс	Средња
Узорак 0	124.96	464.96	344.41
Узорак 1	134.96	468.43	324.15
Узорак 2	121.78	435.12	319.31
Узорак 3	98.36	266.75	197.56
Узорак 4	87.28	189.35	101.98

На Слици 47. је приказана зависност средње величине зрна, L од фреквенције електромагнетног поља, за узорке у ливеном стању.

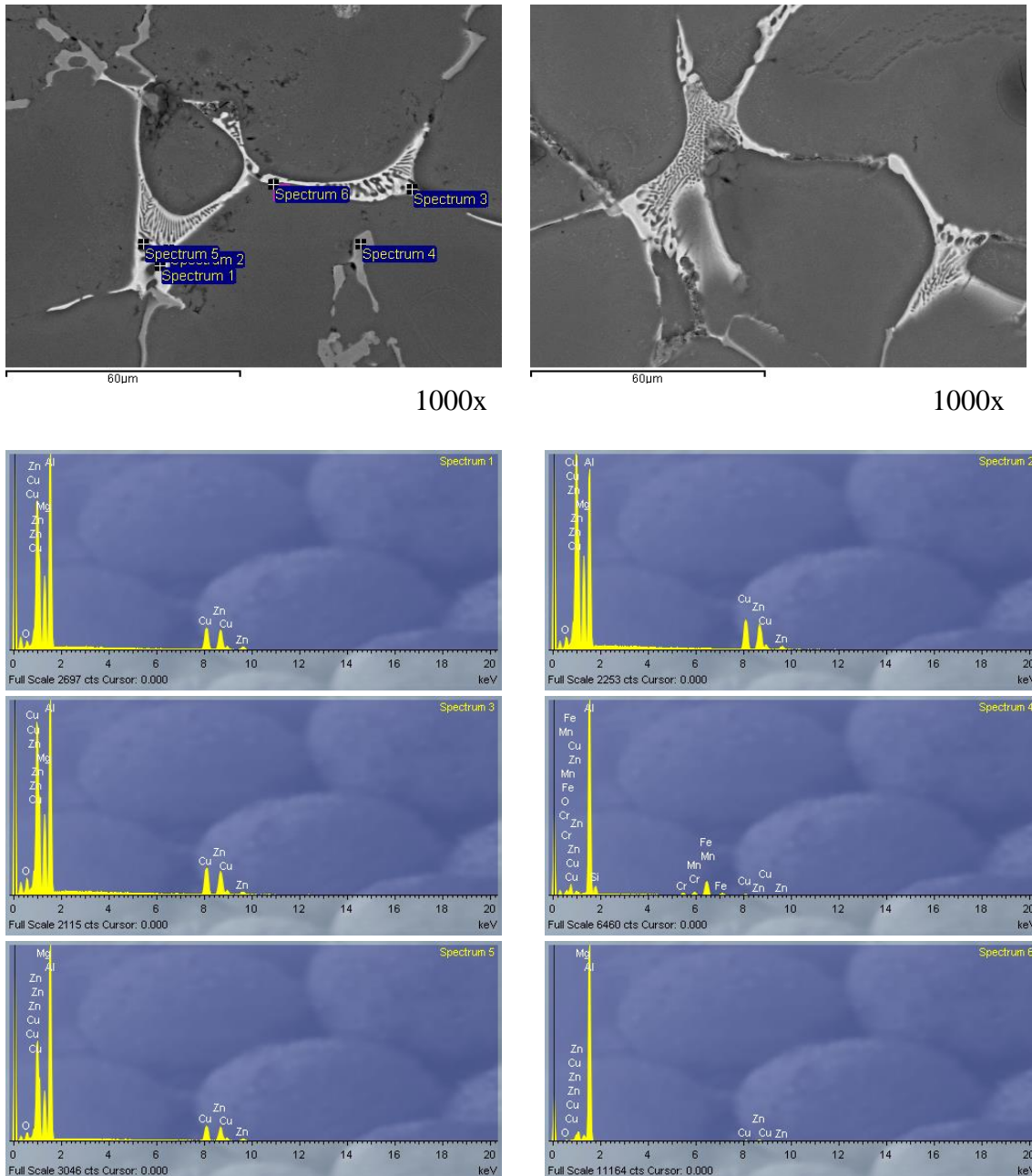


Слика 47. Средња величина зрна узорка у ливеном стању у зависности од фреквенције електромагнетног поља

### 7.1.2 Скенирајућа електронска микроскопија SEM /EDX анализа

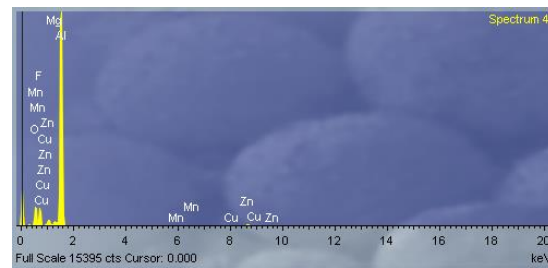
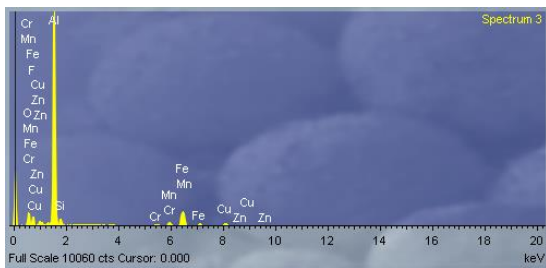
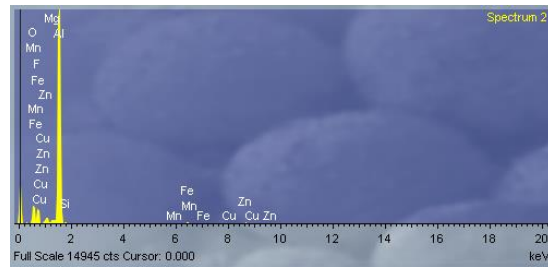
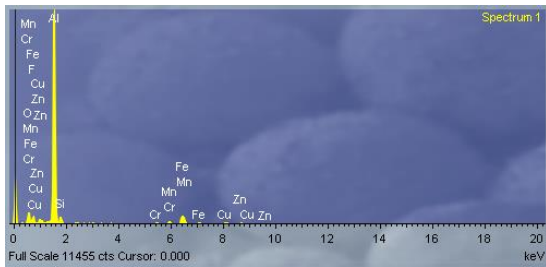
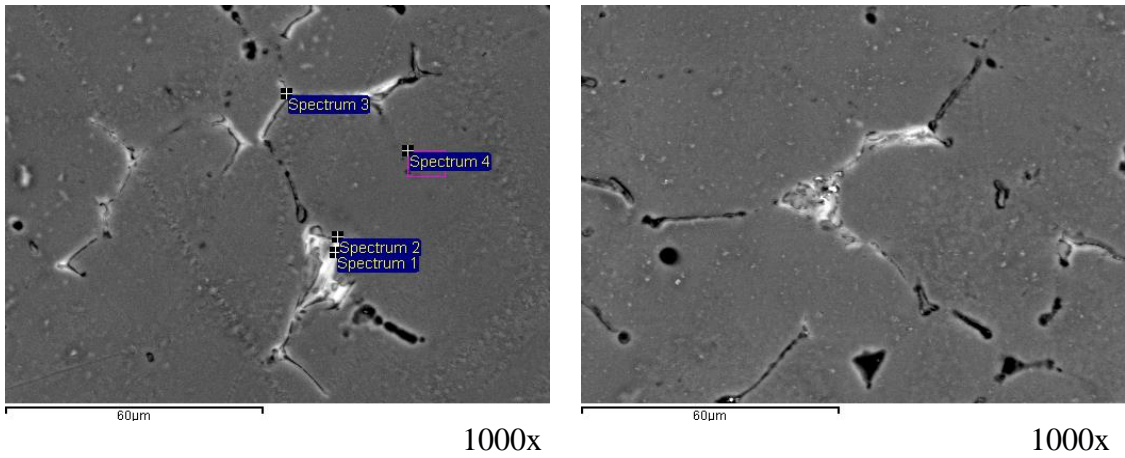
На Сликама 48, 49, 50, 51 и 52 приказане су SEM микрофотографије испитаних узорака 0 (без поља), 1 (10 Hz), 2 (15 Hz), 3 (20 Hz), 4 (30 Hz) у ливеном стању и одговарајући спектри добијени EDX анализом

#### Узорак 0



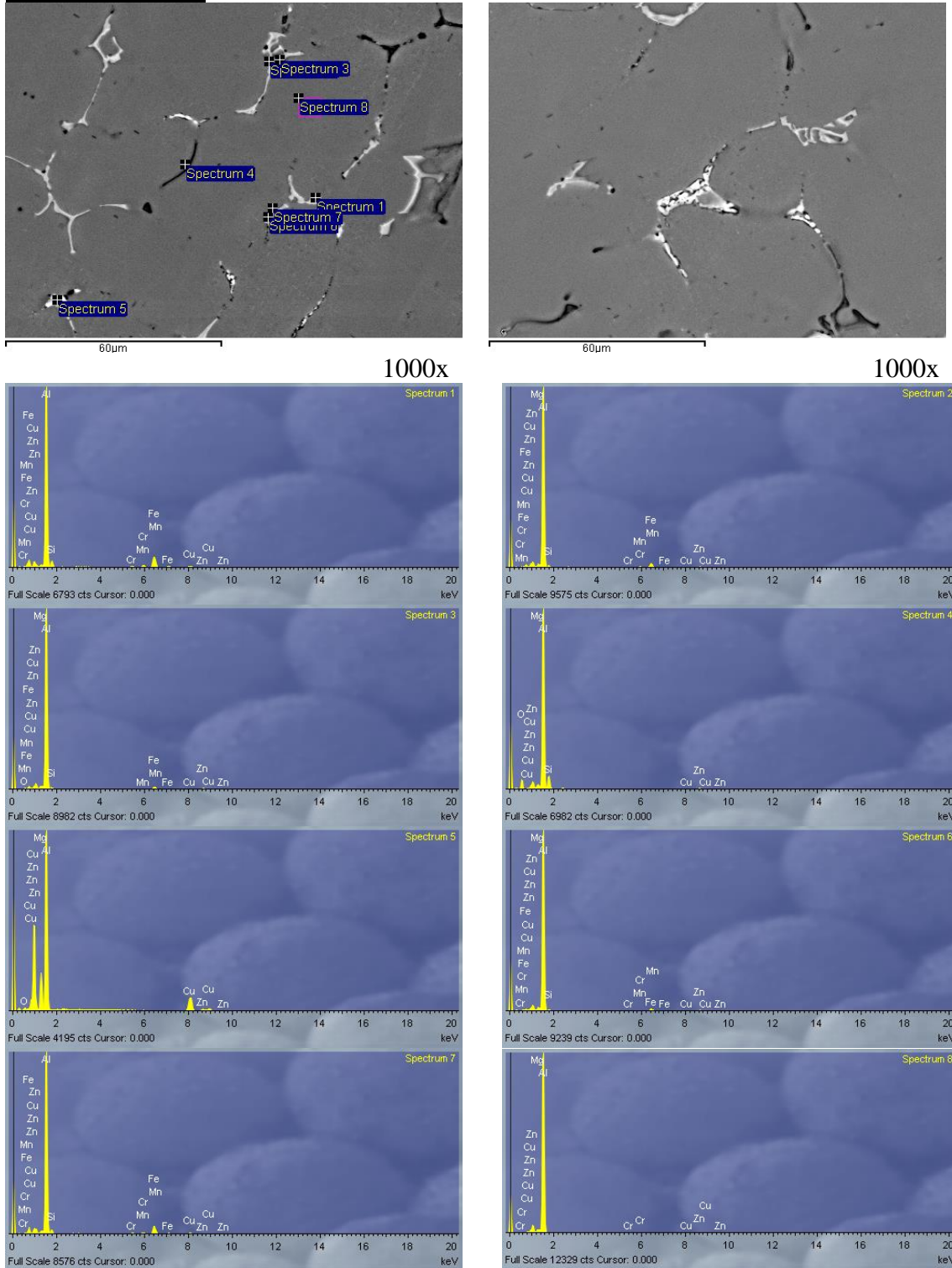
Слика 48. SEM микрофотографије узорка 0 у ливеном стању и одговарајући спектри добијени EDX анализом

**Узорак 1 (10 Hz)**



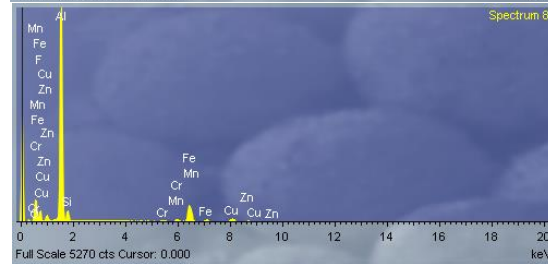
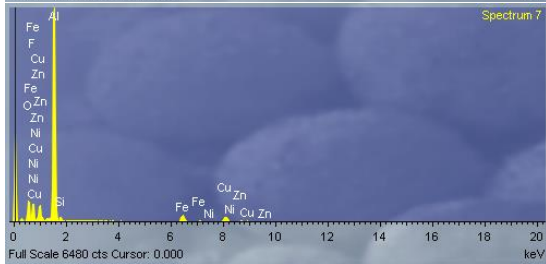
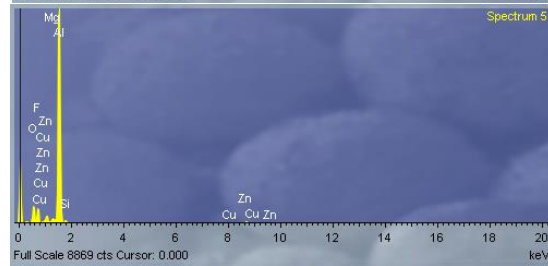
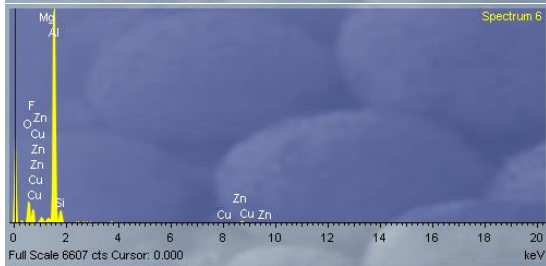
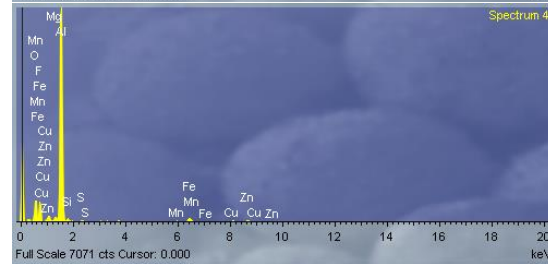
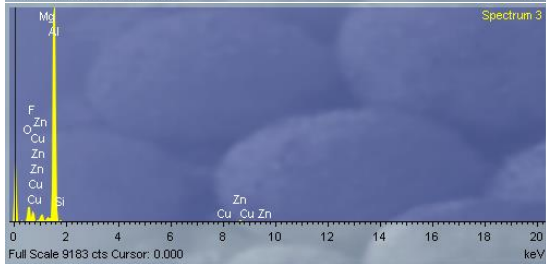
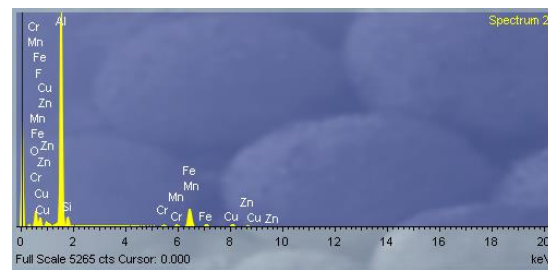
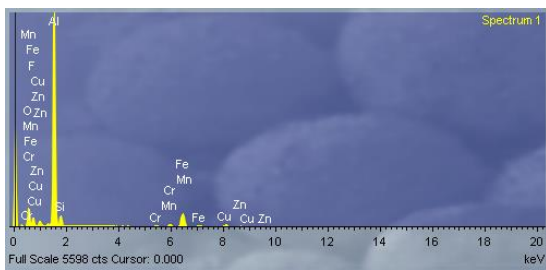
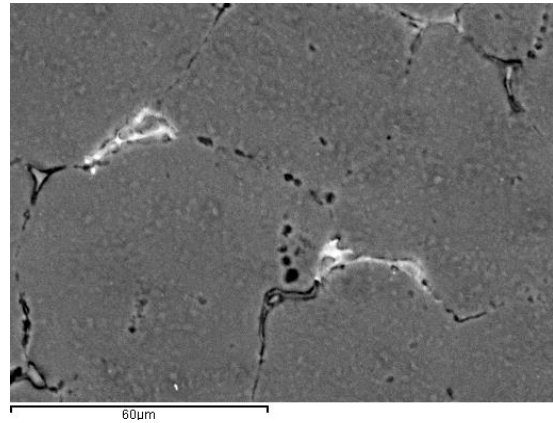
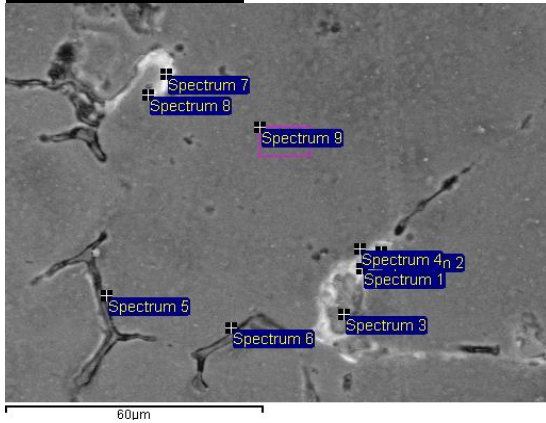
Слика 49. SEM микрофотографије узорка 1 (10Hz) у ливеном стању и одговарајући спектри добијени EDX анализом

Узорак 2 (15 Hz)



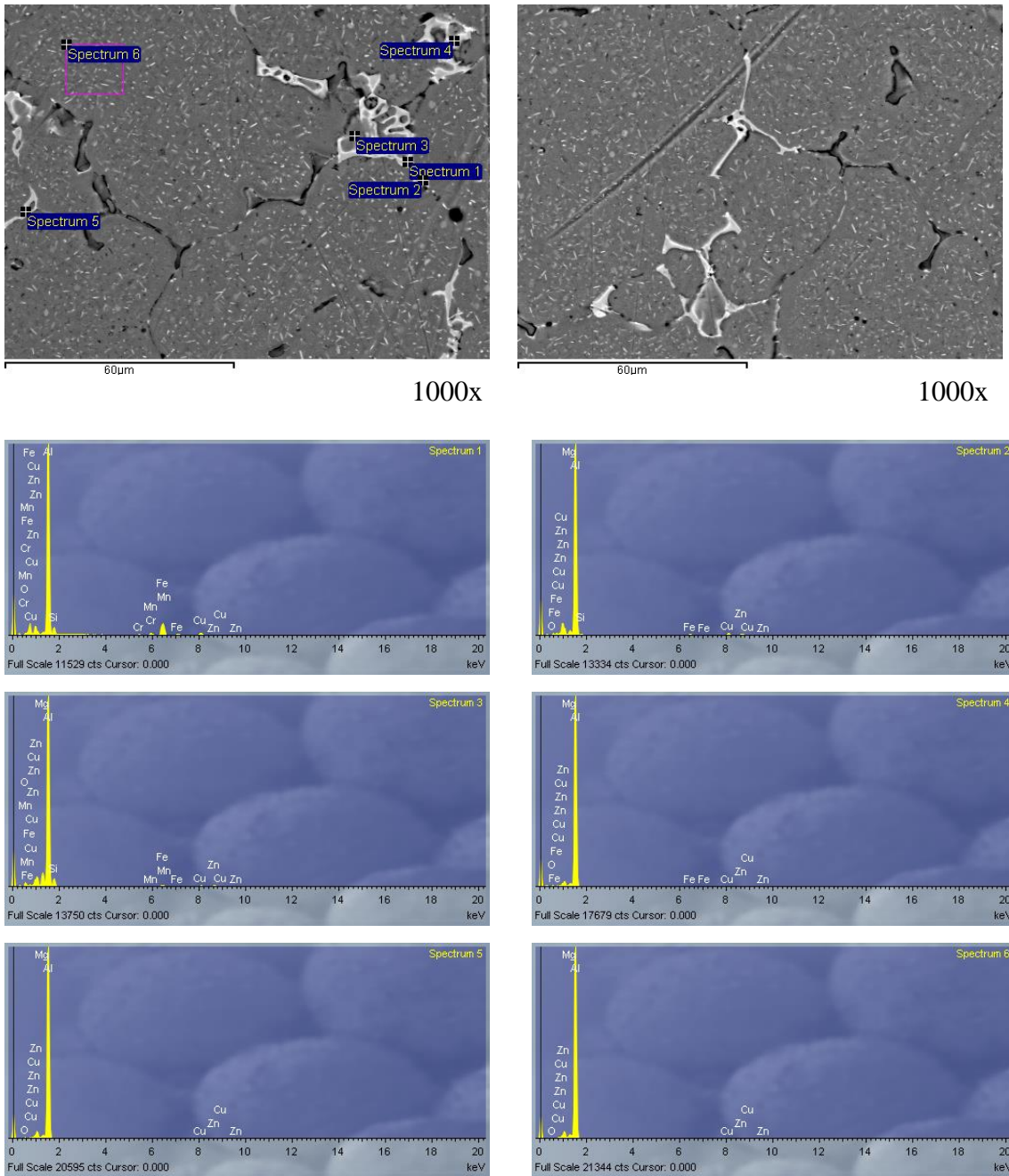
Слика 50. SEM микрофотографије узорка 2 (15 Hz) у ливеном стању и одговарајући спектри добијени EDX анализом

Узорак 3 (20 Hz)



Слика 51. SEM микрофотографије узорка 3 (20 Hz) у ливеном стању и одговарајући спектри добијени EDX анализом

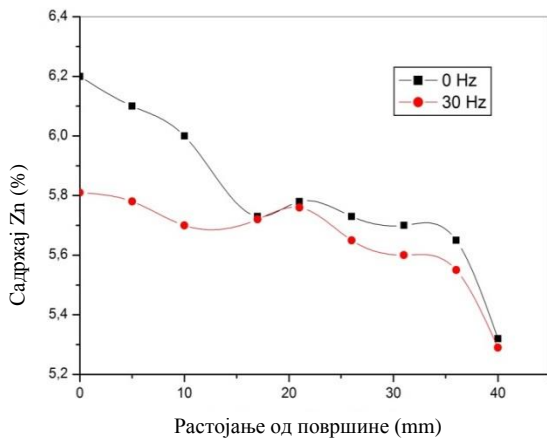
**Узорак 4 (30 Hz)**



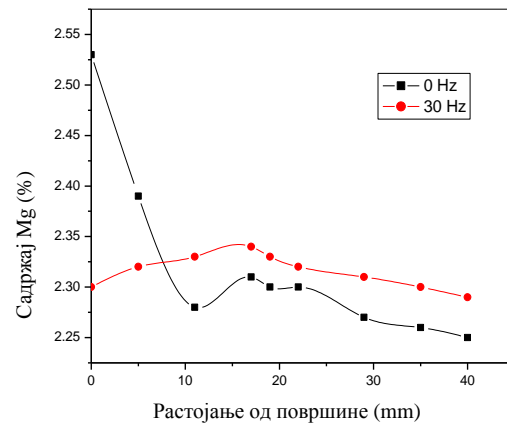
Слика 52. SEM микрофотографије узорка 4 (30 Hz) у ливеном стању и одговарајући спектри добијени EDX анализом

### 7.1.3 Одређивање хемијске сегрегације по попречном пресеку узорака

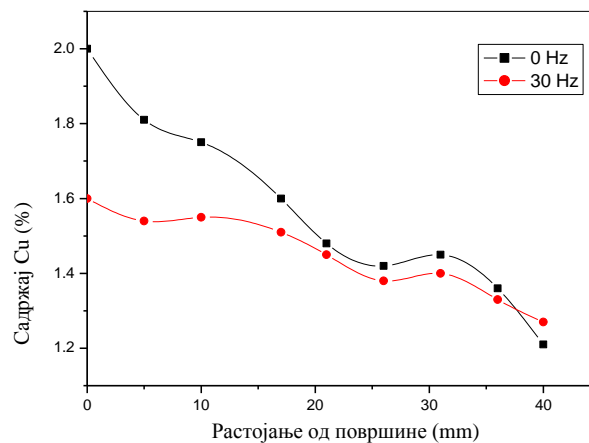
На Слици 53. (а), (б) и (ц) је приказана расподела садржаја Zn, Mg и Cu по попречном пресеку узорака. Одређивање евентуалног присуства хемијске сегрегације урађено је на узорку 0, који је добијен без дејства електромагнетног поља и на узорку 4 који је добијен под дејством електромагнетног поља фреквенције 30 Hz, јер је између њих запажена највећа разлика у свим испитиваним карактеристикама.



(а)



(б)

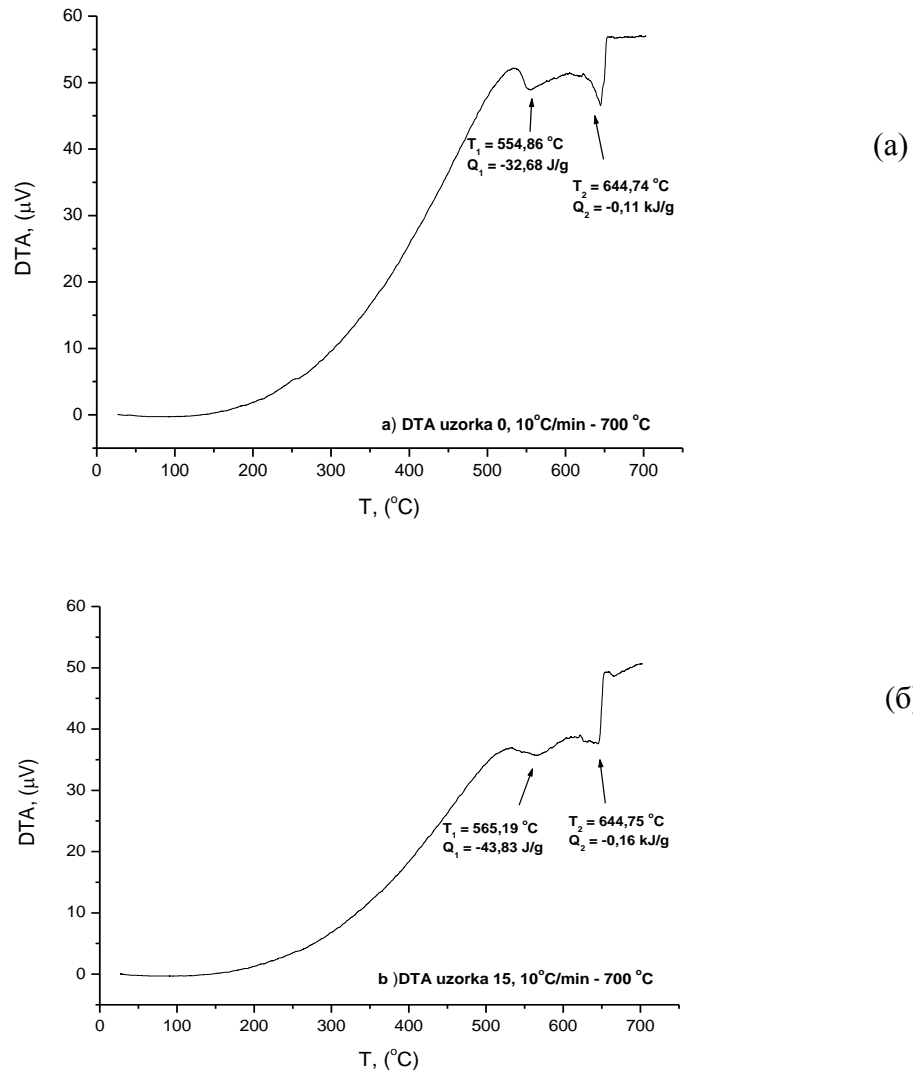


(ц)

Слика 53. Расподела садржаја Zn (а), Mg (б), и Cu (ц) по попречном пресеку узорака 0 (без поља) и 4 (30 Hz)

#### 7.1.4 Диференцијална термијска анализа

Резултати диференцијалне термијске анализе, термограми, приказани су на Слици 54. Анализа је урађена за узорак 0 који је добијен без дејства електромагнетног поља и за узорак 4 који је добијен под дејством електромагнетног поља фреквенције 30 Hz.



Слика 54. Термограми за узорак 0 (а) и 4 (30 Hz) (б)



### 7.1.5 Мерење електропроводљивости

Резултати мерења електропроводљивости за узорке у ливеном стању 0 (без поља), 1 (10Hz), 2 (15Hz), 3 (20Hz) и 4 (30Hz), приказани су у Табели 9. За сваки узорак урађена су по три мерења.

Табела 9. Измерене вредности електропроводљивости

Мерење Узорак	I MS/m	II MS/m	III MS/m	Средња вредност, MS/m
Узорак 0	13.56	13.54	13.22	13.44
Узорак 1	14.50	14.55	14.50	14.52
Узорак 2	14.88	14.86	14.87	14.87
Узорак 3	14.09	14.08	14.10	14.09
Узорак 4	18.42	18.38	18.39	18.40

### 7.1.6 Испитивање механичких својстава

Резултати испитивања тврдоће, затезне чврстоће, техничке границе течења и издужења при разарању узорака у ливеном стању приказани су у Табели 10.

Табела 10. Механичка својства узорака у ливеном стању, средње вредности

Узорак	НВ (5/250/30")	Rm (MPa)	Rp 0.2 (MPa)	A (%)
0 (без поља)	108	295.29	241.41	1.52
1 (10 Hz)	118	308,82	246.99	1.88
2 (15 Hz)	122	312.45	250.90	2.09
3 (20 Hz)	123	334.86	263.23	2.61
4 (30 Hz)	130	342.49	259.45	3.32

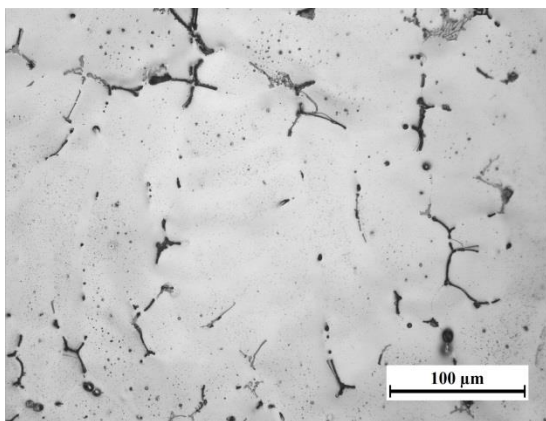
## 7.2 Хомогенизовано стање

### 7.2.1 Оптичка микроскопија

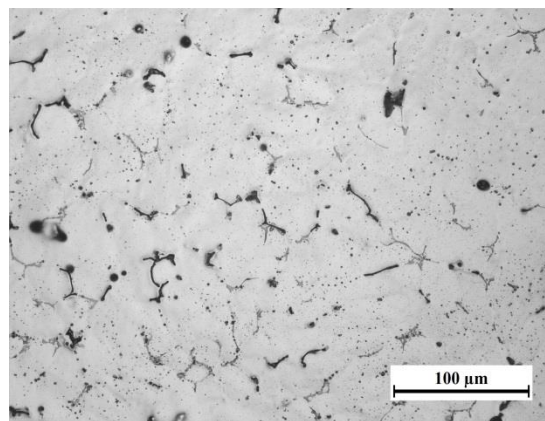
На Сликама 55. и 56. приказан је карактеристичан изглед микроструктуре по пресеку узорака 1 хом (10 Hz) и 2 хом (15 Hz) који су добијени под различитим условима ливења Табела 6., страна 58, а затим су хомогенизовани на 480 °C/8h.

#### Узорак 1 хом (10 Hz)

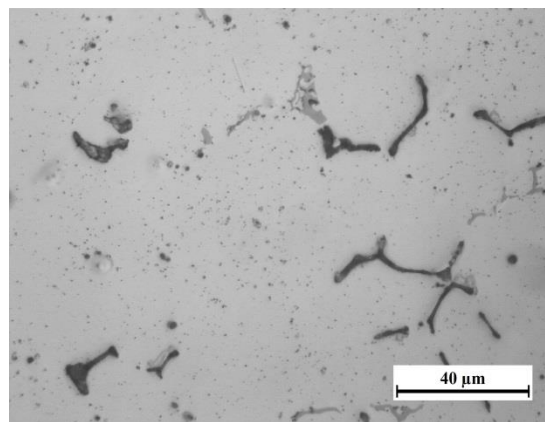
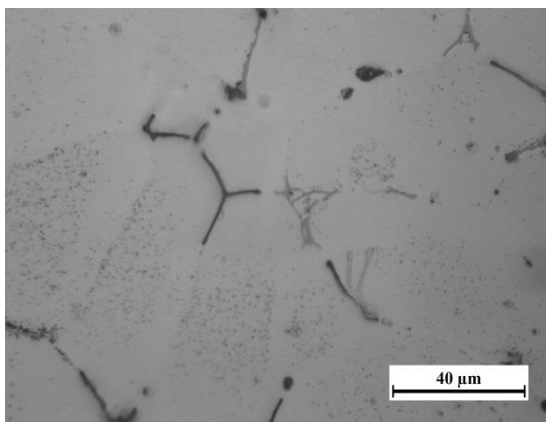
површина



центар



200x

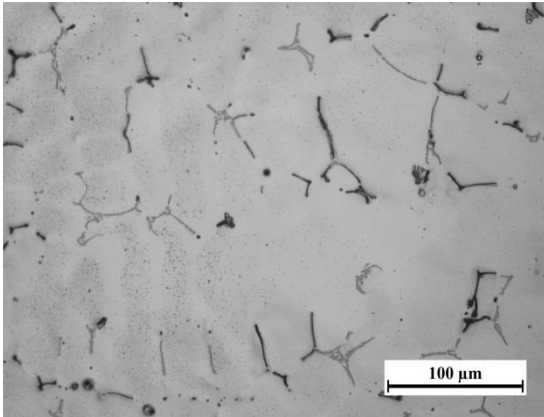


500x

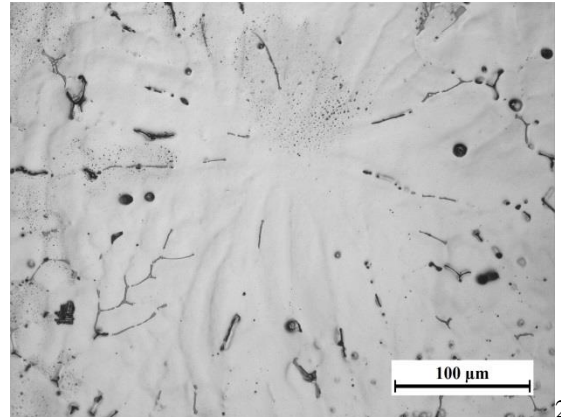
Слика 55. Микроструктура по пресеку узорка 1 хом (10 Hz) при различитим увећањима, Келеров реагенс

**Узорак 2 хом (15 Hz)**

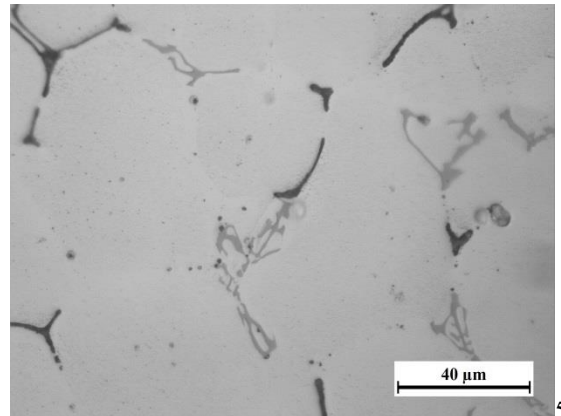
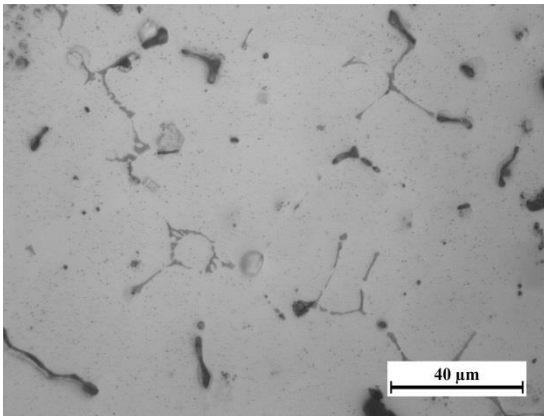
површина



центар



200x



500x

Слика 56. Микроструктура по пресеку узорка 2 хом (15 Hz) при различитим увећањима, Келеров реагенс

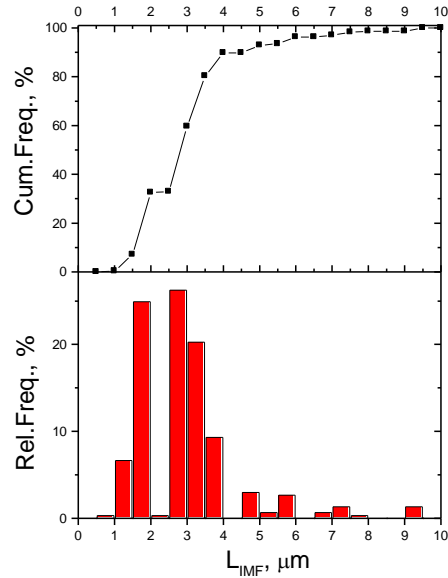
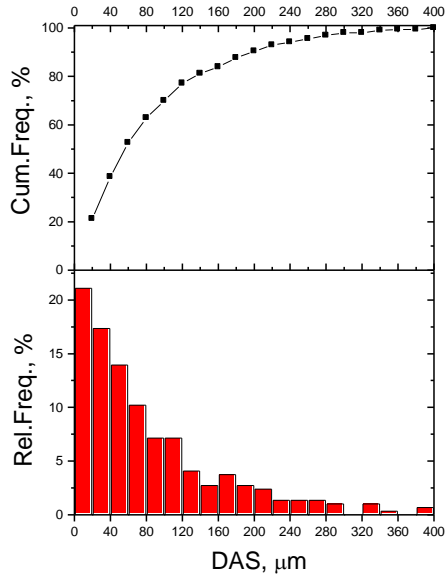
**Квантитативна микроструктурна анализа**

Резултати мерења минималне, максималне и средње вредности геометријских параметара микроструктуре DAS,  $L_{IMF}$  и  $V_{VIMF}$  приказани су у Табели 11. На Слици 57. приказани су хистограми расподеле вредности мерених параметара DAS и  $L_{IMF}$  за хомогенизоване узорке као и одговарајуће кумулативне криве.

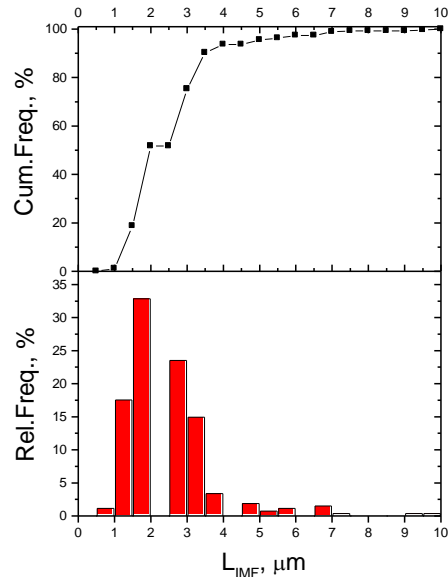
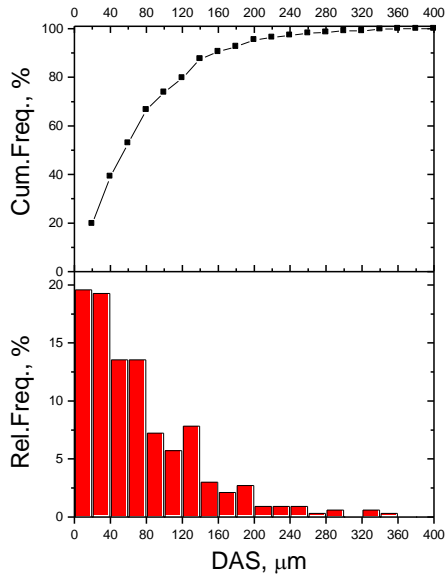
Табела 11. Измерене вредности структурних параметара узорка у хомогенизованом стању

Параметар Узорак	DAS ( $\mu\text{m}$ )			$L_{IMF}$ ( $\mu\text{m}$ )			$V_{VIMF}$ (%)
	мин	макс	ср	мин	макс	ср	$V_{VIMF}$
1 хом (10Hz)	1.95	473.79	83.87	0.65	18.87	3.18	5.59
2 хом (15Hz)	2.60	464.67	75.38	0.65	12.37	2.53	5.82

**Узорак 1 хом (10 Hz)**

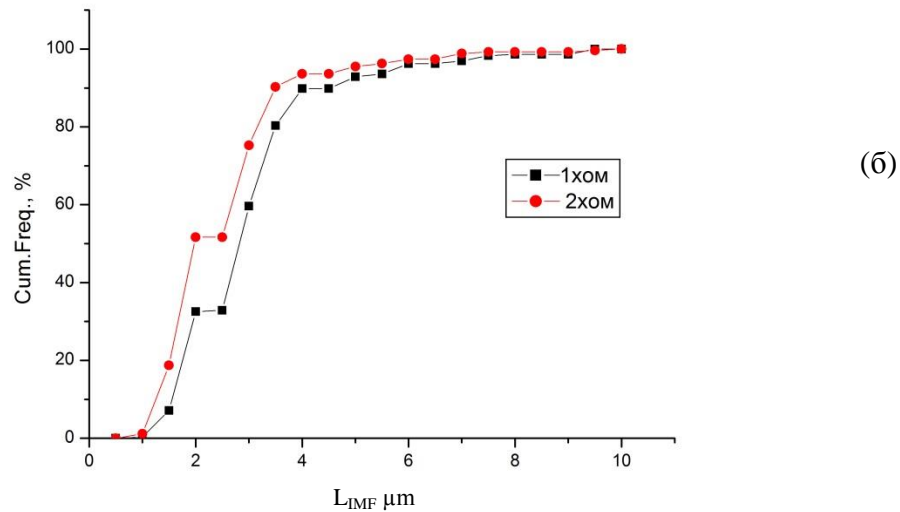
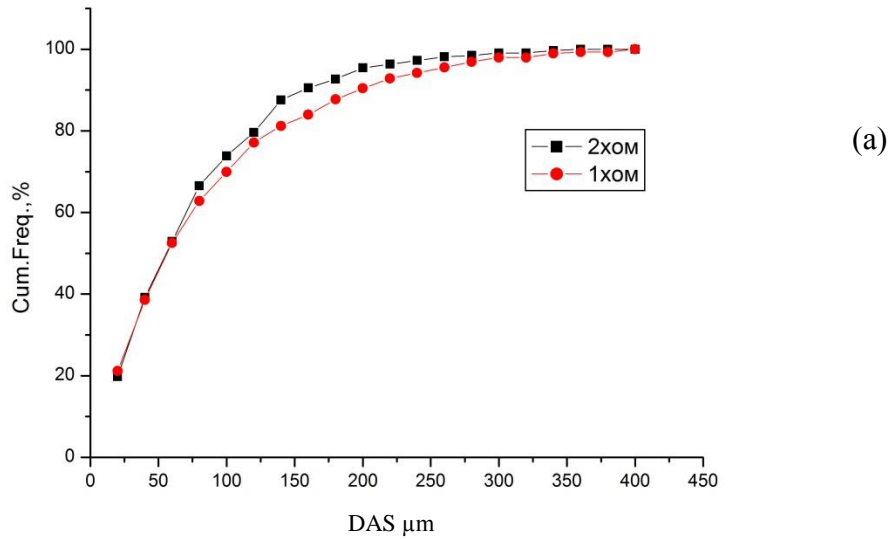


**Узорак 2 хом (15 Hz)**



Слика 57. Хистограми и кумулативне криве расподеле вредности параметара DAS и  $L_{IMF}$  за хомогенизоване узорке (1 хом и 2 хом)

Ради боље прегледности резултата мерења на Слици 58. приказане су упоредно кумулативне криве расподеле параметара DAS и  $L_{IMF}$  испитаних узорака у хомогенизованом стању, 1хом (10 Hz) и 2 хом (15 Hz).

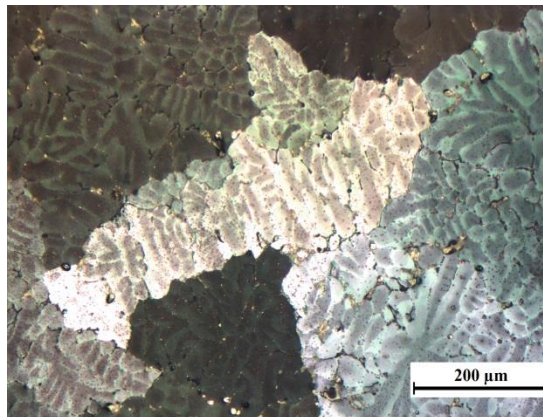
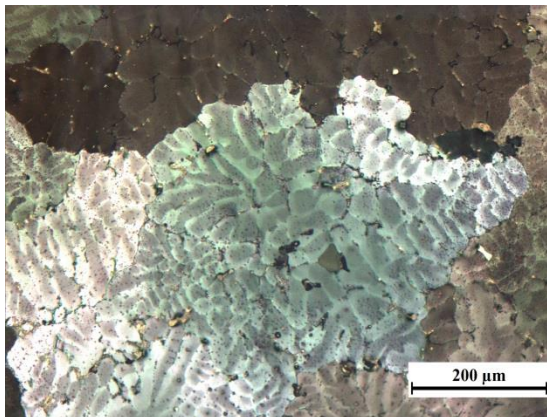


Слика 58. Кумулативне криве расподеле параметра DAS (а) и  $L_{IMF}$  (б) за узорак 1хом и 2хом

### Величина зрна

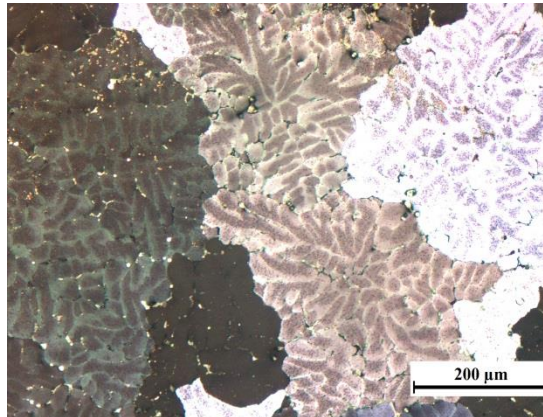
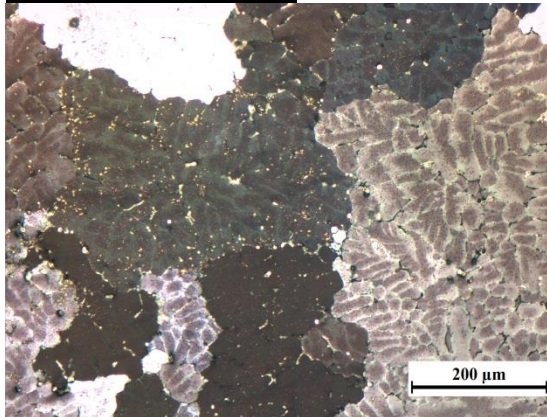
На Слици 59. приказан је изглед зрна након анодне оксидације у Баркеровом реагенсу у хомогенизованим узорцима 1хом (10Hz) и 2хом (15Hz).

#### Узорак 1хом (10Hz)



100x

#### Узорак 2 хом (15Hz)



100x

Слика 59. Изглед зрна у узорцима 1хом и 2хом, Баркеров реагенс, поларизовано светло, 100x

Измерене минималне, максималне и средње вредности величине зрна,  $L$ , у хомогенизованим узорцима дате су у Табели 12.

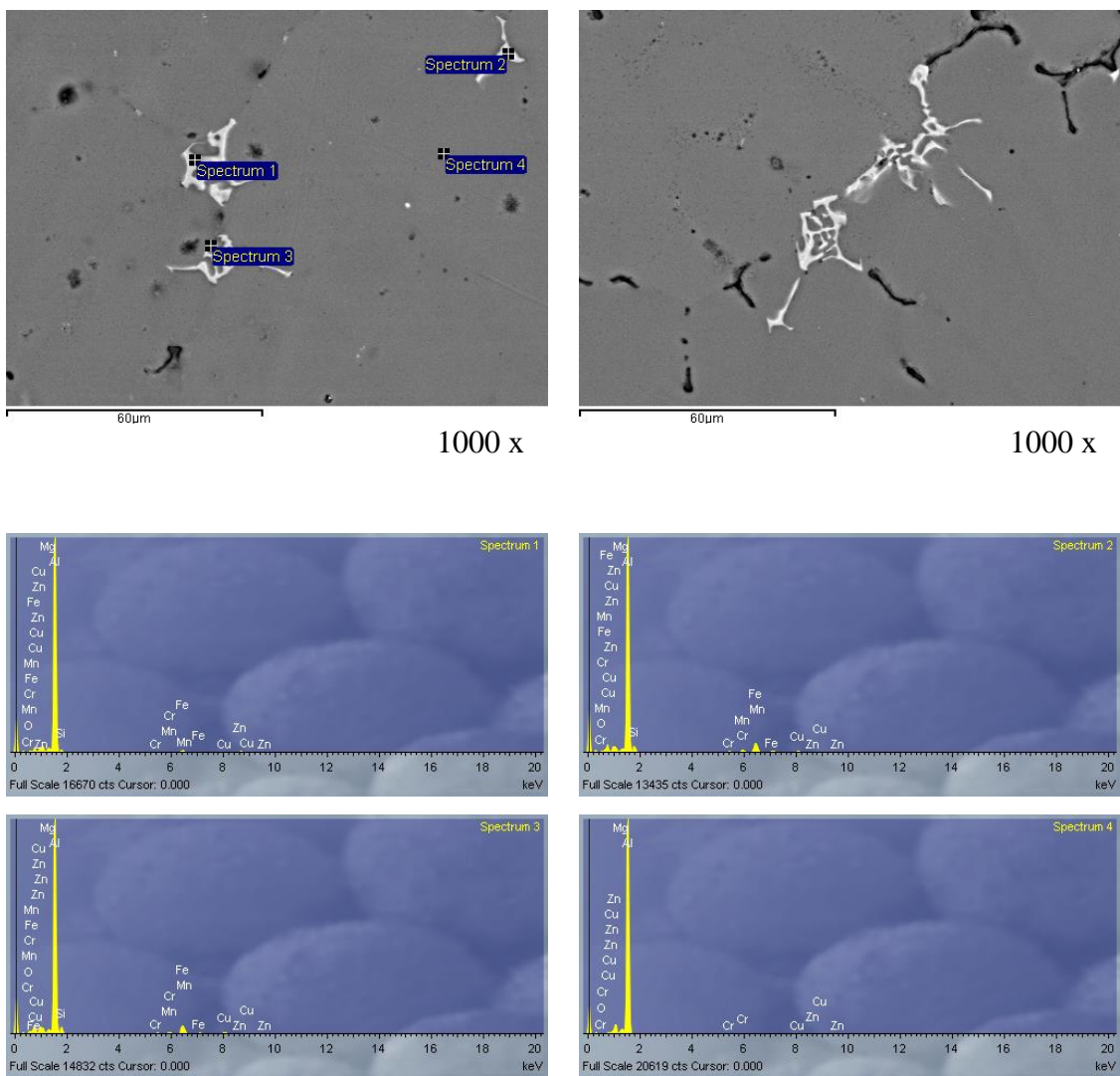
Табела 12. Величина зрна узорка у хомогенизованом стању

Величина зрна, $L$ ( $\mu\text{m}$ ) Узорак	Мин	Макс	Средња
Узорак 1 (10Hz)	141.21	490.11	337.16
Узорак 2 (15Hz)	136.23	448.26	325.14

## 7.2.2 Скенирајућа електронска микроскопија SEM /EDX анализа

На Сликама 60. и 61. приказане су SEM микрофотографије испитаних узорака 1хом и 2хом и одговарајући спектри добијени EDX аналиом.

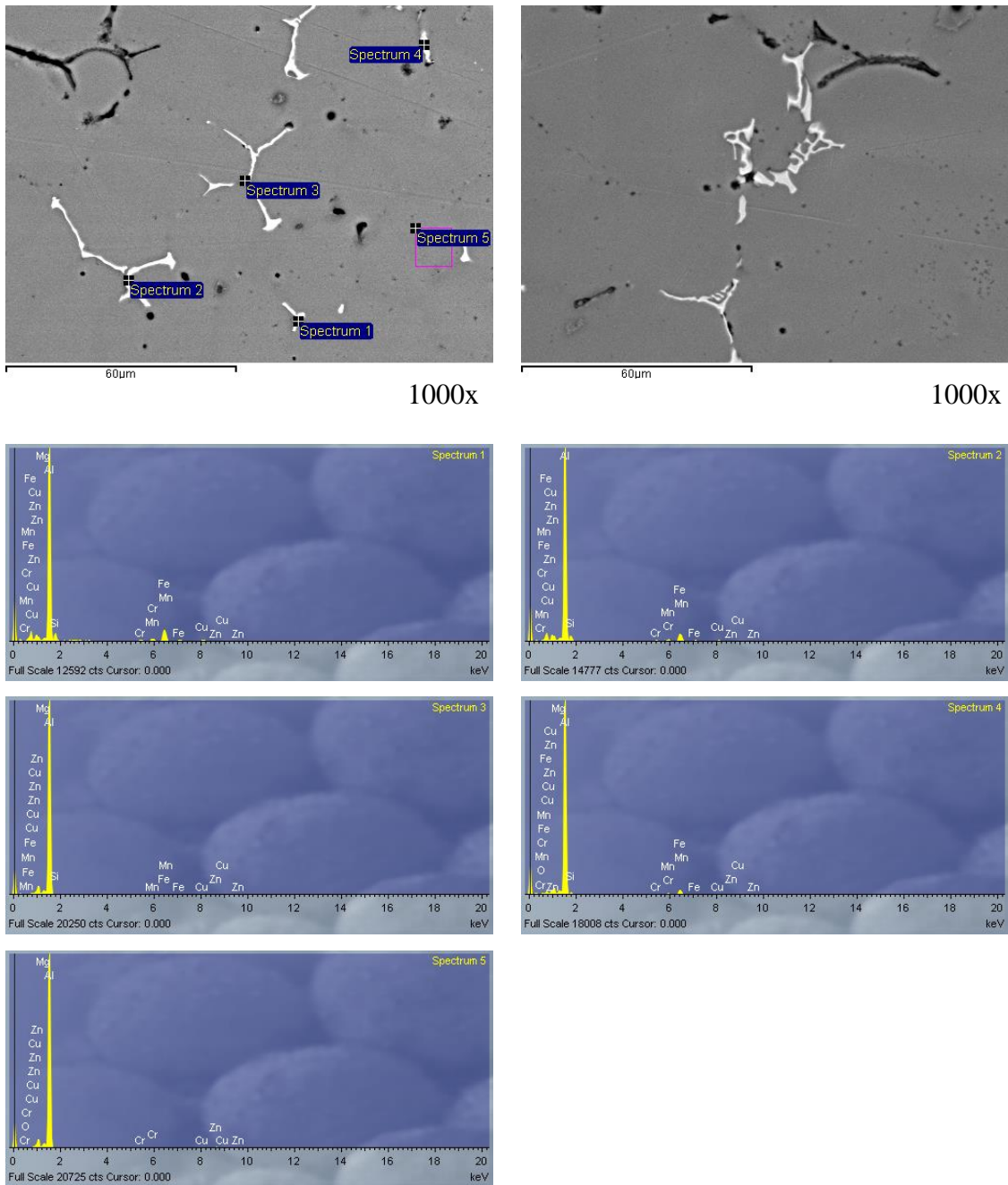
### Узорак 1 хом (10 Hz)



Слика 60. SEM микрофотографије хомогенизованог узорак 1 хом и одговарајући спектри добијени EDX анализом



**Узорак 2 хом (15 Hz)**



Слика 61. SEM микрофотографије хомогенизованог узорак 2хом и одговарајући спектри добијени EDX анализом

### 7.2.3 Мерење електропроводљивости

Резултати мерења електропроводљивости хомогенизованих узорака 1хом и 2хом приказани су у Табели 13. За сваки узорак урађена су по три мерења.

Табела 13. Измерене вредности електропроводљивости за хомогенизоване узорке

Мерење Узорак	I MS/m	II MS/m	III MS/m	Средња вредност, MS/m
Узорак 1хом (10 Hz)	15.43	15.41	15.42	15.42
Узорак 2хом (15 Hz)	15.42	15.36	15.37	15.38

### 7.2.4 Испитивање механичких својстава

Резултати испитивања тврдоће, затезне чврстоће, техничке границе течења и издужења при разарању хомогенизованих узорака (1хом и 2хом) приказани су у Табели 14.

Табела 14. Механичка својства узорака у хомогенизованом стању, средње вредности

Узорак	HB (5/250/30")	Rm (Mpa)	Rp 0.2 (Mpa)	A (%)
1 хом (10 Hz)	128	331.58	248.48	3.12
2 хом (15 Hz)	130	339.28	252.57	3.90

### **7.3 Примена математичких модела у обради производних параметара при ливењу - хеометрија**

Обзиром да су у овом раду први пут примењени математички модели у области ливарства, не постоје значајне базе података за примењене моделе. Коришћени су постојећи реални подаци из праксе у којој се варирају сви радни параметри (фреквенција,  $V$ , јачина струје,  $I$ , и „јачина поља,  $T$ “) у току процеса ливења под дејством електромагнетног поља. Такође су коришћени подаци механичких својстава (затезна чврстоћа,  $R_m$ , граница течења,  $R_p$ , издужење,  $A$ , и попречни пресек епрувете при кидању,  $S_0$ ) тако добијених одливака.

Добијени експериментални подаци, Табела 15., су представљени коришћењем основне дескриптивне статистике, а коришћен је и *post - hoc* Tukey-ев HSD тест, којим је испитано да ли постоје заиста значајне разлике између средњих вредности узорака. Tukey-евим HSD тестом установљено је да је већина узорака статистички значајно различита на нивоу  $p < 0.05$ , чиме је доказано да су испитивани узорци довољно разнолики да би се приступило статистичкој анализи и математичком моделовању.

*Утицај електромагнетног поља током ливења на карактеристике одливака  
алуминијумских легура*

*Дескриптивна статистика*

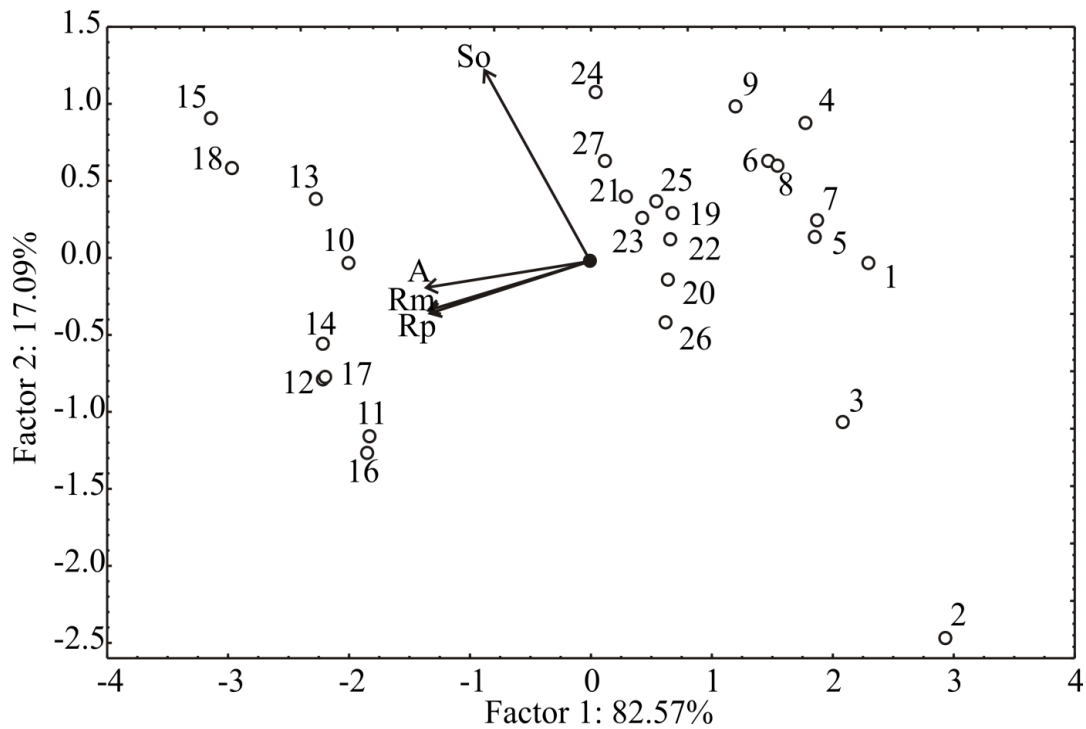
Табела 15. Вредности механичких својстава у зависности од радних параметара

Run	$\nu$	$I$	$T(\times 10^{-3})$	$S_0$	$R_m$	$R_p$	$A$	$F$
узор.	(Hz)	(A)	(At)	(mm <sup>2</sup> )	(MPa)	(MPa)	(%)	-
1	10	200	12	50.17±0.08 <sup>abc</sup>	321.56±5.39 <sup>a</sup>	235.72±0.86 <sup>a</sup>	3.01±0.14 <sup>a</sup>	0.25
2	10	200	15	49.88±0.32 <sup>a</sup>	328.85±4.95 <sup>abc</sup>	241.04±2.42 <sup>a</sup>	3.01±0.14 <sup>a</sup>	0.04
3	10	200	18	50.07±0.11 <sup>ab</sup>	333.20±3.81 <sup>abcde</sup>	244.14±3.85 <sup>a</sup>	3.32±0.08 <sup>ab</sup>	1.00
4	10	250	12	50.29±0.08 <sup>bc</sup>	324.04±4.47 <sup>ab</sup>	236.84±0.88 <sup>a</sup>	3.21±0.08 <sup>ab</sup>	1.00
5	10	250	15	50.21±0.04 <sup>abc</sup>	330.64±6.10 <sup>abcd</sup>	240.24±0.90 <sup>a</sup>	3.17±0.18 <sup>ab</sup>	0.43
6	10	250	18	50.28±0.07 <sup>bc</sup>	333.03±5.78 <sup>abcde</sup>	243.35±1.69 <sup>a</sup>	3.35±0.14 <sup>ab</sup>	0.91
7	10	300	12	50.22±0.12 <sup>abc</sup>	327.27±5.15 <sup>abc</sup>	239.55±1.98 <sup>a</sup>	3.26±0.19 <sup>ab</sup>	0.89
8	10	300	15	50.27±0.08 <sup>bc</sup>	332.15±6.04 <sup>abcde</sup>	242.92±2.19 <sup>a</sup>	3.26±0.15 <sup>ab</sup>	0.69
9	10	300	18	50.32±0.04 <sup>bc</sup>	334.67±6.03 <sup>abcde</sup>	243.83±2.09 <sup>a</sup>	3.54±0.09 <sup>b</sup>	0.72
10	30	200	12	50.34±0.11 <sup>bc</sup>	392.20±16.12 <sup>f</sup>	297.11±4.94 <sup>c</sup>	6.01±0.20 <sup>d</sup>	0.90
11	30	200	15	50.22±0.17 <sup>abc</sup>	398.27±15.18 <sup>f</sup>	300.47±3.66 <sup>c</sup>	6.10±0.21 <sup>d</sup>	0.87
12	30	200	18	50.27±0.07 <sup>bc</sup>	401.32±15.23 <sup>f</sup>	302.53±3.53 <sup>c</sup>	6.42±0.20 <sup>de</sup>	0.90
13	30	250	12	50.40±0.07 <sup>bc</sup>	390.24±5.95 <sup>f</sup>	298.51±3.16 <sup>c</sup>	6.26±0.23 <sup>d</sup>	0.92
14	30	250	15	50.30±0.01 <sup>bc</sup>	399.54±13.80 <sup>f</sup>	301.47±3.42 <sup>c</sup>	6.34±0.21 <sup>d</sup>	0.90
15	30	250	18	50.49±0.07 <sup>c</sup>	405.75±14.80 <sup>f</sup>	302.49±3.81 <sup>c</sup>	6.86±0.41 <sup>e</sup>	1.00
16	30	300	12	50.21±0.04 <sup>abc</sup>	397.22±14.43 <sup>f</sup>	298.62±5.56 <sup>c</sup>	6.39±0.31 <sup>de</sup>	0.88
17	30	300	15	50.27±0.08 <sup>bc</sup>	401.69±16.19 <sup>f</sup>	301.06±5.55 <sup>c</sup>	6.42±0.22 <sup>de</sup>	0.90
18	30	300	18	50.45±0.08 <sup>c</sup>	404.40±15.86 <sup>f</sup>	301.76±5.01 <sup>c</sup>	6.85±0.27 <sup>e</sup>	0.98
19	50	200	12	50.27±0.02 <sup>bc</sup>	343.39±4.14 <sup>bcde</sup>	256.02±4.48 <sup>b</sup>	4.25±0.29 <sup>c</sup>	0.91
20	50	200	15	50.22±0.17 <sup>bc</sup>	346.72±3.48 <sup>cde</sup>	258.98±3.07 <sup>b</sup>	4.35±0.24 <sup>c</sup>	0.73
21	50	200	18	50.30±0.09 <sup>bc</sup>	349.33±4.39 <sup>de</sup>	258.40±4.57 <sup>b</sup>	4.62±0.36 <sup>c</sup>	0.75
22	50	250	12	50.25±0.06 <sup>bc</sup>	345.19±4.82 <sup>cde</sup>	255.75±4.63 <sup>b</sup>	4.34±0.25 <sup>c</sup>	0.73
23	50	250	15	50.28±0.04 <sup>bc</sup>	349.16±3.84 <sup>de</sup>	258.67±3.93 <sup>b</sup>	4.40±0.21 <sup>c</sup>	0.75
24	50	250	18	50.38±0.06 <sup>bc</sup>	350.58±4.42 <sup>e</sup>	257.04±5.04 <sup>b</sup>	4.63±0.18 <sup>c</sup>	0.95
25	50	300	12	50.28±0.12 <sup>bc</sup>	346.09±4.07 <sup>cde</sup>	257.23±4.17 <sup>b</sup>	4.29±0.33 <sup>c</sup>	0.92
26	50	300	15	50.19±0.11 <sup>abc</sup>	349.88±3.70 <sup>de</sup>	259.20±3.20 <sup>b</sup>	4.49±0.30 <sup>c</sup>	0.88
27	50	300	18	50.33±0.03 <sup>bc</sup>	351.02±3.60 <sup>e</sup>	258.91±3.09 <sup>b</sup>	4.68±0.21 <sup>c</sup>	0.93

Резултати су приказани као средња вредност ± SD, <sup>a-e</sup> Различита слова у истом реду указују на статистички значајне разлике на нивоу  $p < 0.05$  (у складу са post-hoc Tukey-евим HSD тестом), F-објективна функција

**Анализа главних компоненти, PCA- principal components analysis**

На Слици 62. Приказан је Biplot дијаграм добијен анализом главних компонента, а представља графички приказ Табеле 15. у факторској равни.

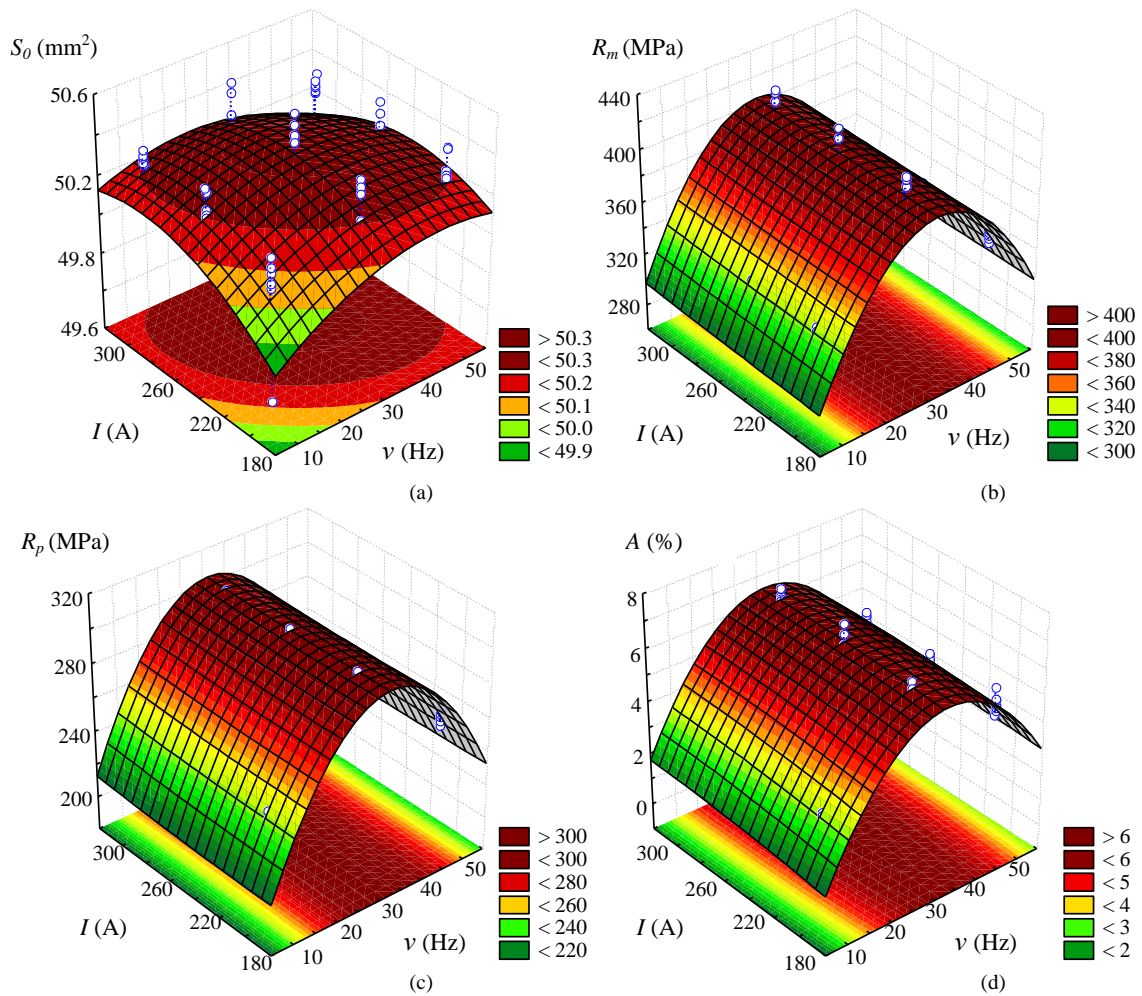


Слика 62. Biplot дијаграм механичких својстава за легуру EN AW 075

*Second order polynomial model-(полином другог реда)*

*RSM - Response Surface Methodology*

На Слици 63. дат је графички приказ математичког модела SOP ( полином другог реда). Тродимензионални графици одзива ,механичких својстава, на мале промене улазних величина, процесних параметара, нацртани су ради визуализације експерименталних података.



Слика 63. Тродимензионални графици одзива (механичких својстава), у зависности од фреквенције и јачине струје ( графички приказ математичког модела)

### Анализа варијансе ANOVA

Анализа варијансе ANOVA спроведена је ради испитивања утицаја процесних параметара на одзиве односно излазне параметре (механичка својства). Резултати анализе приказани су у Табели 16.

Обзиром да мерне јединице, као ни скале различитих променљивих које описују поређене узорке нису исте, извршена је трансформација података свих мерења у тзв. стандардне оцене, бездимензионалне вредности које се добијају према једначини 11.

Табела 16. Анализа варијансе за излазне променљиве

Збир квадрата					
Члан SOP	$dF$	$S_0$	$Rm$	$Rp$	$A$
$v$	1	0.10*	4589.53*	3878.58*	19.90*
$v^2$	1	0.16*	65335.90*	47042.33*	118.03*
$I$	1	0.10*	145.60	12.58	0.72*
$I^2$	1	0.12*	0.46	4.26	0.04
$T$	1	0.03**	964.95*	229.48*	1.75*
$T^2$	1	0.15*	30.20	22.86	0.27*
$v \times I$	1	0.11*	2.15	2.98	0.06
$v \times T$	1	0.01	34.63	47.89*	0.03
$I \times T$	1	0.07*	12.89	12.69	0.00
Greška	71	0.76	4692.28	747.05	3.32
$r^2$		<b>0.531</b>	<b>0.938</b>	<b>0.986</b>	<b>0.977</b>

\* Значајно на нивоу  $p < 0,05$ , \*\* Значајно на нивоу  $p < 0,10$ , 95 % граници поверења,  
 $dF$  – број степени слободе

**Вештачке неуронске мреже-ANN модели(Artificial Neural network)**

Развијени ANN модели и добијени коефицијенти детерминације,  $r^2$  дати су  
Табелама 17 и 18.

Табела 17. Развијени ANN модели

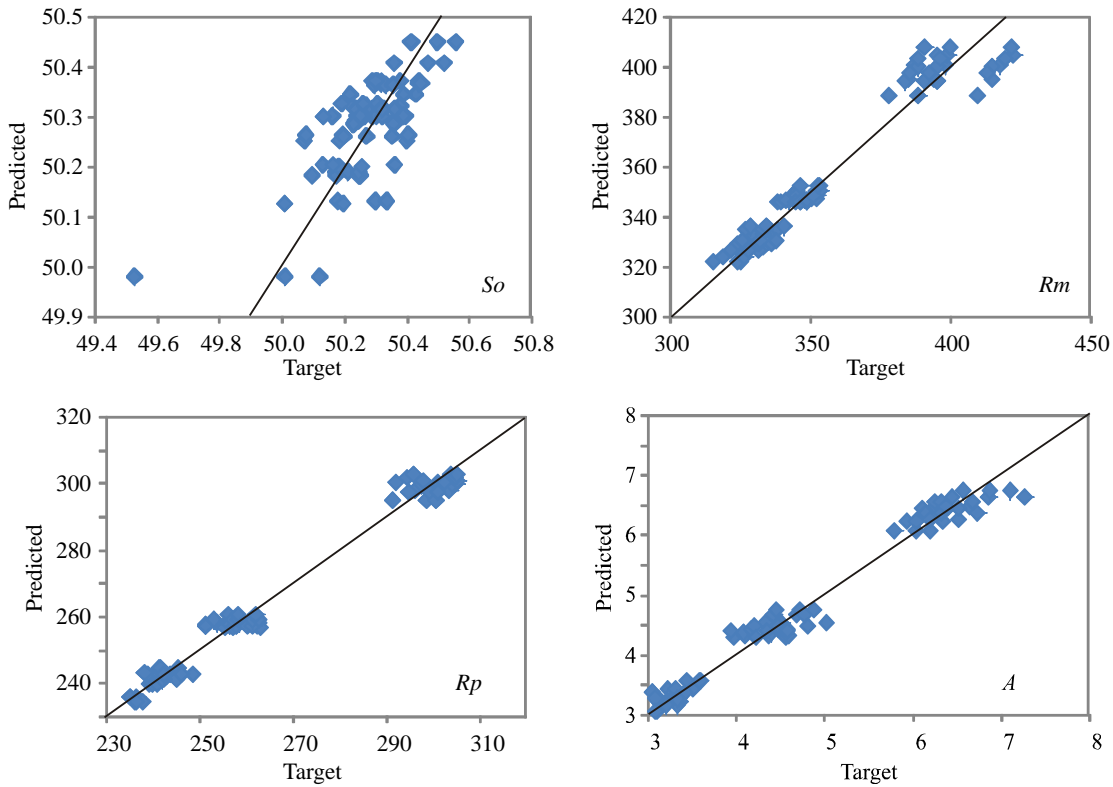
Бр	Име мреже	Перформансе ( $r^2$ )			Грешка			Алгоритам за тренирање	Функција грешке	Активација скривеног слоја	Активација излаза
		Учење	Тестирање	Валидација	Учење	Тестирање	Валидација				
1	MLP 3-4-4	0.890	0.910	0.896	0.018	0.057	0.021	BFGS 53	SOS	Tanh	Exponential
2	MLP 3-7-4	0.919	0.920	0.905	0.016	0.056	0.022	BFGS 98	SOS	Exponential	Exponential
<b>3</b>	<b>MLP 3-8-4</b>	<b>0.939</b>	<b>0.907</b>	<b>0.878</b>	<b>0.012</b>	<b>0.048</b>	<b>0.023</b>	<b>BFGS 73</b>	<b>SOS</b>	<b>Logistic</b>	<b>Tanh</b>
4	MLP 3-6-4	0.902	0.902	0.896	0.017	0.058	0.022	BFGS 43	SOS	Tanh	Tanh
5	MLP 3-9-4	0.922	0.904	0.918	0.015	0.053	0.019	BFGS 26	SOS	Tanh	Logistic

Табела 18. Коефицијенти детерминације,  $r^2$ , између експерименталних и израчунатих  
излаза ANN -а, током циклуса учења, тестирања и валидације

Име мреже	Учење				Тестирање				Валидација			
	So	Rm	Rp	A	So	Rm	Rp	A	So	Rm	Rp	A
1.MLP 3-4-4	0.611	0.969	0.990	0.990	0.708	0.959	0.993	0.979	0.662	0.962	0.984	0.979
2.MLP 3-7-4	0.732	0.965	0.989	0.990	0.760	0.952	0.991	0.976	0.711	0.954	0.982	0.973
<b>3.MLP 3-8-4</b>	<b>0.800</b>	<b>0.970</b>	<b>0.992</b>	<b>0.992</b>	<b>0.693</b>	<b>0.960</b>	<b>0.992</b>	<b>0.983</b>	<b>0.587</b>	<b>0.963</b>	<b>0.985</b>	<b>0.979</b>
4.MLP 3-6-4	0.657	0.969	0.993	0.991	0.681	0.958	0.992	0.978	0.646	0.972	0.988	0.978
5.MLP 3-9-4	0.742	0.966	0.990	0.989	0.684	0.960	0.992	0.982	0.767	0.951	0.977	0.976

Графички приказ ANN (вештачке неуронске мреже) модела дат је на Слици 64. На графицима су упоређени експериментални резултати са резултатима ANN модела за излазне променљиве, односно механичка својства.





Слика 64. Експериментално измерене вредности (target) и вредности  $S_0$ ,  $R_m$ ,  $R_p$  и  $A$  које су израчунате ANN моделом (predicted)

### Фази синтетичка оптимизација -Fuzzy Synthetic optimization

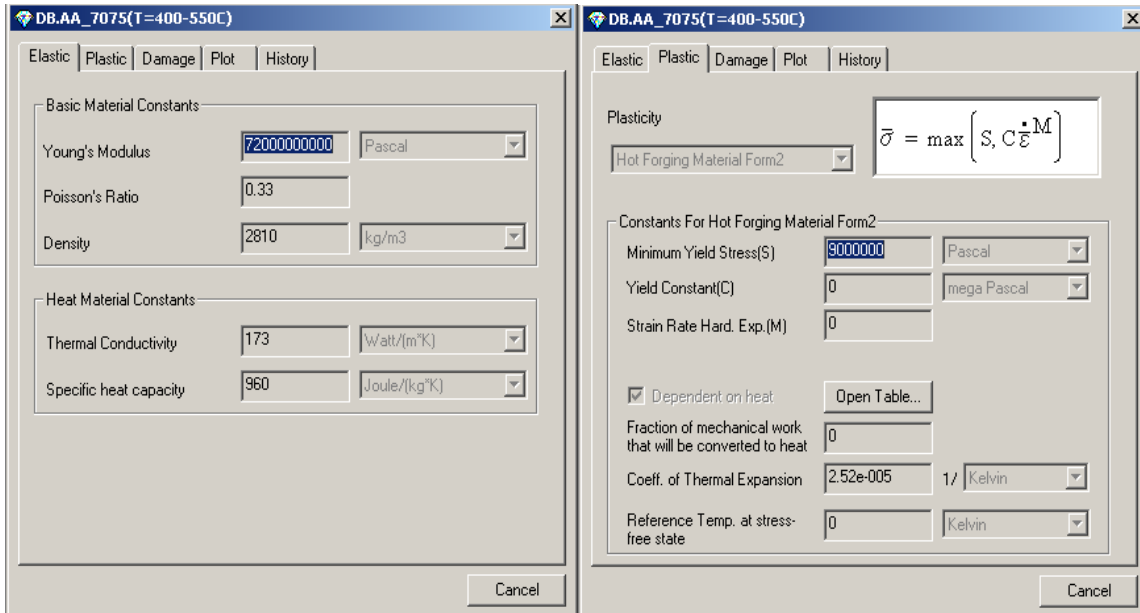
Резултати Фази синтетичке оптимизације дати су у Табели 19. Одређени су оптимални улазни параметри који дају најбоље вредности механичких својстава.

Табела 19. Оптималне вредности улазних и излазних параметара

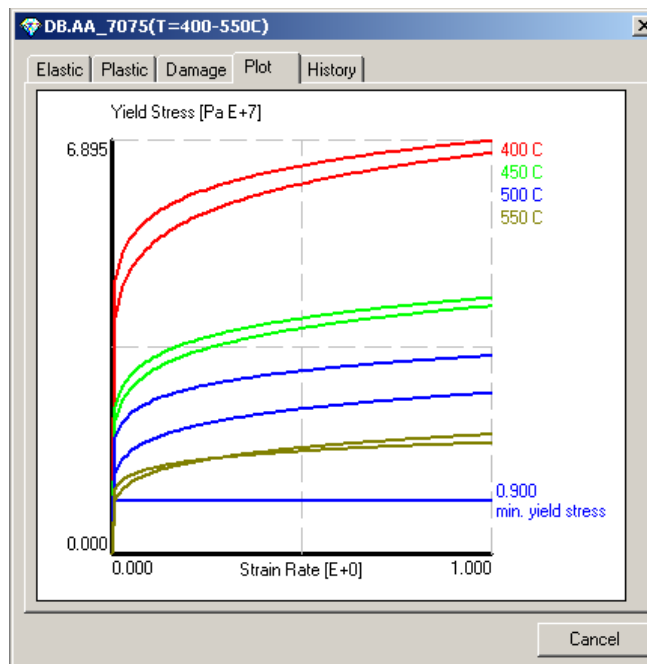
Оптимални параметри						
Улазни			Излазни			
$\nu$ (Hz)	$I$ (A)	$T(\times 10^{-3})$ (At)	$S_0$ (mm <sup>2</sup> )	$R_m$ (MPa)	$R_p$ (MPa)	$A$ (%)
30	250	18	50.49	405.75	302.49	6.86

#### 7.4 Нумеричка симулација процеса топлог ковања легуре EN AW 7075

На Сликама 65, 66, 67, 68, 69 и 70. приказани су резултати нумеричке симулације процеса топлог ковања.

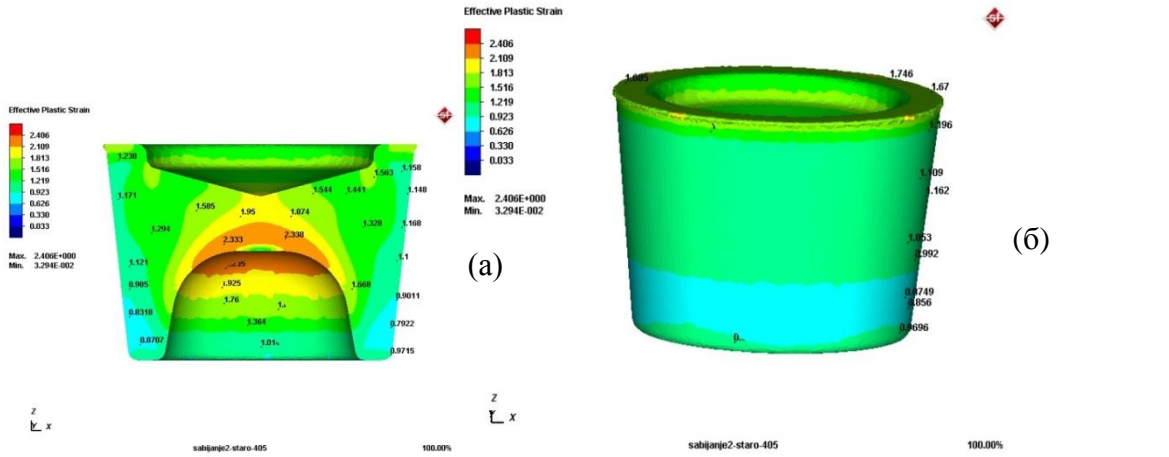


Слика 65. Изабрана својства материјала комада

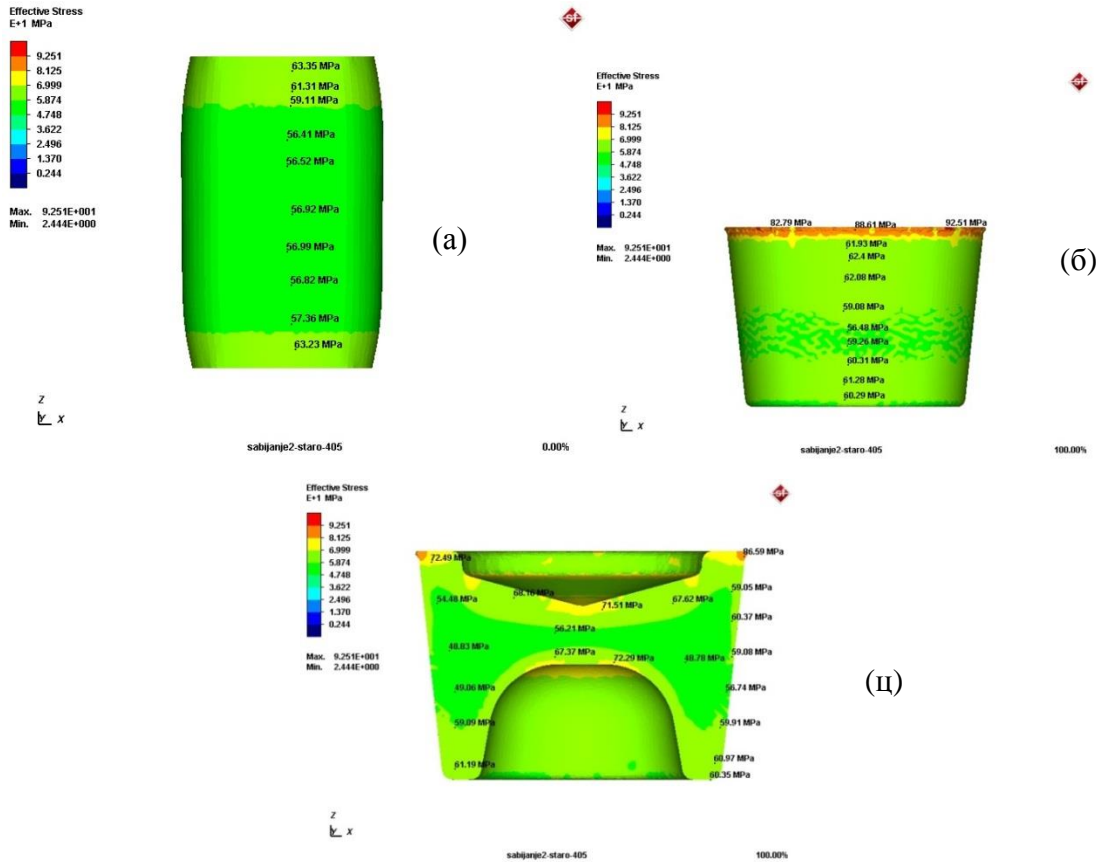


Слика 66. Криве течења (дијаграм напон –деформација) за различите температуре ковања за легуру EN AW 7075

Утицај електромагнетног поља током ливења на карактеристике одливака  
алуминијумских легура

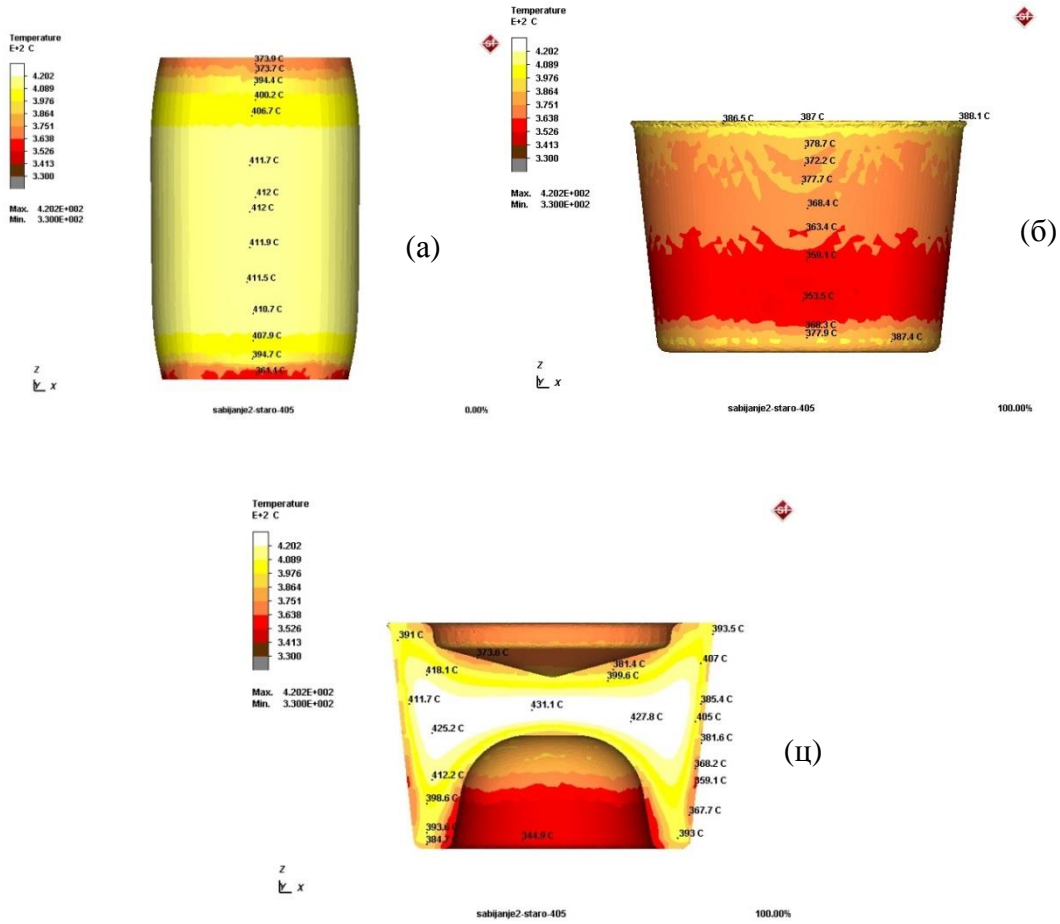


Слика 67. Расподела еквивалентне деформације на крају процеса ковања,  
(а) унутар запремине комада и (б) на површини

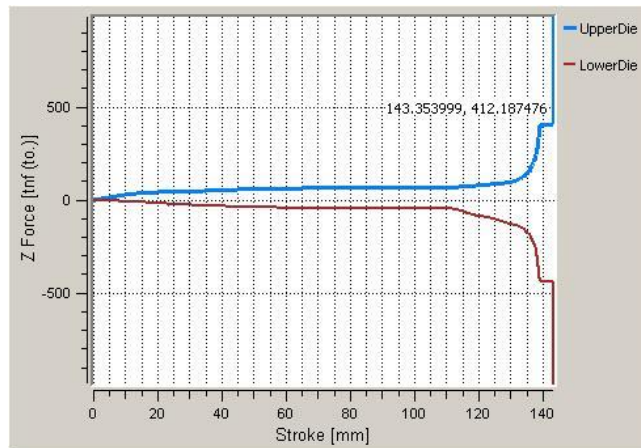


Слика 68. Расподела еквивалентног напона на почетку припремног сабијања (а)  
и на крају завршног ковања по површини (б) и унутар комада (ц)

Утицај електромагнетног поља током ливења на карактеристике одливака  
алуминијумских легура



Слика 69. Распдела температурних поља на почетку припремног сабијања (а)  
и на крају завршног ковања по површини (б) и унутар комада (ц)



Слика 70. Промена деформационе силе у функцији  
хода притискивача пресе

## **8. ДИСКУСИЈА**

## **8.1 Ливено стање**

### 8.1.1 Оптичка микроскопија

Анализирајући микроструктуру узорака у ливеном стању 0, (без поља) 1 (10 Hz), 2 (15 Hz), 3 (20 Hz), 4 (30 Hz), може се закључити да се ради о дендритно-ћелијској морфологији издвајања Al чврстог раствора. По границама ћелија, дендрита и зрна су излучене интерметалне фазе у облику дво или вишекомпонентног еутектикума претежно раздвојеног, Сlike 38, 39, 40, 41 и 42., стр. 87-92, при томе интерметалне фазе са растом фреквенције све више образују континуалну мрежу по границама зрна и ћелија која је код узорка 4 (30 Hz) скоро у потпуности дисконтинуална. Узорак 0 који је одливан без присуства електромагнетног поља, Слика 38., стр.87, одликује се релативно нехомогеном структуром, више ћелијске него дендритне морфологије по чијим границама су излучене интерметалне фазе у виду континуалне мреже. Код овог узорка примећено је присуство великог удела неметалних укључака, по целој површини попречног пресека. Такође је запажена и порозност која је углавном концентрисана по границама ћелија. Присуство порозности и неметалних укључака свакако утичу на смањење вредности механичких својстава. Код узорка 1 одливаног у присуству електромагнетног поља фреквенције 10 Hz запажа се прилично нехомогена ћелијско дендритна структура. Почев од узорка 1 (10 Hz) са растом фреквенције (до 20 Hz) повећава се удео дендритне структуре, која је нарочито изражена у површинској зони пресека. Такође се задржава континуалност мреже интерметалних фаза по границама дендритних ћелија и зрна. Све се ово може објаснити условима очвршћавања (конвекција, мешање растопа, хомогеност температуре) који су остварени у растопу при овим фреквенцијама. Присуство неметалних укључака и порозности је мање него код узорка 0, који је добијен без дејства електромагнетног поља. Може се закључити да мала промена фреквенције (реда величине 5 Hz) није битно утицала на добијену микроструктуру, односно нема значајних разлика између узорка 1 (10 Hz) и 2 (15 Hz). Узорак 3 који је одливан под дејством електромагнетног поља фреквенције 20 Hz одликује се хомогенијом и

ситнијом микроструктуром у односу на узорке 0, 1 (10 Hz) и 2 (15 Hz). Доминира хелијска морфологија, а удео неметалних укључака и порозности је смањен. Узорак 4 који је одливан при највећој фреквенцији од 30 Hz има најхомогенију и најфинију структуру, хелијске морфологије са доста уједначеном величином хелија. Код овог узорка у чврстом раствору запажа се издвајање врло финог секундарног талога али нема изражене зоне без талога. Унутар чврстог раствора појава неметалних укључака и порозности је знатно мања него код предходно описаних узорака.

У оквиру оптичке микроскопије урађена је квантитативна микроструктурна анализа, односно одређени су геометријски параметри микроструктуре, ширина секундарних дендритних грана (DAS), ширина међудендритног простора са излученим интерметалним фазама ( $L_{IMF}$ ), и величина зрна ( $L$ ). Анализирајући добијене вредности микроструктурних параметара, Табела 7., стр. 93, и анализом хистограма, Слика 43., стр. 95, може се констатовати да је код узорка 0, који је одливан без дејства електромагнетног поља, распон параметра DAS и  $L_{IMF}$  у широком опсегу. Применом електромагнетног поља као и порастом његове фреквенције од 10 Hz (узорак 1) до 30 Hz (узорак 4) долази до пада средњих вредности микроструктурних параметара DAS и  $L_{IMF}$ . Истовремено се запажа да са падом вредности параметара DAS и  $L_{IMF}$  од узорка 0 до узорка 4 (30 Hz), расте удео интерметалне фазе  $V_{V_{IMF}}$ . Овде се, као и код анализе добијених микроструктура, може закључити да електромагнетно поље малих фреквенција од 10 Hz и 15 Hz не доводи до значајнијих промена у величини параметара DAS и  $L_{IMF}$ . Примећује се пад вредности ових параметара. Са порастом фреквенције на 20 Hz (узорак 3), а посебно на 30 Hz (узорак 4) примећује се већа разлика у величини вредности параметара DAS и  $L_{IMF}$  у односу на узорак 0 који је одливан без дејства електромагнетног поља. Највећа разлика између максималних и минималних измерених вредности параметара DAS и  $L_{IMF}$  примећена је код узорка 0, док је ова разлика најмања код узорка 4 (30 Hz). Распони између минималних и максималних вредности све до узорка 3 (20 Hz) су слични, што указује да се смањује удео ових параметара са

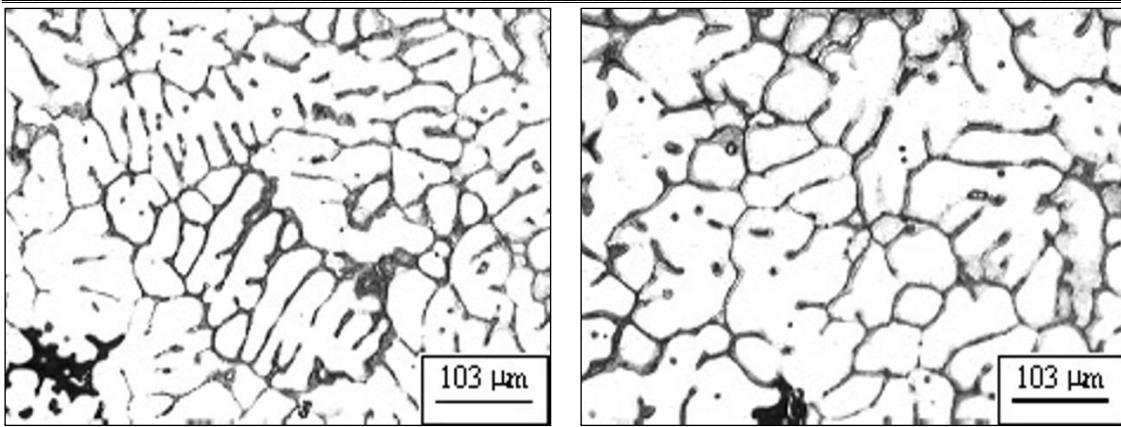
великим вредностима. То потврђују одговарајући хистограми расподеле, Слика 43., стр. 95.

Наведена промена вредности параметара DAS и  $L_{IMF}$  потврђена је и анализом кумулативних кривих које су приказане на Сликама 44. и 45., стр. 96 и 97. Са слика се јасно види да је електромагнетно поље фреквенције 30 Hz, (узорак 4), највише утицало на смањење вредности микроструктурних параметара DAS и  $L_{IMF}$  и добијање најфиније микроструктуре. Даљом анализом кумулативних кривих може се закључити да је утицај електромагнетног поља приближно исти на оба параметара DAS и  $L_{IMF}$ , односно да је поље утицало подједнако на промену вредности оба параметра. У складу са променама вредности DAS и  $L_{IMF}$  је и промена количинског удела  $V_{VIMF}$ , интерметалних фаза излучених у међудендритном простору, Табела 7., стр. 93. Највећа вредност  $V_{VIMF}$  је код узорка 4 (30 Hz).

Овде је интересантно упоредити ове резултате са утицајем електромагнетног поља у току ливења алуминијумске легуре EN AW 2024, која су била предмет ранијих истраживања [86]. На слици 71. приказане су добијене микроструктуре узорака од легуре EN AW 2024. Узорак 1 одливан је без дејства електромагнетног поља, а узорци 2 и 3 под дејством поља фреквенција 50 Hz (узорак 2) и 30 Hz (узорак 3).

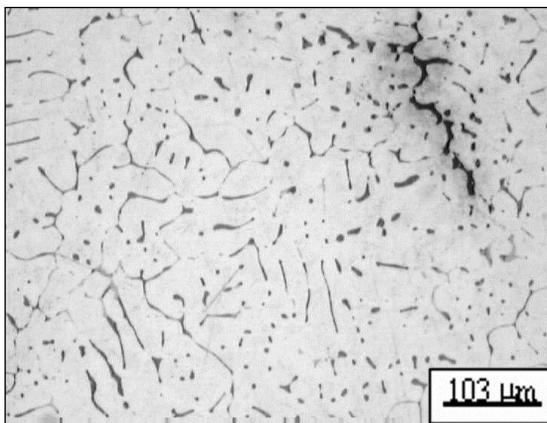


Утицај електромагнетног поља током ливења на карактеристике одливака  
алуминијумских легура

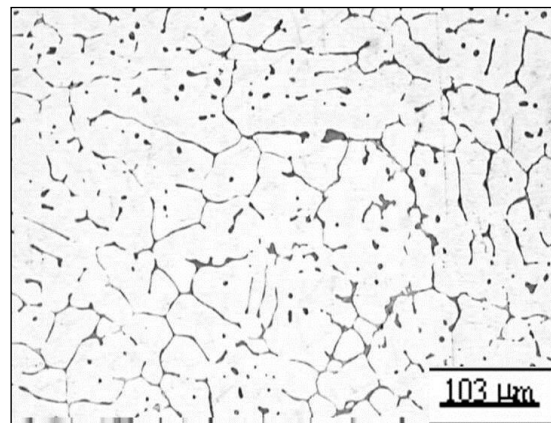


(а) (без поља)

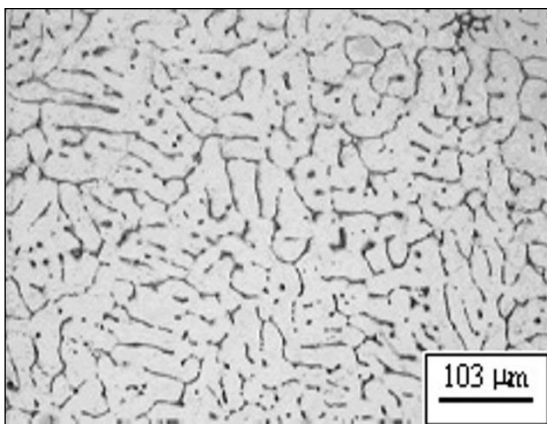
(б) (без поља)



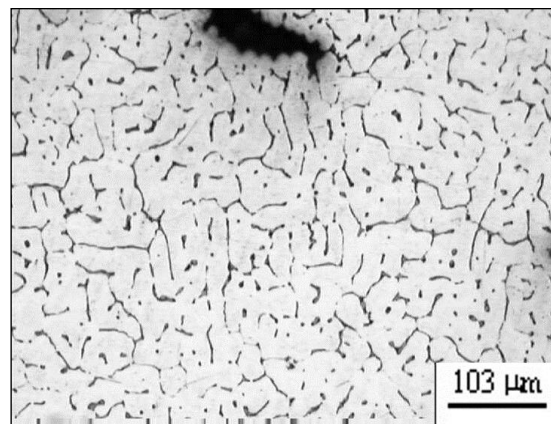
(ц) (50 Hz)



(д) (50 Hz)



(е) (30 Hz)

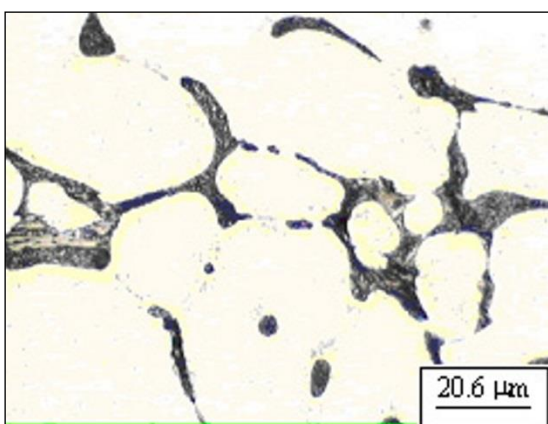


(ф) (30 Hz)

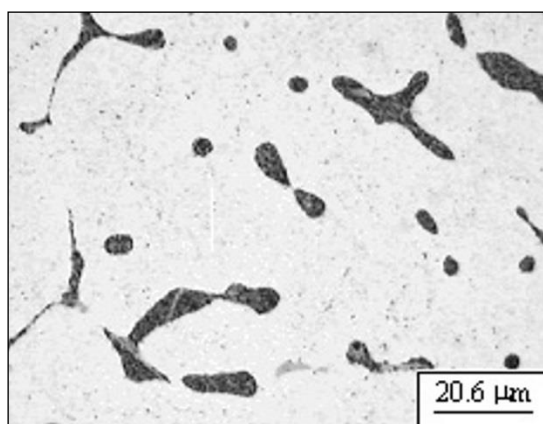
Слика 71. Микроструктура по пресеку узорака од легуре EN AW 2024, узорак 1 (а и б) (без поља), узорак 2 (ц и д) (30 Hz) и узорак 3 (е и ф) (50 Hz), Келеров реагенс; 100x

Очигледно је да се и овде ради о дендритно-ћелијској морфологији издвајања Al чврстог раствора. При томе код узорка 1, који је одливен без присуства електромагнетног поља, слика 69 (а) и (б), доминира дендритна структура у односу на узорке 2 (50 Hz) и 3 (30 Hz), Слика 71. (ц), (д), и (е), (ф), код којих су више изражене ћелије. Најфинија и најједначенија структура добијена по пресеку је код узорка 3 (30 Hz).

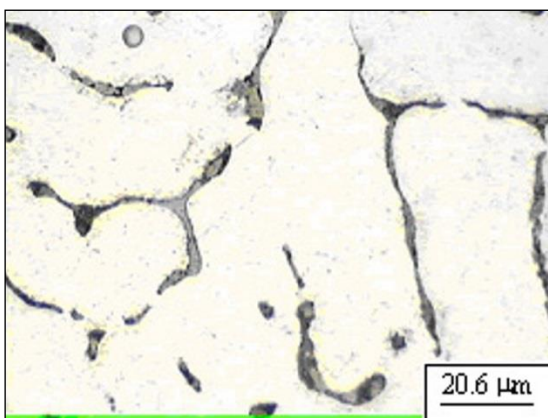
При већем повећању, Слика 72., може се видети да су излучене интерметалне фазе у виду еутектикума или појединачно по границама дендритних ћелија и зрна.



(узорак 1 -без поља)



(узорак 2 -50 Hz)

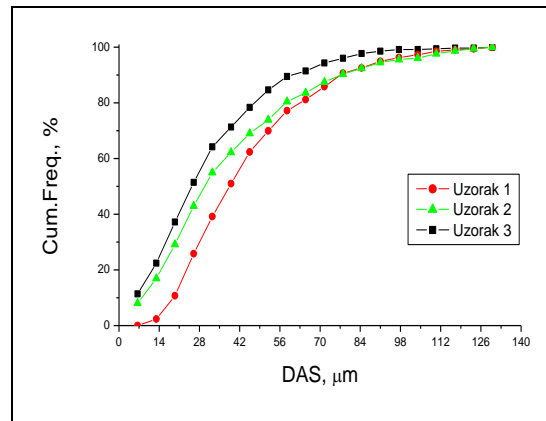


(узорак 3 -30 Hz)

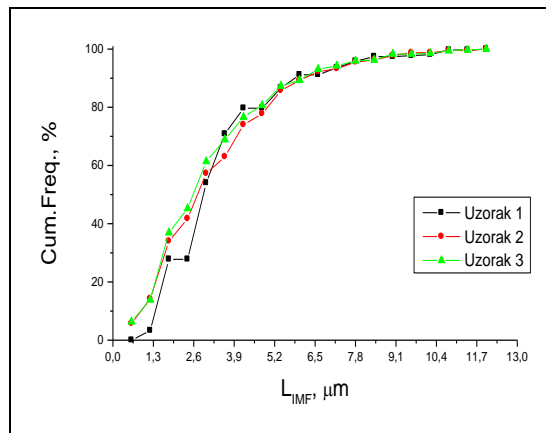
Слика 72. Међудендритно излучење интерметалних фаза, легура EN AW 2024,  
(узорак 1, узорак 2, узорак 3; Келеров реагенс; 500х)

Такође се може запазити да са увођењем електромагнетног поља као и смањењем фреквенције, са 50 Hz код узорка 2 на 30 Hz код узорка 3, излучене интерметалне фазе постају све финије и да се распоређују у све ужем међудендритном простору.

Анализирајући кумулативне криве расподеле геометријских параметара DAS и  $L_{IMF}$  за легуру EN AW 2024, Слика 73., може се видети да је утицај електромагнетног поља, већи на параметар DAS него на  $L_{IMF}$ , што није случај и са легуром EN AW 7075, где је тренд утицаја скоро исти на оба параметра али су вредности параметра  $L_{IMF}$  мање у односу на легуру EN AW 2024, Слика 44 и 45., стр.96 и 97.



(a)



(б)

Слика 73. Кумулативне криве расподеле параметра DAS (а) и  $L_{IMF}$  (б) у функцији фреквенције електромагнетног поља за легуру EN AW 2024 (узорак 1-без поља, узорак 2-50 Hz, узорак 3 -30 Hz)

Може се закључити да је електромагнетно поље недвосмислено утицало на добијену микроструктуру обе легуре и EN AW 7075 и EN AW 2024. У оба случаја електромагнетно поље фреквенције 30 Hz дало је најхомогенију и најситнију микроструктуру, али је поље различито утицало на чврсти раствор и излучене интерметалне фазе. Према томе, примена електромагнетног поља чак исте фреквенције не обезбеђује исти интензитет утицаја на добијену микроструктуру одливака. Измерене вредности величине зрна, за легуру EN AW 7075, Табела 8. стр. 100, показују да је највећа величина зрна код узорка 0, који је одливен без дејства електромагнетног поља, а да је најмања величина зрна измерена код узорка 4 који је одливен под дејством поља фреквенције 30 Hz. Посматрајући средње вредности величине зрна види се да примена поља и повећање његове фреквенције од 10 Hz до 30 Hz утиче на смањење величине зрна. Истовремено се запажа да је разлика између минималних и максималних вредност величине зрна највећа код узорка 0, а да је ова разлика најмања код узорка 4. На слици 46., страна 99, се види да се код узорка 0 јавља порозност концентрисана по границама ћелија Електромагнетно поље мале фреквенције од 10 Hz (узорак 1) и 15 Hz (узорак 2) утицало је на благо смањење величине зрна. Може се закључити да електромагнетно поље изразито ниских фреквенција не обезбеђује услове при очвршћавању за добијање ситније и уједначеније микроструктуре. Добијање униформније и ситније структуре запажа се код узорка 3 (20 Hz), а још више код узорка 4 (30 Hz). Ово се може објаснити деловањем два механизма [43]. По првом механизму сматра се да принудна конвекција механички ломи или растапа дендритне гране на фронту кристализације. Други механизам је тај да појачано кретање растопа повећава пренос топлоте из унутрашњости растопа према површини. Ово врло ефикасно снижава прегревање растопа, и на тај начин омогућава нуклеусима, насталим по првом механизму да расту. Генерално, уједначенија и финија структура по пресеку узорака добијена под утицајем електромагнетног поља је последица измењених услова очвршћавања што је сагласно са другим истарживачима [46, 47, 48, 51]. Наиме, електромагнетно поље делује на уједначавање температурног градијента, униформну расподелу легирајућих елемената и смањење зоне очвршћавања.

### **8.1.2 Скенирајућа електронска микроскопија SEM/EDX анализа**

Структуру испитаних узорака у ливеном стању чини чврст раствор алуминијума, као основа, и честице интерметалних фаза, које граде легирајући елементи са или без алуминијума, а излучене су у виду еутектикума или појединачно. На Сликама 48, 49, 50, 51 и 52., стр. 101 – 105, су приказане SEM микрофотографије узорака у ливеном стању добијене без електромагнетног поља и са електромагнетним пољем различите фреквенције. Уз микрофотографије приказане су и одговарајући спектри расподеле присутних легирајућих елемената добијене EDX анализом.

Растворне честице интерметалне фазе граде атоми цинка, магнезијума и бакара са или без алуминијума. Присутне интерметалне фазе јављају се у облику ситнијих или крупнијих честица различите морфологије: штапића, иглица плочица или слова. На основу добијених резултата и прегледом литературе [1, 4, 5, 6] присутне растворне фазе могу бити: M-MgZn<sub>2</sub>, T-Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>, S(CuMgAl<sub>2</sub>) и CuAl<sub>2</sub>. Највећи део нерастворних фаза чине интерметалне фазе железа типа (Mn,Fe)Al<sub>6</sub>, FeAl<sub>3</sub>, Cu<sub>2</sub>FeAl<sub>7</sub>, Al(Fe,Mn)Si, Mg<sub>2</sub>Si у којима се растварају и други присутни елементи, а могуће су и засебне фазе неких од ових елемената. У погледу утицаја других легирајућих елемената, посебно хрома, сматра се да се овај елемент налази у чврстом раствору али је могућа и појава CrAl<sub>7</sub> фазе. Вероватноћа појаве ове фазе повећава се услед појава сегрегација других елемената. На основу досадашњих сазнања о интерметалним фазама у структури алуминијумских легура Al-Zn-Mg-Cu може се констатовати да је присуство железа најштетније. Због његове изузетно мале растворљивости у чврстом раствору лако настају еутектичке фазе које везују све основне легирајуће елементе, а посебно бакар, Слика 48, 49, 50, 51 и 52, стр. 101 – 105. На тај начин смањују позитиван легирани потенцијал и повећавају удео интерметалних фаза у структури. Из овог разлога потребно је садржај додатних легирајућих елемената одржавати на минимуму. Добијени резултати показују да електромагнетно поље, односно фреквенција није утицала на промену фазног састава узорака у ливеном стању, што је потврђено и диференцијално термијском анализом, већ пре на смањење сегрегација, количински удео интерметалних фаза као и облик

односно геометрију фаза. Што се тиче утицаја интерметалних фаза на механичка својства легуре, природа фаза није примарна јер су оне уопштено говорећи крте. Да би се механичка својства легуре побољшала треба да се тежи смањењу њиховог удела или промени величине и облика издвајања.

### **8.1.3 Одређивање хемијске сегрегације по попречном пресеку узорка**

У оквиру експерименталног дела рада извршена су испитивања хемијске сегрегације за три легирајућа елемента Mg, Zn и Cu и то за узорак који је добијен без дејства електромагнетног поља, узорак 0, и узорак који је одливен под дејством електромагнетног поља са фреквенцијом од 30 Hz, узорак 4, јер је разлика између ових узорка најизраженија. Анализирајући добијене резултате, Слика 53., стр. 106, може се видети да је расподела сва три легирајућа елемента магнезијума, цинка и бакра прилично неуједначена код узорка који је добијен без дејства електромагнетног поља. Највећа концентрација ових елемената уочава се на самој површини узорка, односно на месту где је највеће одвођење топлоте [87]. Концентрација легирајућих елемената постепено опада према центру узорка. Садржај ових елемената код узорка 4, је знатно уједначенији у поређењу са узорком 0. Код овог узорка садржај легирајућих елемената је највећи на површини узорка и опада према његовом центру, међутим та разлика, између површинске и централне зоне, знатно је мања него код узорка који је добијен без дејства електромагнетног поља. Може се закључити да је хемијска сегрегација легирајућих елемената знатно мања код узорка који је добијен под дејством поља, што је врло значајно са аспекта позитивног утицаја на вредности механичких својстава. Крте еутектичке фазе са ниском тачком топљења на границама зрна су богате легирајућим елементима. На основу добијене расподеле удела легирајућих елемената, Слика 53., стр. 106, може се закључити да је, при ливењу без електромагнетног поља, количина ових еутектичких фаза много већа на површини ингота него у његовом центру, јер је на том месту највећа концентрација легирајућих елемената. Појава ових хемијских сегрегација у структури значајно погоршава механичка својства алуминијумских легура, нарочито отпорност материјала ка појави

прслина. Применом електромагнетног поља одговарајуће фреквенције, која мења услове очвршћавања, удео хемијских сегрегација и кртих еутектичких фаза се знатно смањује. На тај начин се остварују боља механичка својства одливака и повећава способност за пластичну деформацију.

#### **8.1.4 Диференцијална термијска анализа**

Диференцијална термијска анализа, урађена је на узорку који је одливен без дејства електромагнетног поља, (узорак 0), и на узорку који је добијен под дејством електромагнетног поља фреквенције 30 Hz, (узорак 4). Поредићи термограме Слика 54., стр. 107, може се закључити да је температурни опсег ендотермалних пикова приближан. Ово значи да је састав неравнотежних интерметалних фаза у виду еутектикума или појединачно излучених у оба узорка исти. Код узорка 4 дошло је до веће промене енергија у односу на узорак 0. Промена апсолутних вредности енергија у односу на узорак 0 на 644,74 °C је 45 %, а на 554.86 °C односно на 565.19 °C је 34 %. Ово показује да је количински удео интерметалних фаза излучених код узорка 0 мањи него код узорка 4, одливеденог при фреквенцији 30 Hz, што је у сагласности са мереним вредностима количинског удела интерметалних фаза,  $V_{V_{IMF}}$ , Табела 7., стр. 93. Овом анализом је потврђено да електромагнетно поље утиче на количински удео излучених интерметалних фаза али не и на промену фазног састава легуре, што је потврђено и са добијеним резултатима SEM/EDX анализе.

#### **8.1.5 Мерење електропроводљивости**

Из приказаних резултата мерења електропроводљивости, Табела 9., стр. 108, може се видети да узорак 0 који је одливен без дејства електромагнетног поља има најмању вредност електропроводљивости (око 13.44 MS/m). Узорак 4 који је одливен

под дејством електромагнетног поља фреквенције 30 Hz има највећу вредност електропроводљивости (око 18.40 MS/m). Како електропроводљивост првенствено зависи од састава и хомогености чврстог раствора, овим се још једном потврђује нехомогеност узорка 0. Код узорка 4, чврст раствор је најмање обогаћен легирајућим елементима (највећа вредност  $V_{V_{IMF}}$ ), што значи да су легирајући елементи у интерметалним фазама па је и вредност електропроводљивости највећа. Узорци који су одливени под дејством електромагнетног поља са нижим фреквенцијама од 10, 15 и 20 Hz имају вредности електропроводљивости нешто веће од 14 MS/m. Код њих нема значајнијих разлика у вредностима електропроводљивости, па се може закључити да примењено електромагнетно поље није довољно утицало на промену микроструктуре првенствено састав и хомогеност чврстог раствора.

#### **8.1.6 Испитивање механичких својстава**

Анализа добијених резултата, Табела 10., стр. 108, показује да узорци 1, 2, 3 и 4 који су одливени под дејством електромагнетног поља, имају веће вредности тврдоће, затезне чврстоће, границе течења и издужења при разарању у односу на узорак 0, који је одливан без дејства електромагнетног поља. Очигледно је да са повећањем фреквенције електромагнетног поља (од 10 Hz до 30 Hz), континуирано расту вредности свих измерених механичких својстава. Узорак 4, добијен под дејством поља највеће фреквенције (30 Hz), има највеће вредности и најбољу комбинацију, ( $R_m$  и  $A$ ), механичких својстава. Пораст затезне чврстоће у односу на узорак 0, је за 14%, а издужења чак за 54%, што је веома значајно са становишта способности ове легуре за пластичну деформацију. Код узорака 1 и 2 који су добијени под дејством електромагнетног поља са ниским фреквенцијама од 10 и 15 Hz констатује се и мала разлика у вредностима механичких својстава у односу на узорак 0. Ово показује да промена фреквенције реда величине од 5 Hz доводи до врло малог пораста вредности механичких својстава, што се могло и очекивати обзиром на њихову микроструктуру. Нешто веће вредности добијене су код узорка 3 (20 Hz). Недвосмислено се може закључити да применом електромагнетног поља и порастом



његове фреквенције долази до пораста вредности свих измерених механичких својстава, али и да поље ниских фреквенција на њих не утиче значајно. Ово указује да комбиновањем и правилним избором радних параметара приликом ливења (првенствено фреквенције) може да се постигне задовољавајући однос чврстоће и издужења у зависности од намене легуре. Објашњење за овакве резултате механичких својстава испитиваних узорака треба тражити у добијеној микроструктури. Обзиром да микроструктурни параметри директно утичу на механичка својства легуре. Треба напоменути да узорак 0 поред грубе микроструктуре, има велики удео неметалних укључака и порозности која је углавном концентрисана по границама ћелија и зрна, што је додатно утицало на смањење његових механичких својстава. Применом електромагнетног поља као и повећањем његове фреквенције од 10 Hz (узорак 1), 15 Hz (узорак 2), 20 Hz (узорак 3) до 30 Hz (узорак 4) долази до смањења вредности микроструктурних параметара DAS и  $L_{MF}$ , односно микроструктура се уситњава. Узорак 4 има најфинију микроструктуру са најмањом разликом између максималне и минималне вредности величина мерених структурних параметара, а има и уједначенију расподелу легирајућих елемената Mg, Zn и Cu од површине према центру. Излучене интерметалне фазе су знатно равномерније распоређене по попречном пресеку. Све ове чињенице имају за последицу да узорак 4 одливен у пољу фреквенције 30 Hz има најбољу комбинацију механичких својстава.

## **8.2 Хомогенизовано стање**

### **8.2.1 Оптичка микроскопија**

Већ је констатовано да је микроструктура узорака 1 и 2, који су одливени под дејством електромагнетног поља ниске фреквенције од 10 Hz и 15 Hz, нехомогена, претежно дендритне морфологије и са неуједначеном величином зрна. Ови узорци су изабрани за хомогенизационо жарење на 480 °C у току 8 сати, у циљу побољшања добијене микроструктуре. Добијени узорци након процеса хомогенизације означени

су са 1 хом (10 Hz) и 2 хом (15 Hz). У току хомогенизационог жарења дошло је до растварања примарних фаза, излучених по границама зрна и дендрита, уз равномерно излучивање секундарног талога, без појаве зоне без талога, Слика 55. и 56. страна, 109 и 110.

Квантитативном микроструктурном анализом одређена је вредност геометријских микроструктурних параметара DAS (ширина секундарних дендритних грана) и  $L_{IMF}$  (ширина међудендритног простора) преко којих се може пратити утицај ове термичке обраде, Табела 11. стр., 111, Слика 57., стр. 112. Резултати мерења и одговарајуће упоредне кумулативне криве, Слика 58., стр. 113, показују мале разлике у микроструктури ова два хомогенизована узорка, Табела 11., стр. 111.

Процентуалне разлике вредности измерених параметара за узорке у ливеном и хомогенизованом стању приказане су у Табели 20. Даља анализа добијених резултата показује да је након хомогенизације дошло до пораста вредности параметра DAS и смањења вредности параметра  $L_{IMF}$  у односу на измерене вредности ових параметара код ливених узорка.

Табела 20. Процентуално изражене разлике средњих вредности структурних параметара за узорке у ливеном и хомогенизованом стању

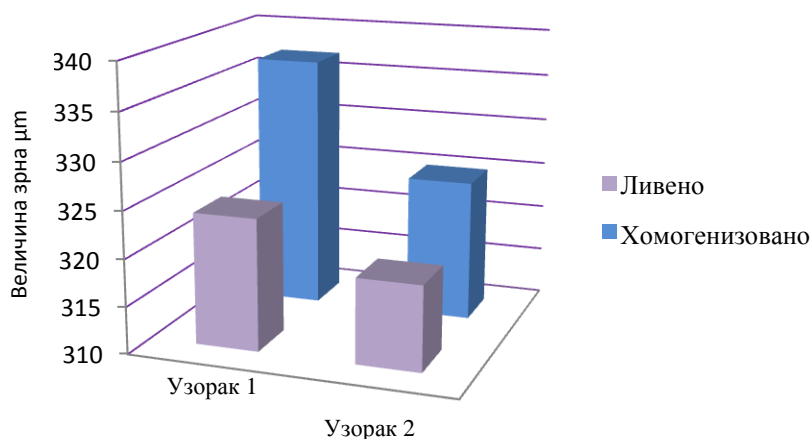
Узорак	DAS (LIV-НОМ) (%)	$L_{IMF}$ (LIV-НОМ) (%)	$V_{VIMF}$ (LIV-НОМ) (%)
1	29.64	2.4	21.04
2	30.18	18.6	19.27

Може се закључити да је хомогенизација више утицала на параметар DAS него на  $L_{IMF}$ . Дошло је до повећања параметра DAS код узорка у хомогенизованом стању у односу на ливено стање и то за 29.64% код узорка 1 (10 Hz), а за 30.18% код узорка 2 (15 Hz). Насупрот томе, дошло је до пада вредности параметра  $L_{IMF}$  код узорка у хомогенизованом стању у односу на ливено стање и то за 2.4%, код узорка 1 (10 Hz) и за 18,6% код узорка 2 (15 Hz). Истовремено, запажа се тенденција пада количинског удела интерметалних фаза код оба узорка након хомогенизационог жарења.

Међутим, генерално се може рећи да уколико се вредности параметара у хомогенизованом стању упореде са истим за ливено стање, Табела 7., стр. 93, констатоване промене су значајније изражене у %, Табела 20., али нису тако велике у апсолутним вредностима. Пораст параметра DAS се могао и очекивати јер је у току жарења дошло до растварања интерметалних фаза, што је утицало на смањење параметра  $L_{MF}$  и количинског удела углавном нискотопивих интерметалних фаза, што је у сагласности са истраживањима других истраживача [41].

### Величина зрна

На основу Сlike 59., стр. 114 и Табеле 8. и 12., стр. 100 и 114, може се закључити да је у току хомогенизационог жарења дошло до промене величине зрна у односу на ливено стање, Слика 46., стр. 99. Код оба узорка 1 хом и 2 хом зрно је порасло у поређењу са одговарајућим узорцима у ливеном стању. На слици 74. је упоредно дата промена у величини зрна. Види се да је до веће промене у величини зрна дошло код узорка 1, који је одливен под дејством електромагнетног поља, најмање фреквенције 10 Hz. Ова чињеница се може објаснити грубљом ливеном структуром узорка 1 (10 Hz) у односу на узорак 2 (15 Hz), тако да су границе зрна, у првом случају, имале већу покретљивост због мањег броја препрека за кретање дислокација.



Слика 74. Промена величине зрна код узорака у ливеном и хомогенизованом стању

## **8.2.2 Скенирајућа електронска микроскопија SEM/EDX анализа**

На Сликама 60. и 61., стр. 115 и 116, приказане су SEM микрофотографије узорака у хомогенизованом стању 1хом (10Hz) и 2хом (15Hz). Уз микрофотографије приказани су и одговарајући спектри расподеле присутних легирајућих елемената добијени EDX анализом. Са фотографија се види да је хомогенизационим жарењем дошло до делимичног растварања примарних растворних фаза по границама зрна и ћелија уз издвајање секундарног талога. Нерастворне фазе на бази железа и хрома се не могу уклонити хомогенизационим жарењем и оне остају присутне. То су фазе типа  $(\text{Mn,Fe})\text{Al}_6$ ,  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{Cu}_2\text{FeAl}_7$ ,  $\text{Al}(\text{Fe,Mn})\text{Si}$ ,  $\text{CrAl}_7$ . Оне се на SEM микрофотографијама виде као светле фазе. Њихов штетни утицај на механичка својства легуре се може ублажити смањењем њиховог удела и добијањем одговарајућег облика ових фаза још у току ливења. Електромагнетним пољем се може утицати на облик излучених фаза што се види са добијених микрофотографија, Сликe 48, 49, 50, 51 и 52., стр. 101-105.

## **8.2.3 Мерење електропроводљивости**

Анализирајући резултате електропроводљивости, Табела 13., стр. 117, може се видети да су вредности електропроводљивости прилично уједначене код хомогенизованих узорака. Уколико се упореде вредности електропроводљивости узорака у ливеном стању 1 (10 Hz) и 2 (15 Hz) са одговарајућим узорцима у хомогенизованом стању 1хом и 2хом, види се да хомогенизовани узорци имају незнатно веће вредности електропроводљивости у односу на узорке у ливеном стању. Та промена вредности електропроводљивости износи око 6%. Ово се може објаснити малом количином нискотопивих фаза у ливеном стању. На основу добијених резултата може се закључити да је примењен режим хомогенизације (480 °C, 8 h) у малој мери утицао на промену састава и хомогености чврстог раствора ливених узорака 1 и 2. То може указивати, да у циљу побољшања карактеристика ливених узорака треба продужити време хомогенизације.

#### 8.2.4 Испитивање механичких својстава

Из приказаних резултата, Табела 14., стр. 117, испитаних механичких својстава хомогенизованих узорака види се да узорак 2хом има веће вредности тврдоће, затезне чврстоће, техничке границе течења и издужења при разарању у односу на узорак 1хом. Поредићи добијене резултате између ливених (1 и 2) и хомогенизованих узорака (1хом и 2хом) примећује се да хомогенизовани узорци имају веће вредности свих испитаних механичких својстава у односу на узорке у ливеном стању. Добијена механичка својства су у директној вези са микроструктуром. Микроструктура хомогенизованих узорака је хомогенија и уједначенија по попречном пресеку узорака што се одразило и на побољшање механичких својстава. У поређењу са хомогенизованим узорцима (1хом и 2 хом), узорак 4, који је одливан под дејством електромагнетног поља фреквенције 30 Hz, има веће вредности свих механичких својстава сем издужења. Поступком хомогенизационог жарења долази до делимичног растварања примарних фаза и раскидања њихове континуалне мреже, (узорак 2 хом ), што се одразило и на повећање вредности издужења. Све напред речено указује на то да се хомогенизацијом могу побољшати својства и овог узорка 4 (30 Hz) или да се још у ливеном стању променом и других радних параметара на пример „јачине поља“ и јачине струје могу добити жељена својства.

#### 8.3 Примена математичких модела у обради производних параметара при ливењу - хеометрија

Добијени експериментални подаци су представљени коришћењем основне дескриптивне статистике, а коришћен је и post - hoc Tukey-ев HSD тест, којим је испитано да ли постоје заиста значајне разлике између средњих вредности узорака, Табела 15., страна 119. Механичка својства (излазни параметри)  $S_0$ ,  $R_m$ ,  $R_p$  и  $A$  варирали су значајно, што указује да би се регресиона анализа и фитовање експерименталних података могло извести коришћењем SOP (полином другог реда)

и/или ANN (вештачке неуронске мреже) моделовањем. Обрачун објективне функције  $F$  је урађен помоћу једначине (20).

За визуелизацију података, праћење трендова и испитивање ефикасности груписања података на основу дескриптора коришћени су графици са уцртаним првим два основним компонентама у факторској равни добијене из PCA (анализа главних компоненти) матрице података, Слика 62. Biplot дијаграм, стр.120. Примећује се да постоји раздвајање посматраних узорака, на основу коришћених дескриптора. Резултати су показали да прве две главне компоненте, обухватају заједно 99.66% од укупне варијабилности што се може сматрати довољним за представљање података и да се прве две главне компоненте могу користити у овим анализама. PCA (анализа главних компонената) анализом је утврђено да су излазне променљиве  $R_m$ ,  $R_p$  и  $A$  најутицајнији фактори за обрачун прве факторске координате, док је излазна променљива  $S_0$ , најважнија променљива за обрачун друге факторске координате. Утицај фреквенције  $\nu$ , се може посматрати на Слици 62., стр. 120, на којој су узорци са средњим вредностима  $\nu$  (30 Hz) налазе на левој страни графика, док су остали узорци (који су обрађивани, на 10 и 50 Hz) налазе на десној страни графика. Узорци који имају најнижу прву факторску координату су имали највеће вредност излазних параметара  $R_m$ ,  $R_p$  и  $A$ , а уједно и највише вредности објективне функције  $F$ . То су узорци бр. 15 и 18, као и 10,12, 13 и 14, Табела 15. стр.119. Узорци који се налазе на десној страни PCA (анализа главних компоненти) графика (број 1, 2 и 3) имале су мање вредности параметара  $R_m$ ,  $R_p$  и  $A$ , као и најниже вредности објективне функције  $F$ , Табела 15. стр.119.

Анализа варијансе (ANOVA) спроведена је за добијање SOP (полином другог реда) модела, а испитан је утицај процесних величина на одзиве (излазне параметре). Према ANOVA-и, Табела 16., стр. 122, одзиви  $S_0$ ,  $R_m$ ,  $R_p$  и  $A$  углавном зависе од фреквенције  $\nu$ , статистички значајно на нивоу  $p < 0,05$ . Променљива  $T$ , „јачина поља“, је такође веома утицајна, статистички значајно на нивоу  $p < 0,05$  и  $p < 0,10$ , за ове одзиве, док је утицај јачине струје  $I$ , такође био приметан, али далеко мање значајан. Сви одзиви су углавном под утицајем квадратног члана, статистички значајно на нивоу  $p < 0,05$ . Линеарни члан фреквенције  $\nu$ , је такође био статистички значајан на

---

нивоу  $p < 0,05$  Преостала варијанса, означен као "грешка" у Табели 16., стр.122, представља неслагање модела са експерименталним вредностима (доприноси виших чланова који нису описани у SOP моделу ). Сви развијени модели су показали да нема статистички значајног одступања модела од експерименталних вредности, што је потврдило њихову исправност. Високе вредности коефицијента детерминације,  $r^2$ , такође указују да се експериментални подаци задовољавајуће поклапају са математичким моделима. Тродимензионални графици одзива на мале промене улазних величина нацртани су ради визуализације експерименталних података и поређења са SOP (полином другог реда) моделом, Слика 63., стр. 121.

У израчунавању ANN (вештачке неуронске мреже) модела коришћен је Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno ( BFGS ) алгоритам који је реализован у рутини у програму [56] StatSoft STATISTICA. При оптимизацији ANN модела врши се минимизирање функције грешке, вредности које генерише мрежа и експерименталних података у циклусима који се понављају током обуке ANN модела [67]. Збир квадрата (SOS) се процењујућ на основу BFGS алгоритма , који има улогу да убрза и стабилизује конвергенцију резултата [68]. Процес обуке је поновљен неколико пута да би добили најбоље перформансе ANN модела, због великог степена варијабилности посматраних параметара. Прихваћено је да је успешна обука постиже када процес учења и крос - валидације ( SOS-збир квадрата, током циклуса обуке) постане приближан нули у неколико узастопних итерација. Коефицијент детерминације ( $r^2$ ) и збир квадрата (SOS) су коришћени као параметри за испитивање тачности рада добијених ANN модела. Оптималан број скривених неурона се бира током минимизације разлика између вредности излаза које се добијају радом ANN модела и жељеним резултатима, користећи збир квадрата и кофицијент детерминације током тестирања, као индикатор учинка рада мреже. Коришћени MLP (вишеслојни перцептрон модел) је означен у складу са нотацијом у програму StatSoft STATISTICA, где је ознака " MLP " праћена бројем улаза, бројем неурона у скривеном слоју, и бројем излаза. Према перформансама ANN модела ( збир  $r^2$  и SOS за све променљиве у једном ANN моделу), уочено је да је оптималан број неурона у скривеном слоју је 8 (мрежа MLP 3-8-4 ), Табела 17., стр.123. Поклапање вредности

експерименталних мерења и резултата модела, представља перформансе ANN модела, коефицијент детерминације треба да буде што већи односно што ближи јединици, Табела 18., стр.123. Мрежа је била у могућности да предвиди релативно добро све процесне излазе за широк спектар процесних променљивих, као што се види са Сlike 64., стр.124 на којој су упоређени експериментални подаци са резултатима ANN модела за механичка својства ( $S_0$ ,  $Rm$ ,  $Rp$  и  $A$ ). Може се видети да су вредности  $r^2$ , коефицијента детерминације, за SOP (полином другог реда) модел, Табела 16. стр.122, веома слични онима које су везане за ANN модел. То се слаже са другим ауторима [78]. Иако су ANN модели сложенији од SOP модела, ANN модели показали су мало бољу тачност због високе нелинеарности развијеног система. Вредности коефицијента детерминације,  $r^2$ , Табела 16., стр. 122, између експерименталних мерења и SOP модела, за излазне променљиве  $S_0$ ,  $Rm$ ,  $Rp$  и  $A$  били су: 0.531; 0.938; 0.986 и 0.977, респективно, док је најбољи ANN модел (MLP 3-8-4, број 3, Табела 18., стр 123, остварио: 0.800; 0.970; 0.992 и 0.992, респективно, током периода обуке или учења.

Фази синтетичка оптимизација излазних променљивих је рађена како би се одредили оптимални улазни параметри  $V$ ,  $I$ ,  $T$  који дају најбоље вредности механичких својстава  $S_0$ ,  $Rm$ ,  $Rp$  и  $A$ , [88]. Трапезоидна функција припадности је коришћена при прорачуну, једначина (20), у којој је дефинисан распон  $a - b$  који је обухватио комплетни интервал измерених излазних вредности, а  $m - n$  представља оптималне вредности, Табела 21. Оптимални параметри, који се користе за процену FSE (фази синтетичка евалуација) алгоритама, [89], добијени су на основу искуства, рачунајући  $m$  што је ближе могуће  $b$ .

Табела 21. Параметри за трапезну функцију припадности

Параметар	$S_0$ (mm <sup>2</sup> )	$Rm$ (MPa)	$Rp$ (MPa)	$A$ (%)
$a$	49.88	321.56	235.72	3.01
$b$	50.49	405.75	302.53	6.86
$m$	50.46	385.46	287.40	6.51
$n$	50.49	405.75	302.53	6.86



Објективна функција ( $F$ ), једначина (20), је математичка функција чији се максимум одређује сабирањем резултата фази синтетичке евалуације, према једначини (21).

Сваки улазни параметар ( $V$ ,  $I$  и  $T$ ) има једнак утицај на функцију  $F$ :

$$F(V, I, T) = \overline{S_0} + \overline{Rm} + \overline{Rp} + \overline{A} \quad (21)$$

Максимум функције  $F$ , представља оптималне вредност улазних параметара  $V$ ,  $I$ , и  $T$ , као и оптималне вредности излазних параметара  $S_0$ ,  $Rm$ ,  $Rp$  и  $A$ . Вредности  $F$  су одређене коришћењем једначине (20). Када су вредности функција припадања ближе 1, оне показују тенденцију да вредности тих параметара теже да буду оптимална. Оптималне вредности процесних параметара (улазни и излазни) за све групе су приказане у Табели 19., стр. 124. Добијене оптималне вредности процесних параметара поклапају се са експерименталним вредностима.

#### **8.4 Нумеричка симулација процеса ковања легуре EN AW 7075**

На Сликама 65. и 66., стр.125, приказана су својства материјала и криве течења за легуру EN AW 7075. Дужина трајања симулације зависи од степена сложености и обима процеса. По завршетку симулације приступа се прегледу добијених резултата. Прво је потребно проверити да ли је материјал потпуно испунио гравуре алата, односно да ли је добијен жељени облик отковка. После тога потребно је проверити и друге показатеље процеса као што су радна оптерећења, температуре, дистрибуција контактних напона и слично. Сви наведени параметри су у границам предвиђеним за овакве поступке. На Слици 67., стр. 126, приказана је расподела еквивалентне деформације на крају процеса ковања унутар деформисане запремине комада и на контактаној површини.

На основу добијених резултата симулације процеса ковања види се да еквивалентни напон има максимум на крају процеса ковања и износи 86.59 МПа у зони радијуса матрице, Слика 68., стр. 126. Највећа деформација се остварује према очекивању у централној зони комада приликом формирања завршног профила у

калупу. Поред овога примећен је и пораст температуре у централној зони комада Слика 69., стр. 127. На крају анализе, показана је симулација промене деформационе силе на горњем и доњем калупу у функцији хода пресе. Највећа сила износи 4121.8 KN, са изразитим порастом при искивању венца, Слика 70., стр. 127.

Са слика се види да су вредности напона у зиду комада највеће при обликовању зида, а затим опадају. Детаљна анализа течења материјала при ковању преко напонских компонената, поља деформација и сл., рађена је за више комбинација геометријских параметара алата како би се добило најоптималније решење. Применом поменутог софтвера могуће је врло прецизно одредити правилно испуњење шупљина гравуре и истицање у венац. На тај начин се поред правилног попуњавања калупа добија бољи квалитет отковка и продужава се радни век алата.

Нумеричка симулација процеса топлог ковања алуминијумске легуре EN AW 7075 која је одливена под дејством електромагнетног поља фреквенције 30 Hz, показала је да је легура погодна за поступак топлог ковања. Сви добијени резултати су у границама очекиваних, добијена је симетрична расподела еквивалентних напона и температурних поља као и максимална вредност еквивалентног напона на крају поступка ковања. Овим је још једном потврђена могућност добијања одговорних делова који се добијају процесом топлог ковања од алуминијумске легуре EN AW 7075 одливане под дејством електромагнетног поља. Пројектовање технологије обраде метала у пластичном стању коришћењем нових софверских алата садржи све напредне елементе реинжењеринга постојећих технологија. На овај начин омогућен је брз развој модела производа и сагледавање свих битних параметара процеса обраде ковањем. Применом нумеричке симулације могуће је предвидети односно избећи стварање дефеката приликом течења материјала (преклопи, спољашње и унутрашње пукотине) чиме се повећава радни век алата, побољшавају механичка својства отковка са смањеним бројем индустријских проба. Ово недвосмислено доводи до повећања квалитета производа, уштеде енергије и времена трајања процеса производње готовог производа.

## **9. ЗАКЉУЧАК**

## **9. ЗАКЉУЧАК**

На основу експерименталних резултата и литературних података могу се извести следећи закључци.

У тези је испитиван утицај електромагнетног поља током полуконтинуираног ливења алуминијумске легуре EN AW 7075, у производним условима, на добијене карактеристике узорака у ливеном и хомогенизованом стању. Утицај поља је праћен преко промене фреквенције од 10 (узорак 1), 15 (узорак 2), 20 (узорак 3) и 30 Hz (узорак 4), уз држање осталих радних параметара електромагнетног поља константним. Да би се одредио степен утицаја поља на добијене карактеристике одливака као еталон је служио узорак 0 добијен истим поступком ливења, на истом уређају, само без присуства електромагнетног поља. За хомогенизационо жарење (480 °C/8h) изабрани су узорци 1 и 2 који су показали најлошије карактеристике у ливеном стању у циљу њиховог побољшања.

Применом електромагнетног поља при ливењу узорака, остварене су разлике код свих испитиваних карактеристика (микроструктура, механичка својства, електропроводљивост, хемијска сегрегација.) у односу на узорак добијен без утицаја електромагнетног поља. Степен промена расте са повећањем фреквенције тако да је највећи код узорка 4 (30 Hz).

Микроструктуру узорка 0 (одливан без електромагнетног поља) одликује релативно груба и неуједначена ћелијско-дендритна морфологија (више ћелијска) издвајања чврстог раствора по чијим границама су излучене интерметалне фазе (дво или више компонентни еутектикум или појединачно) у виду континуалне мреже. Такође је запажено присуство веће количине укључака и порозности.

Применом електромагнетног поља микроструктура тј њена морфологија и хомогеност, по пресеку узорака, се мењају са растом фреквенције. Код узорка 1 (10Hz) микроструктура је претежно ћелијска, неуједначена по пресеку, по чијим границама је релативно континуална мрежа интерметалних фаза. Узорак 2 (15Hz) има такође нехомогену микроструктуру по пресеку али је морфологија издвајања

чврстог раствора претежно дендритна по целој површини. И овде је присутна скоро континуална мрежа интерметалних фаза по границама дендрита. Узорак 3 (20Hz) одликује дендритна структура у површинском слоју, а хелијска у централној зони пресека са уједначеном микроструктуром по целом пресеку. Ово значи да се тек применом фреквенције од 20 Hz микроструктура почиње значајније разликовати од узорка 0 (без дејства поља). Још ситнија и униформнија, претежно хелијска са дисконтинуалном мрежом интерметалних фаза, микроструктура је остварена код узорка 4 (30Hz). Код овог узорка скоро да није запажено значајније присуство пора и укључака за разлику од предходних узорака.

Резултати квантитативне микроструктурне анализе су у потпуној сагласности са претходном квалитативном анализом добијене микроструктуре испитиваних узорака. Наиме, измерене вредности ширине секундарних дендритних грана,  $DAS$ , и ширине међудендритног простора у коме су излучене интерметалне фазе,  $L_{IMF}$ , опадају од узорка 0 до узорка 4 (30 Hz). Такође, је и расподела вредности  $DAS$  и  $L_{IMF}$  све ужа, што говори у прилог тога да је при фреквенцији 30 Hz добијена најситнија и најуниформнија микроструктура. Истовремено са падом вредности  $DAS$  и  $L_{IMF}$  расте количински удео интерметалних фаза,  $V_{V_{IMF}}$ . Зрна су изразито крупна и сличних вредности и расподела по величини, почев од узорка 0 до узорка 1 (10Hz) и 2 (15Hz). Тек код узорка 3 (20Hz) зрно је значајно ситније, а код узорка 4 (30Hz) најситније. Генерално се може закључити да се под утицајем поља фреквенције 30Hz образује најфинија и најуједначенија микроструктура по целом пресеку одливка, што ће директно утицати на механичка својства овог узорка.

Скенинг електронска микроскопија са EDX анализом показала је да електромагнетно поље није утицало на промену фазног састава легуре већ само на облик и финоћу излучених интерметалних фаза.

Мерењем затезне чврстоће, границе течења, издужења и тврдоће показало се да су узорци одливени под утицајем електромагнетног поља постигли боље резултате у односу на узорак 0 (одливен без поља). При томе узорак 4 (30Hz) има најбоље вредности, при чему је пораст затезне чврстоће за 14% а издужења за 54% у односу на узорак 0. Познато је да је однос  $R_m : A$  веома битан за способност легуре за

пластичну прераду. Међутим, овај однос се свакако може побољшати хомогенизационим жарењем са вероватно краћим временом. Овакви резултати механичких својстава су у потпуној сагласности са оствареном микроструктуром па се при нижим фреквенцијама (10 и 15 Hz) не могу очекивати боља механичка својства.

На основу испитивања хемијске сегрегације по попречном пресеку узорака за три легирајућа елемента магнезијума, цинка и бакра, закључује се да је расподела ових елемената врло неуједначена код узорка који је одливан без дејства електромагнетног поља. Највећа концентрација елемената запажа се на самој површини узорка на месту где је највеће одвођење топлоте, а затим постепено опада према центру узорка. Крте еутектичке фазе са ниском тачком топљења су богате легирајућим елементима и оне су код узорка 0 углавном концентрисане на површини одливака. Узорак 4 који је одливан под дејством поља фреквенције 30 Hz има много уједначенију расподелу легирајућих елемената од површине према центру узорка. Појава хемијских сегрегација и кртих еутектичких фаза утичу на погоршање вредности механичких својстава.

Термограми добијени диференцијалном термијском анализом показују да је температурни опсег ендотермалних пикова приближан за узорак 0 (без поља) и за узорак 4 (30 Hz). Овим је потврђено да није дошло до промене фазног састава легуре под утицајем електромагнетног поља. Истовремено је запажена већа промена у енергијама на ендотермалним пиковима код узорка 0, што значи и да је количински удео излучених интерметалних фаза већи него код узорка 4 (30 Hz). Ово је у потпуној сагласности са измереним вредностима количинског удела интерметалних фаза  $V_{V_{IMF}}$ , које су одређене квантитативном микроструктурном анализом.

Електропроводљивост узорка који је добијен без дејства електромагнетног поља је најмања, што је последица хемијске нехомогености и састава чврстог раствора. Највећа електропроводљивост је код узорка 4 (30 Hz), јер је чврсти раствор најмање обогаћен легирајућим елементима ( највећа вредност  $V_{V_{IMF}}$ ). Код узорака који су одливени под дејством поља од 10, 15 и 20 Hz нема значајних промена у

вредностима електропроводљивости па се закључије да електромагнетно поље ових фреквенција није довело до већих промена у саставу чврстог раствора.

Узорци 1 и 2 који су одливени под дејством електромагнетног поља фреквенција 10 Hz и 15 Hz су хомогенизационо жарени због незадовољавајуће микроструктуре и релативно ниских вредности механичких својстава, а све у циљу побољшања механичких својстава. Тренд промене микроструктурних параметара DAS,  $L_{IMF}$  и  $V_{VIMF}$  који је утврђен код узорака у ливеном стању, задржан је и код узорака у хомогенизованом стању. У току процеса хомогенизационог жарења дошло је до растварања примарних фаза излучених по границама дендрита и зрна уз равномерно излучивање секундарног талога. Међутим, поређењем механичких својстава узорка 4 у ливеном стању види се да он има веће вредности тврдоће, затезне чврстоће и границе течења од хомогенизованих узорака. Закључује се да је у овом случају примењено електромагнетно поље фреквенције 30 Hz имало већи утицај на побољшање микроструктуре и механичких својстава него примењено хомогенизационо жарење (480 °C, 8 h) на узорке са лошијом ливеном микроструктуром (узорци 1 и 2).

У оквиру ове докторске дисертације примењени су математички модели – хеометрија, у обради производних параметара приликом ливења под дејством електромагнетног поља у циљу прогнозе добијања захтеваних својстава легуре. На основу прегледа литературе није пронађено да је хеометрија примењена у области металургије. Ово представља први покушај примене хеометрије у овој области односно у процесу ливења у циљу прогнозирања својстава легуре, а тиме и рационализације технолошког процеса производње алуминијумских легура.

Математичком обрадом великог броја експерименталних резултата закључује се да је примена модела SOP (полином другог реда) и ANN (вештачке неуронске мреже) најбоље повезала зависност радних параметара и добијених механичких својстава. SOP модел је дао веома добро поклапање са експерименталним подацима, на основу коефицијента детерминације,  $r^2$ . У односу на SOP модел, ANN модел је дао нешто боље поклапање са експерименталним подацима, на основу вредности коефицијента детерминације,  $r^2$ . Такође, Фази синтетичком оптимизацијом су

добијене оптималне вредности улазних и излазних параметара, које су у потпуној сгласности са експерименталним вредностима. Узимајући у обзир велики број података који су коришћени у тези, као и њихову разноврсност за развијање SOP (полином другог реда) и ANN (вештачке неуронске мреже) модела, и обзиром на њихово поклапање са експерименталним резултатима, може се очекивати да ови модели буду корисни алати у контроли електромагнетног поступка ливења алуминијумске EN AW 7075 легуре. Сама методологија као и резултати моделовања могу се применити и на друге алуминијумске легуре уз одговарајуће експерименталне податке.

Обзиром да из објективних разлога није било могућности да се изврши практична проба топлог ковања, коришћена је нумеричка симулација. Применом нумеричке симулације процеса топлог ковања алуминијумске легуре EN AW 7075, добијена је поуздана напонско деформациона анализа. Такође, резултати ће послужити за проширење базе података за топлу обраду легуре. Резултати симулације омогућавају оптимизацију процеса чиме се подиже технолошки ниво обраде топлим ковањем.

Генерално се може закључити да се ливењем под утицајем електромагнетног поља само применом фреквенције 30 Hz могу добити релативно добри одливци, (микроструктура и однос механичких својстава), и да фреквенције ниже од 20 Hz нису показале очекиване резултате па њихова примена није рационална. Међутим, и даље је потребно хомогенизационо жарење које захтева краће време у односу на уобичајено. На тај начин се скраћује време технолошког процеса прераде легуре, а тиме се побољшавају и економски ефекти. Са друге стране, истраживања су показала, да примена електромагнетног поља различито утиче на исте карактеристике код различитих система алуминијумских легура приликом њиховог ливења (нпр. серије 2xxx и 7xxx које су биле предмет сопствених истраживања). На основу постигнутих резултата истраживања може се закључити да се променама и других радних параметара електромагнетног поља, осим фреквенције, могу добити још боље карактеристике одливака које би омогућиле да се технолошки поступак прераде било ког система алуминијумских легура значајно скрати или поједностави.



На крају, сва досадашња истраживања, укључујући и наведене резултате у оквиру ове докторске дисертације, показују да технологија ливења алуминијумских легура под дејством електромагнетног поља има добру перспективу и да је треба даље развијати.

## **10. ЛИТЕРАТУРА**

## **10. ЛИТЕРАТУРА**

- [1] L. F. Mondolfo, Aluminium Alloys: Structure and Properties, Boston, Butterworths, 1976.
- [2] <http://www.european-aluminium.eu/about-aluminium/>
- [3] [www.european-aluminium.eu/talat/](http://www.european-aluminium.eu/talat/)
- [4] Metals handbook, Metallography, Structure and Properties, Butterworths, London, 1976.
- [5] A. M. Zaharov, Diagrammy sastojanidvoinyh i troinyh sistem; Metallurgija, Moskva, 1964.
- [6] Z. Cvijović, Doktorska disertacija, TMF, Beograd, 1987.
- [7] H. Šuman, Metalografija, Beograd, 1989.
- [8] [www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-EN-Standards](http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-EN-Standards)
- [9] P. C. Varley, Technology of Aluminium and its Alloys, London, Newnes-Butterworths, 1980.
- [10] [www.eling.rs](http://www.eling.rs)
- [11] [www.substech.com](http://www.substech.com)
- [12] J. Noordergraaff, Jugoslovenski simpozijum o livarstvu, Budva, 1991.
- [13] M. Garnier, International Symposium on Electromagnetic processing of materials, Nagoya, ISIJ, Japan, 2000, p. 7.
- [14] N. Novović-Simović, Termička obrada legura obojenih metala, Beograd, 1991.
- [15] V. V. Petrović, Osnove elektrotehnike, Električno i magnetno kolo, Građevinska knjiga, Beograd, 1997.
- [16] V.M. Vučić, D.M Ivanović, Fizika II Elektromagnetika i optika, Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [17] T.M. Osman, P.M. Singh, and J.J. Lewandowski, Scripta Metallurgical and Materials Transactions, 1994, vol.31, p. 607.
- [18] B.J. Zhang, J.Z.Cui, G.M. Lu, Q. Zhang and C.Y. Ban, Acta Metallurgica Sinica, 2002, vol. 38, p. 215.

- 
- [19] A. Radija and K.Miwa, Metallurgical and Materials Transactions, A, 2000, vol. 31 A, p. 755.
- [20] C. Vives, Metallurgical and Materials Transactions, B, 1996, vol. 27B, p. 445.
- [21] C. J. Paradies, R.N. Smith and M.E. Glichsmann, Metallurgical and Materials Transactions, A, 1997, 28 A, p 875.
- [22] J. Pilling, A. Hellawell, Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27, p. 239.
- [23] J. Dong, J.Z. Cui, and Q.C. Le; Materials Science Engineering, A, 2003, 345, p. 234.
- [24] B. Zhang, J. Cui, G. Lu, Materials Letters, 57, 2003, p. 1707–1711.
- [25] B. Zhang, J. Cui, Materials Science and Engineering, A355, 2003, 25, p.325.
- [26] C. Zhiqiang, J. Fei, Z. Xingguo, H. Hai, J. Junze, Materials Science and Engineering A 327, 2002, p. 133.
- [27] A.A. Tzavaras and H.D.Brody, Journals of metals, March 1984, p. 765.
- [28] Ch. Vives and R. Ricou, Metallurgical Transactions B, 1995, vol 16, p 373.
- [29] J. L. Meyer, N. El-Kaddah, R. Ricou, Metallurgical Transaction B, 1997, 18, p. 529.
- [30] Z. Zhao, J. Cui, J. Dong, Journal of Materials Processing Technology, 182, 2007, 185.
- [31] J. Cui, Z. Zhang, Q. Le, Transactions of Nonferrous Metals Society of Chinas, 2010, vol. 20, p 2046-2050.
- [32] C.R. Paul, S.A. Nasar, Introduction to Electromagnetic Fields, McGraw-Hill, New York, 1987, p. 306.
- [33] Z. Haitao, N. Hiromi, Z. Yubo, C. Jianzhong, Materials Science and Engineering A 448, 2007, p 189–203.
- [34] Z. Haitao, N. Hiromi, C. Jianzhong, Materials Science and Engineering A 448, 2007, p 177-188.
- [35] Olof Sjoden, Maurizio Venini, 4<sup>th</sup> Balkan Conf. on Metallurgy, Zlatibor, 2006, p. 581.
- [36] Olof Sjoden, Maurizio Venini, 4<sup>th</sup> Balkan Conf. on Metallurgy, Zlatibor, 2006, p. 431.
- [37] Olof Sjoden, Maurizio Venini, 4<sup>th</sup> Balkan Conf. on Metallurgy, Zlatibor, 2006, p. 437.
- [38] H. Hao, X. G. Zhang, X. G Hou, Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 10, 2000, p. 590-594.
- [39] Z. Zhao, J. Cui, J. Dong, Z. Eang, Journal of Alloys and Compounds, 2005, p. 325.

- 
- [40] Z. Zhihao, D. Jie, Z. Beijijang, W. Zhefeng, Metallurgical and materials transactions A, 2004, vol 35A, p 2484.
- [41] W. Gaosong, Z. Zhihao, G. Qiang, C. Jianzhong, , Research & Development, China Foundry, 1, 2014, p.39-45.
- [42] Q.F. Zhu, Z.H. Zhao, J.Z. Cui, Y.B. Zuo, F. Qu, Acta Metallurgical Sinca, 21, 2008, vol. 3, p.205-210.
- [43] A. A. Dawood, Seventh Australian Asian Pacic Conference on Aluminum Cast House Technology, Minerals, Metals & Materials Soc, Warrendale, 2001.
- [44] Y. Zuo, J. Cui, J. Dong, F. Yu, Materials Science and Engineering A 408, 2005, p. 176–181.
- [45] J. C. Li, B. F. Wang, J.Z.Cui, , Acta Metallurgica Sinca, 20, 2007,vol. 3, p.157-166.
- [46] Z. Yubo , C. Jianzhong, Z. Zhihao, Z. Haitao, Q. Ke, Materials Science and Engineering A 406, 2005,p. 286–292.
- [47].Uroš Žunkovic, Janez Dolinšek, University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, 2012.
- [48] H. Zhang, H. Nagaumi, Y. Zuo, and J. Cui. Mat. Sci. Eng. A, 448, 2007, p.189-203.
- [49] Cao Z., Jia F., Zhang X., i Hao H., International Symposium on Electromagnetic Proceesing of Materials, Nagoya, ISIJ, Japan, 1994, p 5.
- [50] Z F Wang, J Z Cui, In Proc. of the 2nd Asian Workshop on Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern, University Press, Shenyang, China, May 2005, p. 299-305.
- [51] C. Mapelli, A. Gruttadauria, M. Peroni, Journal of Materials Processing Technology 210, 2010, p 306-314.
- [52] <http://apps.webofknowledge.com>, 2015.
- [53] A. Thielemans & D.L. Massar,. CHIMIA,39, 1985, p 236-242.
- [54] T. Sun and S. Tanumihardjo, Journal of Food Science, 9, 2007, p 159-165.
- [55] H. Abdi, L. J. Williams, Computational Statistics, 2, 2010, p. 433–459.
- [56] <http://www.statsoft.com>
- [57] G.E.P., Box, N.R. Draper, Empirical model building and response surface. New York: John Wiley and Sons, 1987.

- 
- [58] D.C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments. New Jersey, John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- [59] K. Stoyanov, A. D. Walmsley, Practical Guide to Chemometrics, 264, Taylor & Francis Group, London, 2006.
- [60] R. H. Mayers, D. C. Montgomery, Response Surface Methodology, Wiley – Interscience, 2002.
- [61] P. Ikonić, Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 2013.
- [62] W. Gary, A. Oehlert, A First Course in Design and Analysis of Experiments University of Minnesota, W. H. Freeman, 2000.
- [63] C. Tschegg, T. Ntaflos, I. Hein, Applied Clay Science, 43, 2009, p. 69-78.
- [64] T. Peters, R. Iberg, Ceramic Bulletin, 57, 1978, p.503-509.
- [65] B.J. Taylor, Methods and Procedures for the Verification and Validation of Artificial Neural Networks, Springer Science, Business Media, Inc., USA, 2006.
- [66] V. Nourani, M. S. Fard, Advances in Engineering Software, 47, 2012, p.127-146.
- [67] M. Arsenović, Z. Radojević, S. Stanković, Ž. Lalić, L. Pezo, Ceramics International, 39, 2013, p. 1667-1675.
- [68] K. Hornik, M. Stinchcombe, H. White, Neural Networks, 2, 1989, p 359-366.
- [69] S. Grieu, A. Traoré, M. Polint, J. Colprim, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 18, 2005, vol. 5, p. 559-573.
- [70] S. Grieu, O. Faugeroux, A. Traoré, B. Claudet, L. Bodnar, Energy and Buildings, 43, 2011, p. 543-554.
- [71] B. Ćurčić, L. Pezo, S. Filipović, R. Nićetin, V. Knežević, Journal of food processing and preservation, article first published online, doi: 10.1111/jfpp.12275, 2014.
- [72] A. Fedajev, V. Mihajlović, Studijski istraživački rad, Ekonomski fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, 2009.
- [73] M. Petrović, JISA Proceedings, 20, 2011, p. 47-55.
- [74] C. Charambous, IEEE Proceedings, 139, 1992, p. 301-310.
- [75] H. Demuth, M. Beale, Neural Network Toolbox: For use with Matlab, The Math-Works, Inc., Natick, MA, USA., 1992.

- 
- [76] T. Kollo, D. Von Rosen, *Advanced Multivariate Statistics with Matrices*, Springer, Netherlands, 2005.
- [77] I.C Trelea, A. L. Raoult-Wack, G. Trzstram, *Food Science and Technology International*, 3, 1997, p. 459-465.
- [78] L. Pezo, Lj. Ćurčić, S. Filipović, R. Nićetin, B. Koprivica, M. Mišljenović, B. Lević, *Hemijska industrija*, 67, 2013, vol. 3, p.465-475.
- [79] L.A. Basheer, M. Hajmeer, *Journal of Microbiological Methods*, 43, 2000, p. 3-31.
- [80] M. Vučetić, *Doktorska disertacija Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka*, Beograd, 2013.
- [81] P.Bosc, H. Kraft, F. Petry, *Fuzzy Sets and Systems*, 156, 2005, vol. 3, p. 418-426.
- [82] S. Škrbić, *Doktorska disertacija, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad*, 2008.
- [83] J. Haris, *Fuzzy logic application in engineering science*, Springer, 2006.
- [84] T. Brlek, L. Pezo, N.Voća, T. Krička, Đ. Vukmirović, R. Čolović, M. Bodroža-Solarov, *Fuel Processing Technology*, 116, 2013, p. 250-257.
- [85] M. Mihailović, A. Patarić, Z. Gulišija, M. Stefanović, *IOC 2014, Bor*, p 245-248.
- [86] A. Patarić, *Magistarski rad, TMF, Beograd*, 2007.
- [87] A. Patarić, M. Mihailović, Z. Gulišija, *Journal of Materials Science*, 47, 2012, p 793-796.
- [88] A. Patarić, Z. Gulišija, B. Jordović, L. Pezo, M. Mihailović, M. Stefanović, *Materials Transaction*, 6, 2015, vol. 56. p. 835-839.
- [89] Z.M. Ma, L. Yan, *Information Science and Engineering*, 3, 2008, p. 172-180.