

# Ispitivanje mikrostrukturnih i vlačnih svojstava polukontinuirano lijevanih Al-Mg blokova

---

Bunjan, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:016764>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Ivana Bunjan

DIPLOMSKI RAD

Sisak, lipanj 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Ivana Bunjan

ISPITIVANJE MIKROSTRUKTURNIH I VLAČNIH SVOJSTAVA  
POLUKONTINUIRANO LIJEVANIH Al-Mg BLOKOVA

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Natalija Dolić

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

1. izv. prof. dr. sc. Zdenka Zovko Brodarac, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet - predsjednica
2. izv. prof. dr. sc. Natalija Dolić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet - članica
3. doc. dr. sc. Ivan Jandrić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet - član
4. izv. prof. dr. sc. Anita Begić Hadžipašić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet - zamjenska članica

Sisak, lipanj 2019.

## **Zahvala**

*Zahvaljujem se prvenstveno svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Nataliji Dolić na stručnom vodstvu prilikom izrade ovog diplomskog rada te njezinoj ustrajnosti i podršci koju mi je pružala tijekom cijelog procesa. Vjerovala je u mene od samog početka te ne mogu riječima opisati koliko mi je puta njezina dostupnost u bilo koje doba dana spasila "glavu". Uspjela je izvući maksimum iz mene, navesti me da težim još višim akademskim ciljevima te da se ne bojim izaći iz svoje komfort zone. Prešle smo granicu odnosa profesor - student; u njoj sam osim profesorice i mentorice pronašla i prijateljicu.*

*Posebne zahvale idu stručnom voditelju mog diplomskog rada, Franji Kozini, mag. ing. met. Da smo dobili kunu svaki put kad smo radili s mojim uzorcima i borili se s njima, sad bi pili kavu negdje na plaži i samo govorili "pomalo". Franjo mi je svaki put srdačno prenio sva svoja znanja vezana uz pripremu uzoraka i mikrostrukturna istraživanja, pa i više od toga. Pronalazili smo rješenja za naizgled nemoguće situacije i uz njega sam naučila da ništa nije nerješivo - sve se može uz malo dobre volje.*

*Također se zahvaljujem gospođi Ljiljani Srećec, tehničkoj suradnici, što mi je pomagala tijekom nagrizanja uzoraka u Laboratoriju za kemiju, hidrometalurgiju i korozijska ispitivanja te što su vrata Laboratorija bila uvijek otvorena, uz njenu svesrdnu pomoć i savjete.*

*Mama, hvala ti što si me pustila da završim svoj fakultet onako kako sam ga upisala - bez ikakvog pritiska. Nema tih riječi kojima bih mogla opisati podršku koju si mi pružala tijekom cijelog mog studiranja i koju mi već sad pružaš dok panično i aktivno tražim posao. Hvala ti što vjeruješ u mene, i onda kad sama nisam vjerovala u sebe te što si me pustila da odaberem put u životu koji mi najviše odgovara. Nisi se nadala da će to biti metalurgija, zar ne? Tata, nisi tu da ga pročitaš i eventualno mi sugeriraš bolji tehnički pristup, no znam da si ponosan na mene. Budemo ti ga mama i ja nekom prilikom pročitale. Do tad ću vjerojatno već i zaboraviti o čemu sam uopće pisala i istraživala.*

*Bella, hvala ti što si sate provela ispod mojih nogu dok sam pisala ovaj rad i svaki put stavila glavu na moja koljena kad bih stala s pisanjem i duboko uzdahnula. Najbolji si pas i prijatelj na cijelom svijetu.*

*Hvala svim mojim prijateljicama i prijateljima što su me beskonačno slušali vezano uz ovaj diplomski rad. Mala riječ ohrabrenja ponekad znači više od ičega, a ti si mi ih, Tamara, davala na lagere, uz malu dozu nihilizma. Hvala ti na tome.*

*Diplomski rad posvećujem svojim roditeljima.*

Rastanak sa sobom

*Mi stojimo na rubu svijeta  
i gledamo u zapadanje zadnjih zvijezda u dubljine noći*

*Sa zvijezdama i mi zapadamo*

*Mi stojimo već na krajnjem rubu sebe*

*Ko ispod nas zemlju nevidljivo maknu  
da je već daleko vidimo ko zvijezdu?*

*Zamakle su zvijezde  
Ko od nas još može naslutiti sebe?*

*Rušimo se vječno*

*Naš je put bez dna i padanje bez glasa*

*Antun Branko Šimić*

# SADRŽAJ

|  |     |
|--|-----|
| SAŽETAK  | i   |
| ABSTRACT   | i   |
| POPIS OZNAKA   | ii  |
| POPIS POKRATA  | iv  |
| POPIS SLIKA  | v   |
| POPIS TABLICA  | vii |
| <br>   |     |
| 1. UVOD  | 1   |
| 2. TEORIJSKI DIO   | 2   |
| 2.1.OPĆENITO O ALUMINIJU I ALUMINIJSKIM LEGURAMA   | 2   |
| 2.1.1. PODJELA ALUMINIJSKIH LEGURA   | 2   |
| 2.1.2. ALUMINIJSKE LEGURE ZA GNJEČENJE   | 4   |
| 2.1.2.1.UTJECAJ LEGIRNIH I PRATEĆIH ELEMENATA NA ALUMINIJSKE LEGURE ZA GNJEČENJE             | 6   |
| 2.1.2.2.KLASIFIKACIJA ALUMINIJSKIH LEGURA ZA GNJEČENJE                                       | 8   |
| 2.1.3. SERIJA 5XXX ALUMINIJSKIH LEGURA ZA GNJEČENJE  | 9   |
| 2.2.TEHOLOGIJA LIJEVANJA   | 12  |
| 2.2.1. TEHOLOGIJA LIJEVANJA ALUMINIJSKIH BLOKOVA POSTUPKOM IZRAVNOG HLAĐENJA VODOM           | 12  |
| 2.2.2. POLUKONTINUIRANI VERTIKALNI POSTUPAK LIJEVANJA IZRAVNIM HLAĐENJEM (VDC)               | 13  |
| 2.2.3. PARAMETRI LIJEVANJA ZA VRIJEME DC LIJEVANJA   | 17  |
| 2.2.4. LIJEVANA STRUKTURA I KVALITETA POVRŠINE LIJEVANOG BLOKA                               | 19  |
| 2.3.USITNJAVANJE ZRNA ALUMINIJSKIH LEGURA ZA GNJEČENJE                                       | 19  |
| 2.3.1. VRSTE KOMERCIJALNIH CJEPIVA   | 20  |
| 2.3.2. MEHANIZMI USITNJAVANJA ZRNA CJEPIVIMA   | 21  |
| 2.4.SKRUĆIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA I RAZVOJ PRIMARNE STRUKTURE BLOKA LIJEVANOG DC POSTUPKOM | 24  |
| 2.4.1. OSNOVE SKRUĆIVANJA  | 24  |
| 2.4.1.1.POKRETAČKA SILA ZA SKRUĆIVANJE   | 24  |
| 2.4.1.2.NUKLEACIJA   | 26  |
| 2.4.2. RAZVOJ KRISTALNIH ZONA BLOKA LIJEVANOG DC POSTUPKOM                                   | 26  |
| 2.4.3. MIKROSEGREGACIJE  | 28  |
| 2.4.4. MAKROSEGREGACIJE  | 29  |
| 2.5.PROCES HOMOGENIZACIJE ALUMINIJSKIH LEGURA U INDUSTRIJI                                   | 31  |
| 3. EKSPERIMENTALNI DIO   | 34  |

|   |            |
|---|------------|
| <b>3.1.LIJEVANJE BLOKOVA DC POSTUPKOM</b>             | <b>34</b>  |
| <b>3.2.METODOLOGIJA ISPITIVANJA</b>                   | <b>44</b>  |
| <b>3.2.1. STATISTIČKO PLANIRANJE POKUSA</b>           | <b>45</b>  |
| <b>3.2.1.1.UZIMANJE UZORAKA PO PLANU POKUSA</b>       | <b>46</b>  |
| <b>„LATINSKI KVADRAT“</b>                             |            |
| <b>3.2.2. ISPITIVANJE VLAČNIH SVOJSTAVA</b>           | <b>54</b>  |
| <b>3.2.3. ISPITIVANJE MIKROSTRUKTURE</b>              | <b>55</b>  |
| <b>3.2.3.1.METALOGRAFSKA PRIPREMA UZORAKA</b>         | <b>55</b>  |
| <b>3.2.3.2.ELEKTROLITIČKO NAGRIZANJE UZORAKA</b>      | <b>56</b>  |
| <b>3.2.3.3.ODREĐIVANJE VELIČINE ZRNA POMOĆU</b>       | <b>57</b>  |
| <b>SVJETLOSNOG MIKROSKOPA</b>                         |            |
| <b>3.2.3.4.POLUAUTOMATSKA METODA MJERENJA</b>         |            |
| <b>VELIČINE ZRNA MJERENJEM DULJINE</b>                | <b>58</b>  |
| <b>PRESIJECANJA ZRNA <math>\bar{l}</math></b>         |            |
| <b>4. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA</b>             | <b>59</b>  |
| <b>4.1.REZULTATI ISPITIVANJA MIKROSTRUKTURE</b>       | <b>59</b>  |
| <b>4.2.REZULTATI ISPITIVANJA VLAČNIH SVOJSTAVA</b>    | <b>63</b>  |
| <b>4.3.STATISTIČKA ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA</b> | <b>66</b>  |
| <b>4.3.1. UTJECAJ IZVORA VARIJABILNOSTI NA BROJ</b>   |            |
| <b>ZRNA</b>   | <b>69</b>  |
| <b>4.3.2. UTJECAJ IZVORA VARIJABILNOSTI NA VLAČNU</b> |            |
| <b>ČVRSTOĆU</b>                                       | <b>71</b>  |
| <b>4.3.3. UTJECAJ IZVORA VARIJABILNOSTI NA</b>        |            |
| <b>GRANICU PROPORCIONALNOSTI</b>                      | <b>74</b>  |
| <b>4.3.4. UTJECAJ IZVORA VARIJABILNOSTI NA</b>        |            |
| <b>IZDUŽENJE</b>                                      | <b>76</b>  |
| <b>5. ZAKLJUČAK</b>                                   | <b>79</b>  |
| <b>6. LITERATURA</b>                                  | <b>80</b>  |
| <b>7. ŽIVOTOPIS</b>                                   | <b>84</b>  |
| <b>8. PRILOZI</b>                                     | <b>8-1</b> |
| <b>8.1. POPIS TABLICA I PRILOGA</b>                   | <b>8-2</b> |

## SAŽETAK

U okviru ovog diplomskog rada provedena su ispitivanja na šest aluminijskih blokova aluminijske legure EN AW-5083 lijevanih polukontinuiranim postupkom izravnog hlađenja (eng. *Direct Chill*). Cilj ovog rada bio je odrediti kako brzina hlađenja, ovisno o položaju uzoraka u bloku, utječe na promjenu broja zrna po jedinici ispitivane površine i vlačna svojstva (vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i istežanje) lijevanih blokova. U eksperimentalnom dijelu provedena su mjerenjaveličine, tj. broja zrna po jedinici ispitivane površine i vlačnih svojstava na odgovarajućim mjestima unutar poprečno izrezanih ploča s početka i kraja izlivenih blokova. Polazište za određivanje utjecaja brzine hlađenja je statistički plan pokusa („latinski kvadrat“). Ispitivanjem mikrostrukture unutar ispitivanih ploča uočena je nejednolika raspodjela istoosnih zrna, bez pojave stubičastih zrna i transkristalizacijske zone. Iz grafičkih prikaza utjecaja pojedinih varijabli za sve mjerene veličine potvrđen je očekivani utjecaj brzine hlađenja na razvoj i raspodjelu broja zrna čija vrijednost raste od sredine prema svim rubovima blokova što se na isti način manifestira i na promjeni vlačnih svojstava. Statističkom obradom rezultata ustanovilo se da je najznačajniji izvor varijabilnosti *visina*, odnosno *širina ploče*. Relativno visoki koeficijenti korelacije između ploča s početka i kraja ispitivanih blokova ( $r = 0,66$  do  $0,77$ ) upućuju na relativno zadovoljavajuću kemijsku, mikrostrukturnu i mehaničku homogenost ispitivanih blokova. Dobiveni rezultati upućuju na relativnu konzistentnost i ponovljivost postupka taljenja, obrade taline i lijevanja blokova aluminijske legure EN AW-5083.

**Ključne riječi:** *aluminijska legura EN AW-5083, VDC postupak, mikrostrukturna svojstva, vlačna svojstva, brzina hlađenja*

## SUMMARY

Within this thesis six aluminium alloy EN AW-5083 slabs cast with the semi-continuous, vertical direct water cooling process (Direct Chill) have been evaluated. It has been determined how the cooling rate influenced size and number of grains per unit area and tensile properties (tensile strength, yield strength and elongation) of slabs. In the experimental part of this work examinations of microstructural and tensile properties on specified places withing the cross sectioned 300 mm thick place( „slice“ ) on the beginning and the end of the cast slabs were performed. The base for determining influence of the cooling rate was statistical examination plan („latin square“). Microstructure examination in the „slices“ it revealed the unequal distribution of equiaxed grains, without the columnar crystal zone. Graphic figures showed influence of different sources of variability and effect of cooling rates on growth and number of grains distribution. Number of grains grows from center to the rears of ingots. Change of microstructural properties is followed by the change of tensile properties. By statistical processing of obtained results it has been established that the *slice height (ingot thickness)* is the most significant variability source. Relatively high correlation coefficients between the slices for the beginning and the end of examined ingots for grain numbers and tensile properties (from 0,66 to 0,77) indicate relatively acceptable chemical, microstructural and mechanical homogeneity of the investigated cast slabs. Obtained results reference the relative consistency and repeatability of the melting process, melt treatment and casting of the EN AW-5083 aluminium alloy slabs.

**Key words:** *aluminium alloy EN AW-5083, VDC process, microstructural properties, tensile properties, cooling rate*



## POPIS OZNAKA

| OZNAKA                    | OPIS  | MJERNA JEDINICA    |
|---------------------------|---|--------------------|
| $R_m$                     | vlačna čvrstoća   | MPa                |
| $\alpha_{Al}$             | kruta otopina Al  |                    |
| $\alpha$ - faza (Al)      | kruta otopina s plošno centriranom kubičnom rešetkom (fcc), s maksimalnom topljivosti Mg u $\alpha_{Al}$ od 17,4% pri eutektičkoj temperaturi od 450 °C |                    |
| $\delta$ - faza (Mg)      | kruta otopina s heksagonskim gustim slaganjem (hcp) s maksimalnom topljivosti Al u $\delta$ od 12,9% pri eutektičkoj temperaturi od 437 °C              |                    |
| $\beta$ - faza            | spoj s približnim stehiometrijskim sastavom $Al_8Mg_5$ s kompleksnom plošno centriranom rešetkom (fcc) - naziva se i $Al_3Mg_2$                         |                    |
| $R$ - faza ( $\epsilon$ ) | spoj koji nastaje pri 39% Mg  |                    |
| $L$                       | talina  |                    |
| $R_{p0.2}$                | konvencionalna granica proporcionalnosti  | MPa                |
| $A_{50}$                  | izduženje   | %                  |
| $\rho$                    | gustoća   | kg/m <sup>3</sup>  |
| $c_{pl}$                  | specifična toplina taline   | J/K                |
| $V$                       | brzina lijevanja  | m/s                |
| $W$                       | duljina trupca, duljina puta odvođenja topline difuzijom  | m/s                |
| $\lambda$                 | toplinska vodljivosti   | W/mK               |
| $h$                       | koeficijent prijenosa topline   | W/m <sup>2</sup> K |
| $Bi$                      | Biotov broj   |                    |
| $Pe$                      | Pecletov broj   |                    |
| $V_c$                     | brzina lijevanja  | m/s                |
| $H$                       | dubina lijevka  | m                  |
| $\lambda_s$               | toplinska vodljivost krute tvari  | W/mK               |
| $T_m$                     | temperatura taljenja legure   | K                  |
| $T_s$                     | temperature površine bloka ili temperatura rashladnog medija vode   | K                  |
| $A$                       | koeficijent koji ovisi o vrsti legure i određuje temperaturu skrućivanja legure   |                    |
| $\Delta H_f$              | latentna toplina skrućivanja  | J/mol              |
| $\rho_s$                  | gustoća krute tvari   | kg/m <sup>3</sup>  |
| $c_s$                     | specifična toplina krute tvari  | J/kgK              |
| $r$                       | polumjer trupca   | m                  |
| $V_s$                     | brzina skrućivanja  | m/s                |
| $\alpha_n$                | kut između osi bloka i normale na fronti skrućivanja  | °                  |
| $G_T$                     | temperaturni gradijent  |                    |
| $G$                       | Gibbsova slobodna energija  | J                  |
| $T$                       | temperatura   | K                  |
| $H$                       | entalpija   | J                  |
| $S$                       | entropija   | J/K                |
| $\Delta T_c$              | konstitucijsko pothlađenje  | K                  |
| $T_s$                     | temperatura solidusa  | K                  |
| $C_0$                     | sastav krutine pri $T_s$  | mas.%              |

|                             |   |                     |
|-----------------------------|---|---------------------|
| $\delta_c$                  | granični difuzijski sloj  |                     |
| $G_L$                       | temperaturni gradijen kod taline  |                     |
| $T_L$                       | temperatura likvidusa   | K                   |
| $T^*$                       | temperatura granične površine u proizvoljno odabrano vrijeme  | K                   |
| $m$                         | nagib likvidus linije   |                     |
| $C^*_L$                     | sastav taline   | mas. %              |
| $\Delta G^{het}$            | promjena Gibbsove slobodne energije kod heterogene nukleacije   | J                   |
| $r$                         | radijus klice   | m                   |
| $\gamma_{SL}$               | površinska napetost između krutine i taline   | J/m <sup>2</sup>    |
| $\theta$                    | kut kvašenja  | °                   |
| $f(\theta)$                 | geometrijski faktor   |                     |
| $k$                         | mikrosegregacijski omjer  |                     |
| $C_S$                       | maksimalni sadržaj otopljenog elementa  | mas %               |
| $C_L$                       | minimalni sadržaj otopljenog elementa nakon skrućivanja   | mas. %              |
| $h$                         | debljina bloka  | m                   |
| $b$                         | širina bloka  | m                   |
| $l$                         | duljina bloka   | m                   |
| $\bar{l}$                   | srednja duljina presijecanja  | μm                  |
| $N_A$                       | broj zrna po jedinici površine  | No./mm <sup>2</sup> |
| $G$ -broj                   | veličina zrna   |                     |
| $SS$                        | suma kvadratnih odstupanja  |                     |
| $n$                         | stupnjevi slobode   |                     |
| $s$                         | procijenjena varijanca  |                     |
| $F$                         | funkcija gustoće vjerojatnosti F-razdiobe za odgovarajuće parametre   |                     |
| $k_b$                       | stupnjevi slobode procijenjene varijance u brojniku za <i>Frač</i>  |                     |
| $k_n$                       | stupnjevi slobode procijenjene varijance u nazivniku za <i>Frač</i>   |                     |
| $p$                         | vjerojatnost da se dogodi utvrđena vrijednost za <i>Frač</i> u uvjetima ispravnosti nulte hipoteze H <sub>0</sub> |                     |
| $\sigma_1^2$ i $\sigma_2^2$ | varijance osnovnih skupova  |                     |
| $r$                         | korelacija  |                     |
| $ r_{gran} $                | granična korelacija   |                     |

## **POPIS POKRATA**

|       |   |
|-------|---|
| DC    | postupak izravnog hlađenja vodom              |
| VDC   | vertikalni postupak izravnog hlađenja vodom   |
| HDC   | horizontalni postupak izravnog hlađenja vodom |
| TEM   | transmisijski elektronski mikroskop           |
| ALPUR | sustav za otplinjavanje                       |
| OES   | optički emisijski spektrometar                |
| ANOVA | analiza varijance                             |

## POPIS SLIKA

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>Slika 1.</b>  | Podjela aluminijskih legura za gnječenje ovisno prema mogućnostima očvršćivanja toplinskom obradom [12]   | 5  |
| <b>Slika 2.</b>  | Glavni legirni elementi kod serije 5xxx [12]  | 9  |
| <b>Slika 3.</b>  | Binarni fazni dijagram Al-Mg [26]   | 9  |
| <b>Slika 4.</b>  | Utjecaj Mg na mehanička svojstva nekih legura serije 5xxx [23]  | 10 |
| <b>Slika 5.</b>  | Shematski prikaz VDC postupka [38]  | 14 |
| <b>Slika 6.</b>  | Shematski prikaz usmjeravanja mlaza vode na skrtnutu koru tijekom sekundarnog hlađenja VDC postupkom [40]   | 14 |
| <b>Slika 7.</b>  | Shematski prikaz zona u bloku tijekom DC lijevanja s koherencijskom izotermom označenom na 30% krute faze [39]  | 15 |
| <b>Slika 8.</b>  | Shematski prikaz nukleacija u različitim teorijama usitnjavanja zrna [46]   | 23 |
| <b>Slika 9.</b>  | Toplinsko polje i polje otopljenog elementa ispred granice krutina/talina [49, 50]  | 25 |
| <b>Slika 10.</b> | Različite zone kod lijevanja bloka [47]   | 27 |
| <b>Slika 11.</b> | Shematski prikaz tipičnog toka taline u prijelaznoj zoni meniskusa kod DC postupka lijevanja bloka s likvidus, koherentnim i solidus izotermama koje odvajaju tekuću zonu, zonu suspenzije, mješovitu zonu i krutu zonu unutar bloka [51] | 29 |
| <b>Slika 12.</b> | Raspodjela relativnih koncentracija različitih legirnih elemenata koji su funkcija udaljenosti od sredine ingota [52]   | 31 |
| <b>Slika 13.</b> | Shematski prikaz postupka izrade blokova polukontinuiranim vertikalnim postupkom lijevanja, VDC postupak [8, 36]  | 35 |
| <b>Slika 14.</b> | Talionička peć  | 35 |
| <b>Slika 15.</b> | Udio primarnog i sekundarnog aluminijskog po šaržama za aluminijsku leguru EN AW-5083   | 36 |
| <b>Slika 16.</b> | Proces lijevanja aluminijske legure EN AW-5083  | 38 |
| <b>Slika 17.</b> | Sredstva za usitnjavanje zrna   | 39 |
| <b>Slika 18.</b> | Daljnji proces lijevanja aluminijske legure EN AW-5083  | 40 |
| <b>Slika 19.</b> | Izliveni aluminijski blok legure EN AW-5083   | 43 |
| <b>Slika 20.</b> | Lijevani aluminijski blokovi  | 44 |
| <b>Slika 21.</b> | Poprečni presjek bloka (ploče) uzet s početka i kraja aluminijskog bloka šarže 3157 i podjela na manje segmente (oznake 1 - 12)   | 45 |
| <b>Slika 22.</b> | Metoda crne kutije [54]   | 45 |
| <b>Slika 23.</b> | Shema „latinskog kvadrata“, n=6   | 47 |
| <b>Slika 24.</b> | Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3157   | 48 |
| <b>Slika 25.</b> | Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3158   | 49 |
| <b>Slika 26.</b> | Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3159   | 50 |
| <b>Slika 27.</b> | Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3160   | 51 |
| <b>Slika 28.</b> | Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3162   | 52 |
| <b>Slika 29.</b> | Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3163   | 53 |
| <b>Slika 30.</b> | Prikaz uzimanja uzoraka kroz svih 6 ispitivanih blokova   | 53 |

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>Slika 31.</b> | Mjesto uzimanja uzoraka s isječka za vlačna ispitivanja   | 55 |
| <b>Slika 32.</b> | Shema epruvete za vlačna ispitivanja s naznačenim dimenzijama mjernog područja  | 55 |
| <b>Slika 33.</b> | Metalografska priprema uzoraka  | 56 |
| <b>Slika 34.</b> | Elektrolitičko nagrivanje uzoraka (aparatura)   | 57 |
| <b>Slika 35.</b> | Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 opremljen digitalnom kamerom Olympus DP70 i programskim paketom Analysis® Materials Research Lab  | 58 |
| <b>Slika 36.</b> | Primjer određivanja veličine zrna poluautomatskom metodom mjerenja duljine presijecanja zrna na uzorku 48PA iz šarže 3159P nagriženim Barkerovim reagensom promatran pod polarizacijskim svjetlom uz dodatak tintnog filtra | 58 |
| <b>Slika 37.</b> | Snimke mikrostrukture uzoraka šarže 3157 aluminijske legure EN AW-5083  | 59 |
| <b>Slika 38.</b> | Snimke mikrostrukture uzoraka šarže 3157 aluminijske legure EN AW-5083  | 60 |
| <b>Slika 39.</b> | Krivulja F-distribucije [36, 64]  | 67 |
| <b>Slika 40.</b> | Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za broj zrna $N_A$ - početak blokova  | 69 |
| <b>Slika 41.</b> | Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za broj zrna $N_A$ - kraj blokova   | 69 |
| <b>Slika 42.</b> | Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za vlačnu čvrstoću $R_m$ - početak blokova  | 72 |
| <b>Slika 43.</b> | Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za vlačnu čvrstoću $R_m$ - kraj blokova   | 72 |
| <b>Slika 44.</b> | Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za granicu proporcionalnosti $R_{p0.2}$ - početak blokova   | 74 |
| <b>Slika 45.</b> | Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za granicu proporcionalnosti $R_{p0.2}$ - kraj blokova  | 75 |
| <b>Slika 46.</b> | Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za izduženje $A_{50}$ - početak blokova   | 76 |
| <b>Slika 47.</b> | Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za izduženje $A_{50}$ - kraj blokova  | 77 |

## POPIS TABLICA

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Tablica 1.</b>  | Podjela i značajke aluminijskih legura za gnječenje [7]   | 4  |
| <b>Tablica 2.</b>  | Označavanje glavnih skupina Al legura prema EN 573-1 [8, 24]  | 8  |
| <b>Tablica 3.</b>  | Normom [30] propisan kemijski sastav aluminijske legure EN AW-5083  | 11 |
| <b>Tablica 4.</b>  | Fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure EN AW-5083 pri 20 °C [28, 29, 32]   | 11 |
| <b>Tablica 5.</b>  | Usporedba različitih teorija mehanizma usitnjavanja zrna [46]   | 23 |
| <b>Tablica 6.</b>  | Prosječni sastav glavnih legirnih elemenata koji su funkcija udaljenosti od sredine ingota [52]   | 30 |
| <b>Tablica 7.</b>  | Najčešće pojavljivanje čestice pri povišenim temperaturama homogenizacije legura serije 5xxx [36]   | 33 |
| <b>Tablica 8.</b>  | Promjene u mikrostrukтури za vrijeme homogenizacije 5xxx legura [23]  | 33 |
| <b>Tablica 9.</b>  | Posebne upute za lijevanje aluminijskih blokova legure EN AW-5083   | 34 |
| <b>Tablica 10.</b> | Struktura uloška  | 36 |
| <b>Tablica 11.</b> | Dolegiranje taline aluminijske legure EN AW-5083  | 37 |
| <b>Tablica 12.</b> | Količine dodanog sredstva za usitnjavanje u obliku Al-Ti-B žice i Al-Ti-B polugica pri lijevanju legure EN AW-5083  | 39 |
| <b>Tablica 13.</b> | Karakteristike modifikatora AlTi5B1   | 40 |
| <b>Tablica 14.</b> | Parametri lijevanja legure EN AW-5083 kod duljine blokova od 200 mm   | 41 |
| <b>Tablica 15.</b> | Parametri lijevanja legure EN AW-5083 kod duljine blokova od 4000 mm  | 42 |
| <b>Tablica 16.</b> | Dimenzije ispitanih blokova   | 42 |
| <b>Tablica 17.</b> | Kemijski sastav talina ispitanih šarži aluminijske legure EN AW-5083 i normom propisan sastav [24]  | 43 |
| <b>Tablica 18.</b> | Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3157   | 47 |
| <b>Tablica 19.</b> | Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3158   | 48 |
| <b>Tablica 20.</b> | Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3159   | 49 |
| <b>Tablica 21.</b> | Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3160   | 50 |
| <b>Tablica 22.</b> | Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3162   | 51 |
| <b>Tablica 23.</b> | Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3163   | 52 |
| <b>Tablica 24.</b> | Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ sa svih ploča uzetih s početka i kraja 6 ispitivanih blokova  | 54 |
| <b>Tablica 25.</b> | Rezultati mjerenja broja zrna po jedinici ispitivane površine $N_A$ dobiveni poluautomatskom metodom određivanja veličine zrna mjerenjem srednje duljine presjecanja zrna za uzorke uzete s početka blokova aluminijske legure EN AW-5083 | 61 |
| <b>Tablica 26.</b> | Rezultati mjerenja veličine zrna $N_A$ dobiveni poluautomatskom metodom određivanja veličine zrna mjerenjem srednje duljine presjecanja zrna za uzorke uzete s kraja blokova aluminijske  | 62 |

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
|                    | legure EN AW-5083   |    |
| <b>Tablica 27.</b> | Rezultati mjerenja vlačne čvrstoće $R_m$ uzoraka uzetih s početka i s kraja ispitivanih blokova aluminijske legure EN AW-5083                               | 63 |
| <b>Tablica 28.</b> | Rezultati mjerenja granice proporcionalnosti $R_{p0.2}$ uzoraka uzetih s početka i s kraja ispitivanih blokova aluminijske legure EN AW-5083                | 64 |
| <b>Tablica 29.</b> | Rezultati mjerenje izduženja $A_{50}$ , uzoraka uzetih s početka i s kraja ispitivanih blokova aluminijske legure EN AW-5083                                | 65 |
| <b>Tablica 30.</b> | Analiza varijance latinskog kvadrata za broj zrna $N_A$ - početak blokova   | 70 |
| <b>Tablica 31.</b> | Analiza varijance latinskog kvadrata za broj zrna $N_A$ - kraj blokova  | 71 |
| <b>Tablica 32.</b> | Koeficijenti korelacije za broj zrna $r_s(N_A)$ , između ploča uzetih s početka i kraja ispitivanih blokova za svaku pojedinačnu šaržu                      | 71 |
| <b>Tablica 33.</b> | Analiza varijance latinskog kvadrata za vlačnu čvrstoću $R_m$ - početak blokova   | 73 |
| <b>Tablica 34.</b> | Analiza varijance latinskog kvadrata za vlačnu čvrstoću $R_m$ - kraj blokova  | 73 |
| <b>Tablica 35.</b> | Koeficijenti korelacije za vlačnu čvrstoću $r_s(R_m)$ , između ploča uzetih s početka i kraja ispitivanih blokova za svaku pojedinačnu šaržu                | 74 |
| <b>Tablica 36.</b> | Analiza varijance latinskog kvadrata za granicu proporcionalnosti $R_{p0.2}$ - početak blokova  | 75 |
| <b>Tablica 37.</b> | Analiza varijance latinskog kvadrata za granicu proporcionalnosti $R_{p0.2}$ - kraj blokova   | 75 |
| <b>Tablica 38.</b> | Koeficijenti korelacije za granicu proporcionalnosti $r_s(R_{p0.2})$ , između ploča uzetih s početka i kraja ispitivanih blokova za svaku pojedinačnu šaržu | 76 |
| <b>Tablica 39.</b> | Analiza varijance latinskog kvadrata za izduženje $A_{50}$ - početak blokova  | 78 |
| <b>Tablica 40.</b> | Analiza varijance latinskog kvadrata za izduženje $A_{50}$ - kraj blokova   | 78 |
| <b>Tablica 41.</b> | Koeficijenti korelacije za izduženje $r_s(A_{50})$ , između ploča uzetih s početka i kraja ispitivanih blokova za svaku pojedinačnu šaržu                   | 78 |

# 1. UVOD

Aluminij je jedan od najrasprostranjenijih elemenata u Zemljinoj kori, gdje ga ima oko 7,5-8,1%. Smatra se najzastupljenijim metalom te se po ukupnoj rasprostranjenosti nalazi odmah iza kisika i silicija. To je metal koji se najviše koristi iza čelika. Reaktivan je na zraku te stvara tanki sloj oksida na površini [1]. Najčešće se pojavljuje u tlu s drugim elementima, rijetko kad je samorodan te se gotovo uopće ne pojavljuje u čistom obliku. Aluminij je postao glavni neželjezni metal koji se obrađuje i koristi, no samo korištenje ne seže tako daleko u prošlost. Prvi put se pojavljuje na svjetskoj izložbi u Parizu 1855. godine. Aluminijevi spojevi su stabilni te je potrebna velika količina energije i visoke temperature da bi se te komponente mogle reducirati do samog metala. To ujedno objašnjava zašto je aluminij kao element dosta bio izoliran te se počeo komercijalno proizvoditi tek u novijoj povijesti [2].

Kako aluminij ima velik afinitet prema kisiku, počeo se komercijalno proizvoditi tek krajem 19. stoljeća. Proizvodi se iz rude boksita koja se prerađuje u glinicu (aluminijev oksid) nakon čega se elektrolizom dobiva čisti aluminij. Aluminij i njegove legure se koriste prvenstveno zbog visoke električne i toplinske provodljivosti, male gustoće, dobre otpornosti prema koroziji, odličnih mehaničkih svojstava i mogućnosti recikliranja - aluminij je „zelen“ metal. Također je neotrovan i nemagnetičan. Korištenje i uloga su mu sveprisutni u suvremenom svijetu [1].

U moderno vrijeme postoje mnogobrojne aluminijske legure čija se svojstva mogu poboljšati s raznim legirnim elementima, poput magnezija, silicija ili bakra. U industriji se često mogu zahtijevati legure s iznimnim svojstvima otpornosti na koroziju pri običnoj ili morskoj atmosferi, velikom čvrstoćom i otpornosti na razne kemikalije. Moderna proizvodnja aluminijske i aluminijskih legura omogućila je proizvodnju takvih legura. Aluminijska legura EN AW-5083, legirana magnezijem i malom količinom mangana uvelike se koristi u brodogradnji, željeznici i sličnim područjima gdje se zahtijevaju gore navedena svojstva.

U okviru ovog diplomskog rada ispitivat će se aluminijski blokovi legure EN AW-5083 lijevani polukontinuiranim postupkom izravnog hlađenja (DC postupak). Cilj ovog rada je odrediti kako brzina hlađenja (ovisno o položaju uzorka u bloku) utječe na promjenu broja zrna po jedinici ispitivane površine i vlačna svojstva (vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i istežanje) lijevanih blokova. Statističkom analizom dobivenih rezultata pokušat će se odrediti homogenost blokova u cjelini.



## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. OPĆENITO O ALUMINIJU I ALUMINIJSKIM LEGURAMA

Aluminij, kao najrašireniji metalni element u Zemljinoj kori (oko 8%) je u razmjerno kratkom vremenu postao drugi metal po proizvodnji na svijetu, odmah iza čelika. Temperatura taljenja aluminija je 660 °C, temperatura vrenja 2519 °C, a gustoća  $2,7 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup> [1]. Mala gustoća zaslužna je za njegovu široku upotrebu u raznim industrijama. Mekan je i nema zadovoljavajuću čvrstoću za industriju, no može se legirati s raznim elementima u svrhu povećanja čvrstoće, ali i poboljšanja raznih drugih svojstava. Tako aluminijske legure postaju lagane i čvrste te se lako mogu oblikovati na razne načine u metalurškoj industriji: mogu se kovati, valjati, strojno obrađivati i oblikovati u razne gotove oblike [2].

Daljnja svojstva aluminija i njegovih legura uvelike doprinose sigurnosti proizvoda: otpornost na krhki lom u području niskih temperatura, mala osjetljivost na temperaturni gradijent i zaostala naprezanja te otpornost na udarno opterećenje, gdje se vidi pozitivan utjecaj brzine deformacije na čvrstoću i duktilnost. Moderne tehnologije su doprinijele razvitku legiranja aluminija te dobivanju još boljih svojstava [3]. Sva navedena svojstva doprinose tome da se aluminij može lijevati, plastično deformirati, strojno, toplinski i površinski obrađivati. Na svojstva gotovih proizvoda uvelike ovisi nalazi li se aluminij u čistom stanju ili je legiran, koji je sastav legure, na koji način i koliko se legura deformira i toplinski obrađuje. Svaki od navedenih parametara je podjednako važan za samu leguru i procjenu njene kvalitete.

Proizvodnja primarnog aluminija odvija se u dva odvojena visokoenergetska procesa u kojem se ruda (boksit) prevodi u čisti metal elektrolitičkom redukcijom. Prvi dio podrazumijeva Bayerov postupak u kojem se aluminijska ruda raščinjava pri visokim temperaturama i prevodi u glinicu. Drugi dio je Hall-Héroultov postupak gdje se elektrolizom taline glinice u rastaljenom kriolitu uz ugljične elektrode dobiva aluminij i on danas predstavlja jedini komercijalni postupak proizvodnje aluminija [1]. U 2017. godini proizvedeno je 63 404 000 tona aluminija, gdje se dnevno prosječno proizvodilo 173 700 tona. No, tako velika količina proizvedenog primarnog aluminija iznimno je energetska zahtjevan postupak - u 2017. godini na svjetskoj razini potrošilo se 14 151 kWh/t proizvedenog aluminija [4].

U Europi postoji više od 600 tvornica koje proizvode aluminij i njegove proizvode, s trendom rasta recikliranja istih. Kako trend proizvodnje aluminija raste u Europi i u Europskoj uniji, isti takav trend se primjećuje i na svjetskoj razini što je ujedno i potvrda da je aluminij metal budućnosti [5].

#### 2.1.1. PODJELA ALUMINIJSKIH LEGURA

Kako na svijetu postoji više od 500 različitih legura aluminija, potrebno ih je klasificirati unutar normi. U Europi i Europskoj uniji se koriste Europske norme (EN), a postavio ih je EEC (eng. *European Economic Community*) te se tako stvorio standardizirani

jezik na kontinentu. Kako je EN standard postao obavezan 1988. godine, sve europske zemlje su ga prihvatile i zamijenile nacionalne norme [6].

Najčešći legirni elementi s kojima se legira aluminij su bakar, cink, magnezij, silicij, mangan i litij. Dodaci poput kroma, titana, cirkonija, olova, bizmuta i nikla se dodaju u malim količinama za poboljšanje određenih svojstava, a željezo je gotovo uvijek prisutno u iznimno malim količinama [7]. Glavni kriteriji za podjelu aluminijskih legura su kemijski sastav, način prerade i izrade proizvoda te način, mogućnosti i rezultati toplinske obrade. Podjela po kemijskom sastavu obuhvaća tehnički čisti aluminij (99,00 - 99,80% Al), elektrolitički čisti aluminij (99,99% Al) i aluminijske legure. Aluminijske legure se temelje na tehnički čistom aluminiju ili pretaljenom aluminiju (koji se najčešće dobiva recikliranjem sekundarnog aluminijskog materijala) te je aluminij u takvom obliku najzastupljeniji. Po načinu prerade i izrade proizvoda postoje legure za lijevanje te legure za gnječenje. Podjela aluminijskih legura prema načinu, mogućnostima i rezultatima toplinske obrade dijeli legure na toplinski neočvrstive i toplinski očvrstive legure [8, 9].

### Legure za lijevanje

Po definiciji, legure za lijevanje su namijenjene lijevanju poluproizvoda i gotovih proizvoda, pogotovo onih proizvoda koji imaju kompleksne geometrije. Ova vrsta legura je jako raširena te ima široku primjenu u modernim industrijama. Vodeći se različitim procjenama, 20-30% od svih aluminijskih proizvoda proizvedenih u svijetu koristi se za lijevanje konačnih proizvoda. Specifičnost kod legura za lijevanje je visok udio recikliranog (sekundarnog) aluminijskog materijala. SAD, Zapadna Europa i Japan koriste 75 - 80% sekundarnog aluminijskog materijala od ukupne mase materijala za lijevanje prilikom lijevanja novog proizvoda, što je nekoliko puta više nego udio sekundarnog aluminijskog materijala kod legura za gnječenje [10].

Prednosti legura za lijevanje su nisko talište, dobra tečljivost gotovo svih legura, dobra kontrola veličine i strukture zrna, odlična površina proizvoda nakon lijevanja, niska topljivost plinova (osim vodika) te mogućnost očvršćivanja toplinskom obradom (precipitacijsko očvršćivanje). Nedostaci legura za lijevanje su visoka sklonost stezanju materijala (4 - 8%) i sklonost poroznosti koja se pojavljuje pri stezanju, visoka topljivost vodika, sklonost toplim pukotinama te niska žilavost. Mogući su razni načini lijevanja ove vrste legura, a neki od najčešćih su: kontinuirano lijevanje, lijevanje u pijesak ili kokile, niskotlačno lijevanje u kokile, visokotlačno lijevanje u trajne kalupe i centrifugalno lijevanje. Najčešće skupine legura za lijevanje su AlCu, AlMg, AlSi i AlZn [11].

### Legure za gnječenje

Ova vrsta legura namijenjena je obradi plastičnom deformacijom, poput toplog ili hladnog valjanja, istiskivanja ili kovanja koje slijedi najčešće nakon lijevanja polukontinuiranim postupkom izravnog hlađenja vodom (eng. *Direct Chill Casting*) u blokove (ili neke druge vrste poluproizvoda) ili kontinuiranim postupkom u trake [12]. Neke od glavnih grupa legura za gnječenje su AlMg, AlMgSi, AlZnMg, AlCuMg i AlMn [9, 13].

## 2.1.2. ALUMINIJSKE LEGURE ZA GNJEČENJE

Glavna podjela aluminijskih legura za gnječenje zasniva se na kemijskom sastavu i mogućnosti očvršćivanja precipitacijom, tablica 1 [7].

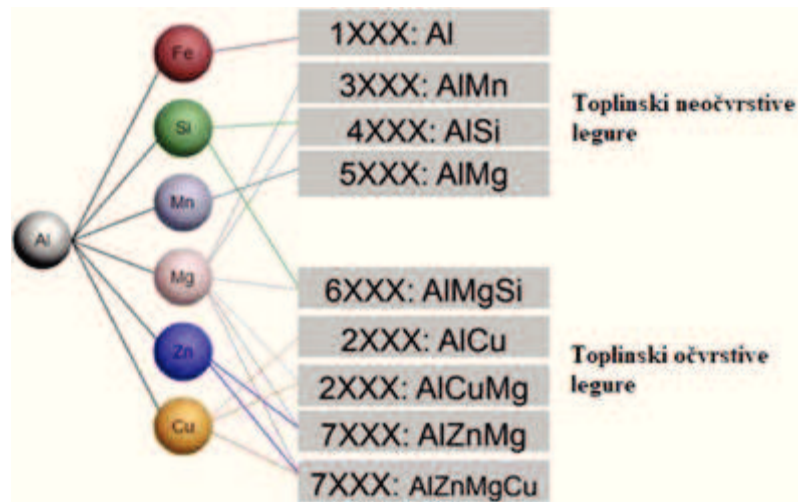
Tablica 1. Podjela i značajke aluminijskih legura za gnječenje [7]

| Vrsta legure | Način očvršćivanja   | Vlačna čvrstoća $R_m$ [MPa] |
|--------------|----------------------|-----------------------------|
| AlMn         | hladnom deformacijom | 200-350                     |
| AlMg         |                      |                             |
| AlMgMn       |                      |                             |
| AlMgSi       | precipitacijom       | ~330                        |
| AlCuMg       |                      | ~450                        |
| AlZnMg       |                      | ~400                        |
| AlZnMgCu     |                      | ~550                        |
| AlLiCuMg     |                      | ~500                        |

**Očvršćivanje hladnom deformacijom** (eng. *work hardening, strain hardening, deformation hardening*) je fenomen gdje se čvrstoća materijala povećava tijekom hladne plastične deformacije. Ono je snažno povezano s interakcijama između pojedinačnih dislokacija i između dislokacija i prepreka unutar materijala, tj. očvršćivanje hladnom deformacijom ovisi o mikrostrukturi materijala [14]. Materijali koji su podvrgnuti očvršćivanju hladnom deformacijom mogu se dovesti do žilavog stanja žarenjem [15]. Legure koje očvršćivaju na ovakav način moraju imati dovoljnu čvrstoću u hladnom stanju te dobru korozivnu postojanost. Nedostatak ovih legura je nemogućnost naknadnog mijenjanja mehaničkih svojstava, osim već navedenim žarenjem [8].

**Očvršćivanje precipitacijom** (eng. *precipitation hardening*) je jedan od najšire korištenih mehanizama za očvršćivanje metalnih legura. Da bi legura očvrstnula na ovaj način, mikrostruktura se mora sastojati od krute otopine u kojoj se smanjuje topljivost krutih tvari sa smanjenjem temperature. Čvrstoća i tvrdoća nekih legura može se povećati formiranjem intermetalnih spojeva koji su jednako raspoređeni u obliku sekundarnih faza, u malim količinama u metalnom matriksu. Precipitacijske čestice služe kao prepreke dislokacijama i njihovom kretanju te tako legura očvršćuje [16]. Aluminijske legure koje očvršćivaju na ovakav način su AlCu, AlMgSi, AlCuMg i AlZn [17].

Slika 1 prikazuje podjelu aluminijskih legura za gnječene prema mogućnostima očvršćivanja toplinskom obradom [12]. Toplinski neočvrstive legure ustvari očvršćivaju deformiranjem u hladnom stanju, a toplinski očvrstive legure očvršćivaju precipitacijom [8, 9].



**Slika 1. Podjela aluminijских legura za gnječenje ovisno prema mogućnostima očvršćivanja toplinskom obradom [12]**

Svaka aluminijска legura za gnječenje ima određeno stanje koje govori o njenom metalurškom stanju [8]. Norma koja to propisuje je EN 515 [18]. Koriste se slova F, O, H, T ili W, a upućuju na osnovnu obradu, odnosno stanje legure. Iza njih slijedi broјčana oznaka do tri znamenke, ovisno o vrsti legure [19].

Sufiks **F** (eng. *as fabricated*) primjenjuje se na proizvodima dobivenim plastičnom deformacijom. Nakon te oznake nema broјčanih simbola. Sufiks **O** (eng. *annealed*) označava meko žareno stanje. Iza oznake može ići još samo jedna broјčana oznaka. Sufiks **H** se referira na materijale očvrstnute hladnom plastičnom deformacijom na kojima se može provesti žarenje. Primjenjuje se za skupine legura *1xxx*, *3xxx*, *4xxx* i *5xxx*. Sufiks **W** (eng. *solution heat treated*) označava toplinski obrađeno labilno stanje (rastopno žarenje). Koristi se samo kod legura koje nakon žarenja spontano otvrdnjavaju pri sobnoj temperaturi. Sufiks **T** predstavlja toplinsku obradu te se pomoću nje dobivaju svojstva koja su drugačija od onih dobivenih postupcima navedenim pod oznakama F, O ili H. Označava toplinski očvrstnuto stanje postignuto toplinskom obradom i nalazi primjenu samo kod toplinski očvrstivih legura aluminija, poput skupina *2xxx*, *6xxx* i *7xxx*. Oznaku slijede jedan ili više brojeva koji označavaju specifičan redoslijed različitih postupaka koji metaluršku leguru dovode u željeno stanje. Ta stanja redom idu od T1 do T7 [8, 19].

**Toplinski neočvrstive legure** ne mogu povećati čvrstoću toplinskom obradom. Inicijalna čvrstoća tih legura određena je legirnim elementima (mangan, silicij i magnezij), a serije legura koje pripadaju u ovu skupinu su *1xxx*, *3xxx*, *4xxx* i *5xxx*. Dodatno očvršćivanje može se postići hladnom deformacijom. Legure iz ove skupine su duktilne i umjereno čvrste, ovisno o udjelu legirnih elemenata, a dolaze u stanju pod oznakom **O** ili **H**.

**Toplinski očvrstive legure** mogu očvrstnuti toplinskom obradom. Inicijalna čvrstoća tih legura određena je legirnim elementima (bakar, silicij, magnezij i cink) te su to legure iz serija *2xxx*, *6xxx* i *7xxx*. Pošto topljivost tih legirnih elemenata (ili intermetalnih spojeva koji se formiraju s tim elementima) u krutom aluminiju ovisi o temperaturi, moguće je očvrstnuti legure iz ove skupine pomoću precipitacijskog očvršćivanja [20].

### 2.1.2.1. UTJECAJ LEGIRNIH I PRATEĆIH ELEMENATA NA ALUMINIJSKE LEGURE ZA GNJEČENJE

Legirni elementi koji se dodaju aluminijskim legurama mogu utjecati na fizikalna svojstva, poput gustoće, temperaturnog intervala taljenja, sadržaja topline, električne i toplinske vodljivosti. Ovisno o tome koji se element dodaje te smatra li se on legirnim elementom ili nečistoćom promatramo dobivena svojstva kao pozitivna ili negativna. Ako se toplinskom obradom legirni elementi mogu otopiti ili precipitirati, može doći i do promjene svojstava ovisno o stanju.

Aluminij je, kako je već navedeno, termodinamički reaktivan metal, no ima odličnu otpornost na koroziju - stvara se zaštitni sloj aluminijevog oksida koji je snažno vezan za površinu metala te se prilikom eventualnog oštećenja odmah počinje obnavljati. Elektrokemijska svojstva i otpornost na koroziju iznimno jako ovise o legirnim elementima koji stvaraju krute otopine, faze ili oboje. Gdje postoji mogućnost promjene u topljivosti krute faze s temperaturom, svojstva se mogu značajno mijenjati načinom toplinske obrade [8, 21].

Svaki od legirnih elemenata može postati nečistoća, ako se doda u količinama većim od dozvoljenih granica koje su propisane za dobivanje željenog proizvoda. Može se dogoditi situacija da neki elementi kompleksno reagiraju s drugim elementima i negativno utječu na sastav i svojstva taline, u toj mjeri da mogu dovesti do nastanka škarta cijelih šarži, a u konačnici i željenog proizvoda [8].

Jedan dio aluminiija se također proizvodi i recikliranjem, odnosno iz otpada (sekundarni aluminij). Udio sekundarnog aluminiija je poglavito važan u proizvodnji primarnog aluminiija jer su velike energetske razlike u proizvodnji istih: 51,7 kWh/kg se troši u primarnoj proizvodnji, a 2,8 - 5,6 kWh/kg u sekundarnoj proizvodnji. No, samo recikliranje dolazi s nekim nedostacima, a to su već unaprijed dobivene legure s legirnim elementima koji mogu biti štetni pri proizvodnji primarnog aluminiija. Stoga je važno sortiranje sekundarnog aluminiija, maksimalno poznavanje kemijskog sastava otpada koji dolazi te što veće iskorištenje istoga [22].

U nastavku su dani elementi koji se najčešće dodaju legurama za gnječenje u obliku legirnih elemenata ili se mogu smatrati nečistoćama:

#### Željezo

- najčešći legirni element, gotovo je uvijek prisutan kod aluminijskih legura;
- njegova topljivost u tekućem aluminiju je visoka, u talini aluminija se otapa i njegova koncentracija brzo raste;
- topljivost u krutom aluminiju je vrlo niska [12], približno ~0,05% i iznad tog sadržaja željezo stvara grube intermetalne spojeve [8, 23];
- njegovi spojevi pomažu prilikom usitnjavanja zrna tijekom valjanja i međuzarenja materijala [12].

#### Mangan

- poboljšava čvrstoću i ako je prisutan kao kruta otopina i kao intermetalni disperzoid;
- pomaže prilikom usitnjavanja zrna;
- njegovi disperzoidi sprječavaju rast zrna te povećavaju temperaturu rekristalizacije;
- promovira nastajanje vlaknaste strukture prilikom tople prerade;

- koristi se za modificiranje morfologije intermetalnih spojeva na bazi željeza koji imaju tendenciju povećanja krhkosti [8, 12, 23].

#### Silicij

- nakon željeza je druga najzastupljenija nečistoća u aluminiju;
- kod gnječivih legura koristi se u kombinaciji s magnezijem do 1,5% da se dobije  $Mg_2Si$  faza u seriji 6xxx [8, 23].

#### Kalcij

- povećava topljivost vodika u tekućem aluminiju do 10 ppm;
- promovira tople pukotine;
- povećava specifičnu električnu provodljivost i utječe na rekristalizacijsko ponašanje.

#### Skandij

- pomaže prilikom kontrole veličine zrna.

#### Titan

- u komercijalnim aluminijским legurama prisutan je u količinama 10 - 100 ppm;
- smanjuje električnu provodljivost;
- koristi se za modificiranje veličine zrna i pomaže da ne nastaju pukotine prilikom skrućivanja;
- jedino u kombinaciji s borom njegove prednosti mogu doći do izražaja [12], bor već može biti prisutan u talini [8, 23].

#### Bor

- pomaže prilikom usitnjavanja zrna u dodatku 0,005 – 0,1%;
- veća efikasnost je kad se dodaje s titanom, komercijalni usitnjavači zrna imaju omjer Ti:B u iznosu 5:1;
- formira stabilne boride s prijelaznim elementima (V, Ti, Cr i Mo).

#### Krom

- pomaže prilikom usitnjavanja zrna;
- nakon anodizacije daje žutu boju aluminiju;
- smanjuje provodljivost, povećava čvrstoću i tvrdoću;
- poboljšava otpor na interkristalnu koroziju.

#### Vanadij

- koristi se za usitnjavanje zrna;
- smanjuje električnu provodljivost;
- povećava temperaturu rekristalizacije.

#### Cirkonij

- dodaje se u količini 0,1 - 0,3% u seriji 7xxx;
- formira vrlo fine disperzoide i pomaže prilikom kontrole veličine zrna, ima efekt oporavka i rekristalizacijske reakcije.

#### Kositar

- ako se doda u količini do 0,1%, nakon žarenja može doći do tamnjenja površine;
- ima negativan utjecaj, povećava sklonost koroziji prilikom segregacije na površini.

### Antimon

- dodaje se AlMg legurama u malim količinama od 0,01 - 0,1 ppm;
- poboljšava otpornost na koroziju u slanoj vodi gdje stvara zaštitni Sb-oksikloridni film na površini;
- može se koristiti umjesto bizmuta da se izbjegnu tople pukotine kod AlMg legura.

### Berilij

- iznimno štetan i otrovan element ako se pojavljuje u foliji namijenjenoj kontaktu s hranom i pićima.

### Bizmut

- dodaje se AlMg legurama u količinama 20 - 200 ppm da se spriječe tople pukotine uzrokovane natrijem [12].

## 2.1.2.2. KLASIFIKACIJA ALUMINIJSKIH LEGURA ZA GNJEČENJE

Aluminijske legure za gnječenje označavaju se prema normama EN 573-1 i EN 573-2 [24, 25]. Norme su namijenjene tome da se već iz same oznake, tablica 2, može zaključiti o kojoj se leguri radi i kakvo je njeno metalurško stanje [8, 18, 24]. Označavanje se sastoji od:

- prefiksa EN iza kojeg je prazno mjesto,
- slova AW (eng. *A* - *aluminum*, *W* - *wrought*),
- crtice,
- četveroznamenaste oznake - označava kemijski sastav legure,
- dodatnog slova na kraju koje predstavlja metalurško stanje legure [8, 13, 18].

**Tablica 2. Označavanje glavnih skupina Al legura prema EN 573-1 [8, 24]**

| Glavni legirni element          | Brojčana oznaka | Kemijski simbol |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Aluminij, ≥ 99,00%</b>       | EN AW-1xxx      | EN AW Al        |
| <b>Bakar</b>                    | EN AW-2xxx      | EN AW AlCu      |
| <b>Mangan</b>                   | EN AW-3xxx      | EN AW AlMn      |
| <b>Silicij</b>                  | EN AW-4xxx      | EN AW AlSi      |
| <b>Magnezij</b>                 | EN AW-5xxx      | EN AW AlMg      |
| <b>Magnezij i silicij</b>       | EN AW-6xxx      | EN AW AlMgSi    |
| <b>Cink</b>                     | EN AW-7xxx      | EN AW AlZn      |
| <b>Ostali elementi (Fe, Si)</b> | EN AW-8xxx      | EN AW AlFe      |
| <b>Neupotrijebljene grupe</b>   | EN AW-9xxx      | EN AW Alxx      |

Drugi broj predstavlja modifikacije na leguri (kontrola od strane proizvođača) ili granicu nečistoća, odnosno čistoću aluminija. Broj „0“ predstavlja da nema kontrole, a brojevi od „1“ do „9“ označavaju različite razine kontrole nečistoća ili legirnih elemenata u tvornici. Zadnja dva broja kod svih skupina legura predstavljaju najčešće serijski broj, osim kod serije 1xxx gdje označavaju postotak aluminija iznad 99,00% [8].

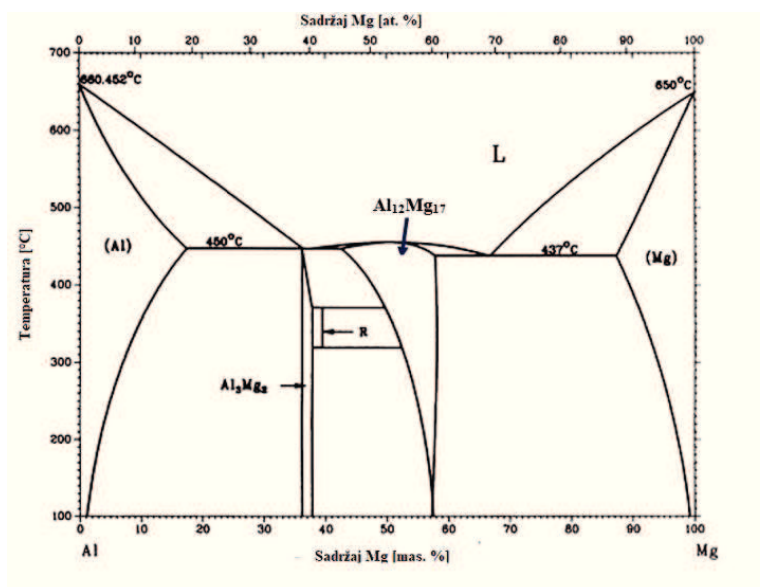
### 2.1.3. SERIJA 5XXX ALUMINIJSKIH LEGURA ZA GNJEČENJE

Glavni legirni element serije 5xxx aluminijskih legura za gnječenje je magnezij gdje je njegova maksimalna topljivost u aluminiju 17,4%, no u komercijalnim legurama taj postotak ne prelazi 5,5%. Slika 2 prikazuje glavne legirne elemente u ovoj seriji legura [12].

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| H  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | He |
| Li | Be |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | B  | C  | N  | O  | F  | Ar |
| Na | Mg |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Al | Si | P  | S  | Cl | Ne |
| K  | Ca | Sc | Ti | V  | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y  | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I  | Xe |
| Cs | Ba | ** | Hf | Ta | W  | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |

Slika 2. Glavni legirni elementi kod serije 5xxx [12]

Ova serija legura je generalno čvršća nego legure serije 3xxx i dobro su obradive. Pokazuju iznimnu korozivnu otpornost, pogotovo u uvjetima morske atmosfere i u tom pogledu su superiorne spram ostalih serija legura. No, pri udjelu magnezija > 3%, legure postaju podložne interkristalnoj koroziji pri višim temperaturama [12, 23]. Slika 3 prikazuje binarni fazni dijagram Al-Mg [12].

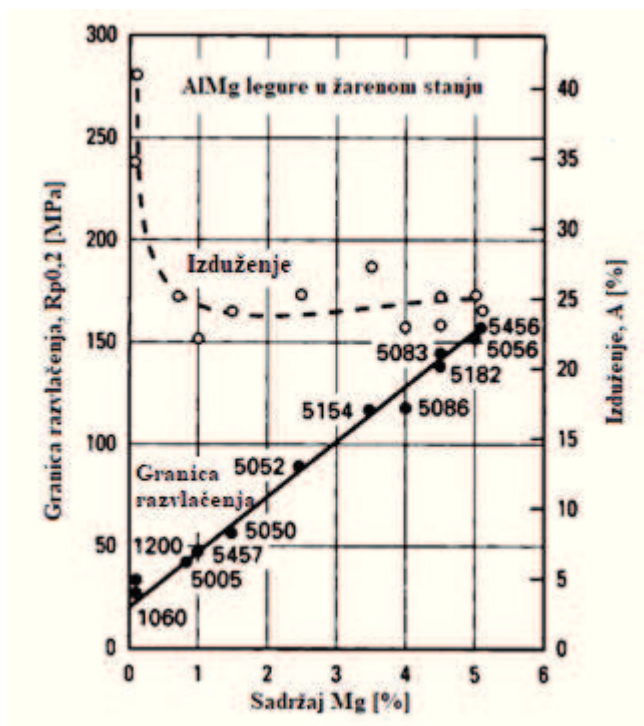


Slika 3. Binarni fazni dijagram Al-Mg [26]

Slika 3 prikazuje ravnotežne krute faze u binarnom Al-Mg dijagramu: dvije krute otopine ( $\alpha$ -faza (Al) i  $\delta$ -faza (Mg)) i tri intermetalne faze ( $\beta$ -faza ( $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ), spoj R i  $\gamma$ -faza ( $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ )) [24]. Iz binarnog dijagrama može se očitati niz karakterističnih točaka.  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  je karakteristična intermetalna faza koja nastaje pri oko 38,5 at.% Mg. No, legure iz serije 5xxx su sklone koroziji uvjetovanoj naprežanjem (interkristalna korozija) te može doći do pucanja prilikom izlaganja toplini. To je posljedica formiranja navedene  $\beta$ -faze po granicama zrna. Navedena faza nije poželjna zato što je iznimno tvrda i nije pogodna za oblikovanje deformiranjem. No, legure s 38,5 at.% Mg imaju vrlo nisku temperaturu skrućivanja kod 450 °C i ne mogu se upotrijebiti kao legure za lijevanje jer eutektik sadrži 80% tvrde i krhke  $\beta$ -faze. Stoga se najčešće koriste AlMg legure s područjem ispod 18% Mg [8, 27]. S većim



udjelom magnezija opada sposobnost oblikovanja ovih legura, no poboljšavaju se mehanička svojstva. Slika 4 pokazuje utjecaj sadržaja magnezija na mehanička svojstva [8, 23, 27].



**Slika 4. Utjecaj Mg na mehanička svojstva nekih legura serije 5xxx [23]**

Osim magnezija, serija 5xxx se još može legirati s kromom, manganom, titanom, vanadijem, berilijem i galijem. To su toplinski neočvrstive legure koje očvršćuju hladnom deformacijom. Učinkovitost očvršćivanja hladnom deformacijom povećava se s višim udjelom magnezija. Raspon viših temperatura pri kojima se radi s ovom serijom je 260 - 510 °C. Legure ove serije imaju srednje do visoka mehanička svojstva s relativno visokom žilavošću u zarenom stanju (do 25%) te su dobro zavarljive [28]. Dodatak magnezija znatno povećava čvrstoću aluminijske legure bez nepotrebnog smanjenja duktilnosti [23].

Navedena serija legura najčešće se koristi za proizvodnju folija s visokom čvrstoćom, kontejnere, spremnike za goriva, spremnike za tekućine, konstrukcije za brodogradnju, u arhitekturi i automobilskoj i željezničkoj industriji [28, 29].

### Aluminijska legura EN AW-5083

Legura EN AW-5083, kemijskog simbola EN AW-AlMg4,5Mn0,7 [30] je teško gnječiva, toplinski neočvrstiva legura aluminijska s magnezijem [29, 30], a uvelike se koristi za konstrukcije, u automobilskoj industriji, brodogradnji i za ambalažu zbog svojih višestrukih prednosti: dobra žilavost, strojna obradljivost, zavarljivost, čvrstoća i otpornost na koroziju. To je legura koja pripada seriji 5xxx i glavni legirni element joj je magnezij (prosječni udio 4 - 5%) te s relativno visokim udjelom mangana (0,4 - 1,0%) [30]. Norma EN 573-3 određuje kemijski sastav navedene legure koji je prikazan u tablici 3 [30].

**Tablica 3. Normom [30] propisan kemijski sastav aluminijske legure EN AW-5083**

| Si    | Fe    | Cu    | Mn        | Mg      | Cr        | Zn    | Ti    | ostali elementi |        | Al      |
|-------|-------|-------|-----------|---------|-----------|-------|-------|-----------------|--------|---------|
|       |       |       |           |         |           |       |       | pojedini        | ukupno |         |
| <0,40 | <0,40 | <0,10 | 0,40-1,00 | 4,0-4,9 | 0,05-0,25 | <0,25 | <0,15 | <0,05           | <0,15  | ostatak |

Željezo i silicij predstavljaju glavne nečistoće u leguri EN AW-5083. Kod aluminijskih legura željezo se uglavnom kombinira s drugim elementima da bi se formirali željezom bogati intermetalni spojevi tijekom skrućivanja. Kod EN AW-5083 legure, željezo u kombinaciji s manganom formira grubu intermetalnu fazu  $Al_6(Fe,Mn)$  te se smatra da je ta faza najviše zaslužna za smanjena vlačna svojstva legure zbog svojih krhkih svojstava te nakupina naprezanja u obliku iglica. Zbog toga se željezo mora držati pri vrlo niskim udjelima, čak ispod 0,15%, da se izbjegne stvaranje željeznih intermetalnih faza. Poželjni su što manji udjeli željeza i silicija, no to implicira manje korištenje sekundarnog aluminija, a samim time se povećavaju troškovi proizvodnje. Zbog toga se u talinu dodaje mangan da modificira željezom bogate intermetalne faze, no velik udio mangana u talini smanjuje mehanička svojstva legure [31]. U tablici 4 dana su fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure EN AW-5083 [28, 29, 32].

**Tablica 4. Fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure EN AW-5083 pri 20 °C [28, 29, 32]**

| Svojstvo                                  | Vrijednost                                       |
|---|--|
| gustoća                                   | $2,66 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$                 |
| raspon taljenja                           | 575 - 638 °C                                     |
| modul elastičnosti                        | 71 GPa   |
| toplinsko širenje (20 °C)                 | $23,8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ |
| specifični toplinski kapacitet            | 900 J/(kgK)                                      |
| toplinska provodljivost                   | 117 W/(mK)                                       |
| električni otpor                          | $5,98 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m}$     |
| vlačna čvrstoća (žareno stanje)           | 290 MPa  |
| granica proporcionalnosti (žareno stanje) | 110 MPa  |
| izduženje (žareno stanje)                 | 22%  |
| tvrdoća (žareno stanje)                   | 77 HB  |
| temperatura žarenja                       | 343 °C   |

Jedno od svojstava aluminijskih legura iz serije 5xxx je da mogu biti izložene niskim temperaturama bez da to utječe na njihovu strukturu. To povećava kriogeno korištenje aluminija, npr. u tankovima za prenošenje metana. Te legure se također koriste za konstrukciju brodova koji istražuju polarna podneblja. Duže držanje legure pri niskim temperaturama ne utječe na promjenu mehaničkih svojstava, niti nakon što se legura vrati na sobnu temperaturu [33].

Važno je napomenuti da kemijski sastav ima velik utjecaj na fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure EN AW-5083, gdje se vlačna svojstva legure smanjuju kako se udjeli Fe i Si elemenata u leguri povećavaju (glavne nečistoće). Prema istraživanju Liu *et al.* [31] aluminijske legure EN AW-5083, no s drugačijim kemijskim sastavom Al-5Mg-0.8Mn, uočeno je da vlačna čvrstoća i izduženje nemaju toliki pad vrijednosti s povećanim udjelima Fe i Si te legura još uvijek može zadovoljiti standardizirana mehanička svojstva. Fe i Si imaju

efekt usitnjavanja intermetalnih faza, s tim da se legura kontinuirano lijevala u trake, s brzim hlađenjem [31].

Zbog svojih iznimnih svojstava pri kriogenim temperaturama, aluminijska legura EN AW-5083 je pogodna za korištenje u polarnim predjelima, ali i pri građenju mostova, morskih konstrukcija, opreme za kemijsku proizvodnju te za spremanje i transport kriogenih fluida. EN AW-5083 u „O“ stanju – meko žareno stanje, koristi se za konstrukciju velikih sferičnih spremnika za preoceanski transport prirodnog plina pri temperaturama -116,2 °C. Zbog dobrih mehaničkih svojstava pri niskim temperaturama EN AW-5083 legura zadovoljava prohtjeve gradnje spremnika za prirodni plin [34]. Tipičan sferičan spremnik za transport prirodnog plina ima promjer 38,1 m te debljinu lima 20,32 cm u horizontalnom promjeru, gdje su limovi međusobno zavareni [35]. Sličnu upotrebu kao legura EN AW-5083 imaju legure iz iste serije, poput EN AW-5754 i EN AW-5182 koje se koriste u automobilskoj industriji za vanjsku konstrukciju automobila, jer su zahtjevi također visoka čvrstoća i otpornost na koroziju, dok se legura EN AW-5754 koristi i za unutarnju građu automobila [12].

Dobar primjer korištenja legura iz serije 5xxx je Foresmo most u sjevernoj Norveškoj, gdje su se te legure koristile za nosače u nastojanjima da se aluminij implementira u gradnju mostova. Legure iz serije 5xxx su pogodne jer se jednostavnije i brže prenose na odredišno mjesto, slažu se još u tvornici, a ne na mjestu rada te ne ometaju okolni promet [35].

## **2.2. TEHNOLOGIJA LIJEVANJA**

Tri su osnovne grupe procesa industrijskog lijevanja aluminija: lijevanje blokova za pretalijvanje; lijevanje blokova, trupaca, šipki i traka za daljnju preradu deformiranjem postupcima istiskivanja, kovanja, valjanja i drugih te lijevanje različitim procesima u oblike prikladne za konačnu upotrebu bez daljnje deformacije. Taliti se mogu dvije vrste sirovina: primarni i sekundarni aluminij. Primarni metal može se lijevati direktno iz lonca ili se može legirati u peći za držanje, a zatim ide na lijevanje na liniji za lijevanje blokova [36].

### **2.2.1. TEHNOLOGIJA LIJEVANJA ALUMINIJSKIH BLOKOVA POSTUPKOM IZRAVNOG HLAĐENJA VODOM**

Tehnologija lijevanja aluminijskih blokova postupkom izravnog hlađenja vodom ili DC postupak (eng. *Direct Chill Casting*) je postupak koji je najbolje pokazao kako se inženjerska genijalnost uvijek podudarala sa zahtjevima industrije i suočavala s izazovima novih materijala i proizvoda. DC postupak je relativno nova tehnologija lijevanja aluminija koja se ubrzano razvija. Postupak je izumljen još 1938., no ubrzani razvoj za vrijeme Drugog svjetskog rata koji je zahtijevao veće blokove za vojnu industriju je pogodovao tome da ova tehnologija postane komercijalan postupak za proizvodnju blokova neželjeznih metala koji idu na daljnju obradu.

DC postupak je polukontinuirani postupak lijevanja u kojem vodom hlađena kokila inicira prvi dio skrućivanja metala. Koristi se za lijevanje aluminijskih blokova namijenjenih valjanju te cilindričnih trupaca namijenjenih istiskivanju i kovanju. Prosječna veličina trupaca za istiskivanje je 200 mm u promjeru, a blokovi za valjanje imaju dimenzije 1500 x 500 mm.

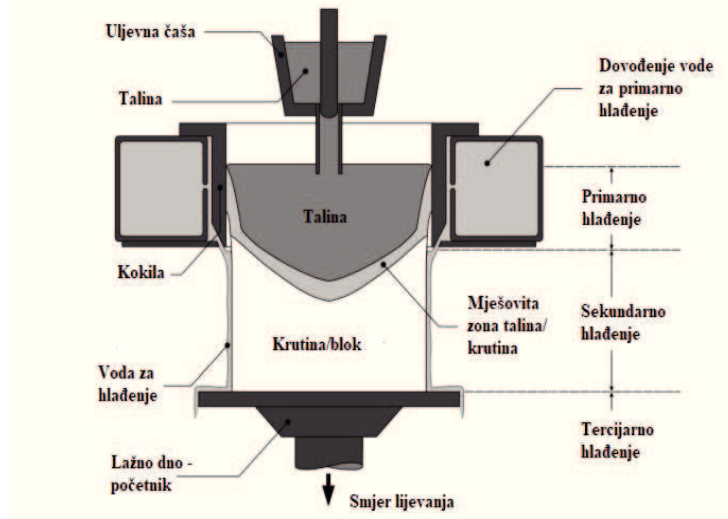
Razlikuju se vertikalno DC lijevanje (VDC) i horizontalno DC lijevanje (HDC). U Europi prevladava VDC postupak kojim se lijeva velik broj legura poluproizvoda različitih veličina, u manjim šaržama. VDC postupak još se naziva i bezdano lijevanje. Odvija se gravitacijski prema dolje u jamu.

Legure za gnječenje se mogu lijevati u nekoliko tipova poluproizvoda, poput trupaca, blokova te raznih profila i oblika za kovanje. Postupak je sličan kontinuiranom lijevanju, no za razliku od njega „žila“ se ne nastavlja beskonačno, nego se prekida kad se dobije odgovarajuća duljina bloka [36 - 38].

Podaci iz 2012. prema Kopeliovichu [37] ukazuju da se više od 40 milijuna tona aluminijske legure lijevalo DC postupkom. Ovakav način lijevanja direktno utječe na mehanička, fizikalna i kemijska svojstva materijala te na samu produktivnost konačnog proizvoda pa im je glavna primjena za proizvodnju prijevoznih sredstava, u zgradama te raznim drugim branšama. Za vrijeme DC postupka potrebno je kontrolirati kvalitetu lijevanja, istovremeno smanjiti troškove i povećati proizvodnju sa što manjim negativnim utjecajem na okoliš i visokom razinom sigurnosti [37].

### **2.2.2. POLUKONTINUIRANI VERTIKALNI POSTUPAK LIJEVANJA IZRAVNIM HLAĐENJEM (VDC)**

U vertikalnom DC postupku dimenzije kokile odgovaraju poprečnom presjeku blokova koji će se lijevati. Prije početka lijevanja diže se lažno dno u svaku kokilu koja se sa svake strane hladi vodom iz mlaznica koje su ugrađene u donji rub kokile. Nakon što se to napravi, kreće postupak lijevanja. Tekući metal teče iz lijevačke peći u uljevnu čašu te dolazi u prostor između kokile i lažnog dna. Lažno dno se nalazi u produžetku kokile, a čim nivo tekućeg metala u kokili dostigne zadanu razinu, lažno dno se počinje polako i jednolično spuštati, povlačeći za sobom metal koji se počinje lagano skrućivati. Isto tako voda više ne prska lažno dno već direktno na tanku koru bloka koja je nastala u doticaju taline s kokilom. To je učinkovit način odvođenja topline skrućivanja. Tri su stupnja hlađenja - primarno, sekundarno i tercijarno. Konstantno se održava nivo taline u kokili, a istovremeno se lažno dno nastavlja spuštati. Hidraulika omogućava bloku koji se skrućuje da se ujednačeno spusti u lijevački bazen do pune dužine. Kad blok postigne željenu dužinu, lijevanje se prekida što predstavlja glavnu razliku između ovog i kontinuiranog načina lijevanja [8, 38]. Shematski prikaz VDC postupka dan je na slici 5 [38].

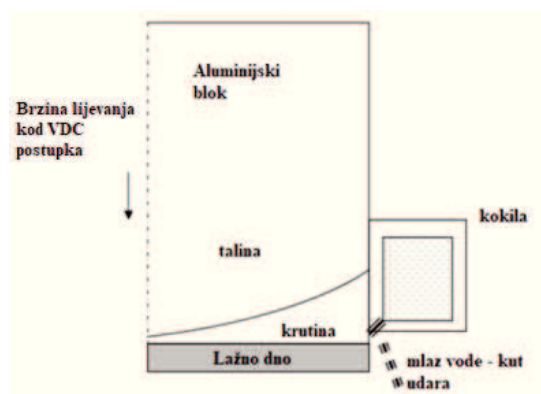


**Slika 5. Shematski prikaz VDC postupka [38]**

Stupnjevi hlađenja u bloku

Primarno hlađenje vodom formira tanku koru na metalu koja je posljedica odvođenja topline. Hlađenjem se formira tanka kora na metalu, no unutarnja jezgra je još uvijek polukruta/tekuća. Primarno hlađenje ovisi o vremenu, tj. visini taline koja se nalazi unutar kokile te se formiraju dva različita područja: područje izravne veze metal/kokila i područje ponovnog zagrijavanja tekuće jezgre metala uzrokovano zračnim zazorom. Na početku metal direktno dodiruje stijenke kokile te je brzina prijenosa topline iznimno visoka. Na kraju tog procesa formira se značajan prazni međuprostor - zračni zazor, između metala i kokile te se skrtnuta kora odvaja od stijenke kokile. Kod VDC postupka zračni zazor se kod primarnog hlađenja stvara oko cijelog obujma kokile. Stvaranjem zračnog zazora prijenos topline kroz kokilu se počinje naglo smanjivati i tekuća jezgra se dalje može zagrijavati. Primarnim se hlađenjem odvodi oko 20% topline.

Sekundarnim hlađenjem se temperatura spušta ispod solidusa te se tako odvodi 95% topline, a voda se prska direktno na krutu koru. Sekundarno hlađenje počinje spuštanjem bloka ispod dna kokile te se posljedično jako malo topline odvede preko stijenki kokile. Kod sekundarnog hlađenja mlaz vode je direktno usmjeren na skrtnutu koru, slika 6, gdje voda izlazi iz mlaznica na dnu kokile. Stvara se vodeni film tijekom cijele dužine bloka [36, 38 - 40].

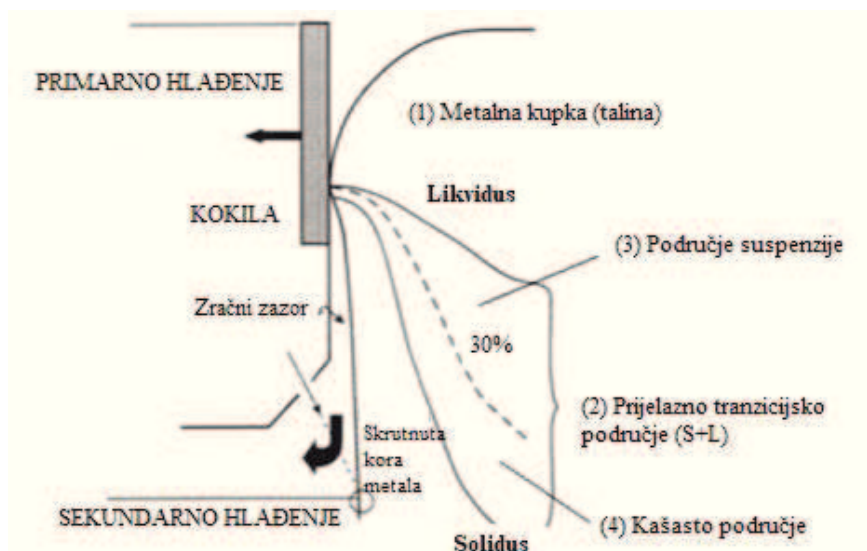


**Slika 6. Shematski prikaz usmjeravanja mlaza vode na skrtnutu koru tijekom sekundarnog hlađenja VDC postupkom [40]**

Tercijarno hlađenje služi za dovođenje temperature bloka do konačne temperature [36-38].

### Oblik i dimenzije lijevka u bloku za vrijeme lijevanja

Razni procesi proizvodnje uključuju fazu skrućivanja, poput lijevanja [41], a blokovi koji se lijevaju DC postupkom imaju nekoliko zona s potpuno različitim karakteristikama. Slika 7 prikazuje shematski prikaz zona unutar bloka s likvidus i solidus izotermama i koherencijskom izotermom koja se naziva i front skrućivanja [36, 42].



**Slika 7. Shematski prikaz zona u bloku tijekom DC lijevanja s koherencijskom izotermom označenom na 30% krute faze [39]**

- 1 = metalna kupka (talina)
- 2 = prijelazno (tranzicijsko) područje
- 1 + 2 = sabirna jama (lijevak, krater)
- 3 = područje suspenzije
- 4 = kašasto područje

Procesne varijable određuju toplinske uvjete lijevanja te tako i temperaturnu raspodjelu u različitim dijelovima bloka. Procesne varijable, sa sastavom legure, određuju dimenzije i geometriju prijelaza između tekućih i krutih područja u bloku. Lijevak se sastoji od metalne kupke (1) i prijelaznog područja (2). Prijelazno područje je omeđeno likvidus i solidus izotermama te se dalje dijeli na područje suspenzije (3) i kašasto područje (4). Granicu između (3) i (4) predstavlja koherencijska izoterma pri 30% krute faze [23]. Stanje koherencije se definira kao trenutak kad se kruta zrna (najčešće dendriti) počnu sudarati jedni s drugima i formiraju makroskopski koherentnu strukturu [31]. Područje ispod koherentne zone se naziva kašasto područje, a područje između likvidusa i koherencijske izoterme se naziva suspenzijsko područje [28]. Kod komercijalnih aluminijskih legura namijenjenih gnječenju, a koriste se u DC lijevanju, udio krute faze gdje se događa taj prijelaz je između 0,2 i 0,33 [36, 39].

Položaj izoterma unutar bloka ili trupca se može izraziti ravnotežom između ulazne konvektivne topline  $\rho V W \bar{c}_{pl}$  (gdje je  $\rho$  gustoća [ $\text{kg/m}^3$ ],  $c_{pl}$  je specifična toplina taline [ $\text{J/K}$ ],  $V$  je brzina lijevanja [ $\text{m/s}$ ] i  $W$  je duljina puta odvođenja topline difuzijom [ $\text{m}$ ]), toplinskom vodljivosti  $\lambda$  [ $\text{W/mK}$ ] te primarnim i sekundarnim hlađenjem na površini bloka/trupca koji su opisani koeficijentom prijenosa topline  $h$  [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]. Dva bezdimenzijska

broja koja se koriste u literaturama da okarakteriziraju tu ravnotežu su Pecletov i Biotov broj [38].

Biotov broj ( $Bi$ ), predstavljen jednađbom (1), se može interpretirati kao odnos između prijenosa topline na površinu (konvekcije) i provođenja topline (kondukcije) unutar bloka/trupca. Uobičajene vrijednosti Biotovog broja za DC postupak lijevanja aluminijske legure iznose  $2 < Bi < 60$  [27, 28]. Matematički je Biotov broj izražen:

$$Bi = \frac{hW}{\lambda} \quad (1)$$

gdje  $h$  predstavlja koeficijent prijenosa topline [ $W/m^2K$ ],  $W$  je duljina trupca [m] i  $\lambda$  je toplinska vodljivost [ $W/mK$ ].

Pecletov broj ( $Pe$ ) je odnos između prijenosa (konvekcije) i provođenja (kondukcije) topline u smjeru lijevanja. Uobičajena vrijednost za Pecletov broj u DC postupku lijevanja aluminijske legure iznosi  $1,8 < Pe < 4,8$ . Matematički se izražava:

$$Pe = \frac{V_c W}{\lambda} \quad (2)$$

gdje je  $V_c$  brzina lijevanja [m/s]. Niska vrijednost Pecletovog broja kod aluminijske legure objašnjava zašto se krutina, odnosno kora tijekom DC postupka formira u smjeru zakrivljenosti vodenog mlaza. Kod DC postupka su i difuzija i konvekcija iznimno snažne i jake [27].

U praksi se kod DC postupka može vidjeti direktna veza između brzine hlađenja i dubine lijevka te brzine hlađenja i brzine skrućivanja. Tako su svi odnosi između oblika i dimenzije lijevka, brzine lijevanja i prijelaznog područja, određeni fizikalnim svojstvima legure, dimenzijama blokova/trupca i procesnim parametrima.

Dubina lijevka  $H$  je jedna od karakterističnih odlika postojećeg profila skrućivanja kod DC postupka. Sama dubina ovisi o vrsti legure koja se lijeva, brzini hlađenja i veličini bloka/trupca. Obično iznosi 0,7 polumjera bloka/trupca. Jednađba (3) prikazuje odnose dubine lijevka s polumjerom, brzinom lijevanja i toplinskim provođenjem legure:

$$H = \frac{Ar^2 V_c}{4\lambda_s(T_m - T_s)} \quad (3)$$

gdje je  $H$  dubina lijevka [m],  $\lambda_s$  toplinska vodljivost krute tvari [ $W/mK$ ],  $T_m$  temperatura taljenja legure [K],  $T_s$  temperatura površine bloka ili temperatura rashladnog medija vode [K], a  $A$  je koeficijent za koji vrijedi jednađba (4):

$$A = \Delta H_f \rho_s \frac{c_s \rho_s (T_m - T_s)}{2} \quad (4)$$

gdje je  $\Delta H_f$  latentna toplina skrućivanja [ $J/mol$ ],  $\rho_s$  gustoća krute tvari [ $kg/m^3$ ],  $c_s$  specifična toplina krute tvari [ $J/kgK$ ]. Koeficijent  $A$  ovisi o vrsti legure i određuje temperaturu skrućivanja legure.

Pravilo koje govori da je odnos između debljine lijevka i polumjera bloka/trupca konstantna je direktna posljedica jednađbe (3):

$$V_c r = const. \quad (5)$$

Brzina lijevanja se u praksi smanjuje povećanjem promjera ili debljine bloka.

Navedene jednađbe (1) - (5) vrijede za blokove i trupce ako se u istim jednađbama zamijeni polumjer bloka/trupca s debljinom bloka. Dimenzije prijelaznog područja se ne mijenjaju jednako duž poprečnog presjeka bloka/trupca. Prijelazno područje ima tendenciju širiti se prema središnjem dijelu bloka/trupca [36, 38, 40].

### Utjecaj brzine skrućivanja i brzine hlađenja tijekom lijevanja

Brzina skrućivanja ovisi o brzini lijevanja  $V_c$  prema jednadžbi (6):

$$V_s = V_c \cos \alpha_n \quad (6)$$

gdje je  $V_s$  brzina skrućivanja [m/s], a  $\alpha_n$  kut između osi bloka i normale na fronti skrućivanja [°]. Karakteristika DC postupka je da lijevak ne mijenja oblik tijekom stacionarne faze lijevanja.

Gledajući da su brzina lijevanja i uvjeti hlađenja konstantni tijekom cijelog DC postupka lijevanja, lokalna brzina skrućivanja i toplinski gradijent  $G$  se ipak mijenjaju s položajem uzduž fronte skrućivanja. Brzina skrućivanja je maksimalna u centru i na rubovima bloka - tad je kut  $\alpha_n=0$  (fronta skrućivanja je ravna). Minimalna brzina skrućivanja postiže se u sredini radijalne pozicije, gdje je fronta skrućivanja najstrmija [36, 38, 40].

### **2.2.3. PARAMETRI LIJEVANJA ZA VRIJEME DC LIJEVANJA**

Kontrola procesnih parametara lijevanja u korelaciji s dimenzijama kokile, rezultira konačnim poluproizvodom zahtijevane kvalitete [39]. Parametri lijevanja se najčešće dijele na ulazne, konstantne, slučajne i izlazne. *Konstantni* parametri predstavljaju one koji se ne mogu mijenjati, poput dimenzija kokile, dužine bloka i temperature okoline. *Slučajni* parametri se ne mogu predvidjeti i obuhvatiti mjernim uređajima. Djeluju nepredvidljivo i mogu utjecati na izlazne veličine - začepljenje filtra, nestanak vode za hlađenje itd. *Ulaznim* parametrima se može upravljati tijekom procesa i imaju direktan utjecaj na izlazne veličine; to su temperatura i brzina lijevanja, visina taline u kokili, protok i temperatura rashladne vode. *Izlazni* parametri su veličine koje su određene ravninom bloka, mikrostrukturom, pukotinama i segregacijama [36].

#### Brzina lijevanja

Brzina lijevanja ima najveći utjecaj na bilancu ulaz/izlaz topline te je tako najvažniji parametar lijevanja. Ponekad zahtjev za povećanjem debljine bloka ne zahtijeva promjenu u brzini lijevanja. Utjecaj toga se reflektira u promjenama u visini lijevka i to će posljedično utjecati na bilancu ulaz/izlaz topline koja je potrebna da se održi kvaliteta lijevanog bloka [39].

Brzina lijevanja ima velik utjecaj na proces hlađenja - veća brzina lijevanja osigurava polagano hlađenje. Isto tako vrijedi i suprotno - mala brzina lijevanja znači brzo hlađenje. Ta brzina ima iznimno velik značaj jer ako je prevelika brzina lijevanja postoji bojazan da će ponestati potrebne količine taline i za posljedicu imati šupljine u bloku (usahline, lunkeri) [36, 38]. Larouche *et al.* [43] su objasnili kako se povećanjem brzine lijevanja istovremeno mora odvesti dovoljno topline da bi skrućivanje metala bilo zadovoljavajuće. Brzina lijevanja utječe i na veličinu lijevka - veća brzina rezultira većom duljinom lijevka i obrnuto [38, 43].

Preporuča se da su unaprijed zadane brzine lijevanja za svaku leguru i vrstu proizvoda, a brzina se može mijenjati ovisno o promjeni godišnjeg doba i temperaturi zraka i vode. Mjerenja brzine lijevanja zahtijevaju točnost i preciznost, posebice zbog toga što je većina proizvoda teška po nekoliko tona te su samim tim tolerancije na pogrešku vrlo male [39].



### Temperatura lijevanja

Utjecaj temperature lijevanja na bilancu ulaz/izlaz topline je malo manji od utjecaja brzine lijevanja, no temperaturu lijevanja je znatno teže kontrolirati nego brzinu. Zbog toga se „dozvoljavaju“ odstupanja temperature lijevanja za  $\pm 25$  °C. Minimalna temperatura lijevanja je tipično 20 °C iznad temperature likvidusa legura prilikom ulaska taline u kokilu [39].

Temperatura lijevanja ovisi također koliko je ljevalica udaljena od ljevačke peći. Sama temperatura lijevanja nema pretjerano velik utjecaj na prijenos topline tijekom procesa. Temperatura se mora održavati konstantnom, a što je niža temperatura lijevanja finije je zrno. Prosječne temperature lijevanja komercijalnih aluminijskih legura su 690 - 725 °C [36, 38].

### Protok rashladne vode i temperatura

Protok rashladne vode unutar kokile je važan parametar prilikom DC postupka lijevanja aluminijskih legura. Povećanje toka vode promovira veće odvođenje topline iz taline te istovremeno može utjecati na visinu lijevka. Postoji minimalna vrijednost protoka vode koja se može koristiti u DC postupku da osigura dovoljno odvođenje topline prije nego blok napusti kokilu i da se izbjegne probijanje tekućeg metala kroz koru. Visina lijevka varira ovisno o intenzitetu hlađenja; za  $Bi < 4$  povećanje hlađenja rezultira značajnim smanjenjem visine lijevka, dok daljnje hlađenje ima minimalne posljedice za visinu lijevka i ostale karakteristike dimenzija bloka, poput debljine krute kore i debljine kašaste zone unutar bloka [38].

Minimalna količina protoka rashladne vode koja se koristi u ovom procesu lijevanja i iznosi oko 80 m<sup>3</sup>/h. Protok rashladne vode tijekom procesa kontinuirano raste, a u stacionarnoj fazi iznosi oko 120 m<sup>3</sup>/h. Ona omogućuje da se dovoljno topline odvede prije nego blok napusti prostor kokile te da ne dođe do puknuća kore i izlijevanja tekućeg metala. Prevelik mlaz vode može uzrokovati i nekontrolirano miješanje vode i tekućeg metala te može doći do eksplozije [36, 38].

Alternativni način koristi injektiranje CO<sub>2</sub> u vodu koja se dalje koristi za hlađenje bloka. Topljivost CO<sub>2</sub> u vodi je obrnuto ovisna o temperaturi - ako hladna voda sadrži CO<sub>2</sub> i dođe u doticaj s vrućom površinom proizvoda u zoni hlađenja ispod kokile, CO<sub>2</sub> izlazi u obliku plina te formira mjehuriće plina u vodi te tako smanjuje koeficijent prijenosa topline. Injektiranje CO<sub>2</sub> se prekida prilikom početka lijevanja. Ova tehnologija zahtjeva visoku kontrolu svojstava vode (temperature i sastava).

Treća tržišno dostupna tehnologija - Wagstaff Dual-Jet™ koristi dvije mlaznice pozicionirane blizu rupa vodenog ispusta dvaju redova kokile. Razmještaj samih rupa vodenog ispusta u donjem redu razlikuje se od razmještaja onih u gornjem redu te se sami kutovi (nagibi) rupa razlikuju ovisno o poziciji u danom redu. Interakcija dvaju mlaznica koje dotiču površinu pri različitim kutovima povećava jednolikiju zonu prskanja vodom te se tako dobiva bolje hlađenje bloka u zoni ispod kokile. Sustav je relativno kompleksan i koristi se jedino za lijevanje traka [36].

### Visina taline u kokili

Na početku lijevanja meniskus kontinuirano raste za 15 - 20 mm. Stacionarna faza priželjkuje i stacionarne vrijednosti meniskusa. Kod visokog meniskusa se odvaja dio metala na rubu kokile te je to štetno zbog toga što dolazi do gubitka pravilne geometrije lijevka i

dolazi do nastanka iznojavanja na površini ljevka. Cilj je dobiti ljevak sa što nižim meniskusom [36, 43]. Visina taline u kokili se generalno smatra manje važnim parametrom lijevanja od brzine lijevanja [44].

Navedeni parametri imaju mogućnosti utjecati na dužinu formiranog krutog dijela te na odnos između ljevka tekućeg metala i formiranja krute kore. Također, parametri lijevanja mogu utjecati na obim skupljanja materijala prilikom skrućivanja te tako i na veličinu proizvoda te na naprezanja koja se stvaraju prilikom lijevanja, a konačno utječu i na nastajanje grešaka. Kad se postavljaju parametri lijevanja za specifičnu leguru i proizvod, također treba uzeti u obzir i individualni utjecaj svakog od parametara lijevanja, njihov zajednički utjecaj i utjecaj na pojedinačna svojstva lijevanog proizvoda. Zajednički utjecaj parametara je kompleksan te je nužno usko održavati suradnju između znanosti i prakse, iako je još uvijek teorija teško primjenljiva u praksi [36].

#### **2.2.4. LIJEVANA STRUKTURA I KVALITETA POVRŠINE LIJEVANOG BLOKA**

Nakon lijevanja bloka, cilj je dobiti sitnu i homogenu zrnatu strukturu. Jednolika struktura će olakšavati kasniju obradu kojoj je blok namijenjen, a intermetalne faze će se jednoliko distribuirati. Odgovarajuća veličina zrna u gnječivim proizvodima je poželjna i zbog jednolikih mehaničkih svojstava. Veličina zrna (prosječna veličina i morfologija) je važan parametar koji utječe na greške, poput toplih pukotina. Kod DC lijevanja veličina zrna ovisi o sastavu legure i o usitnjavanju zrna, a na sve to utječe brzina hlađenja bloka. Poznato je da modifikacija zrna ima velik utjecaj na veličinu zrna, što će biti kasnije i objašnjeno.

Veličina zrna ima tendenciju rasta od površine bloka prema njegovoj sredini, odnosno zrno se pogrubljuje u centru bloka te su takva zrna od površine bloka otprilike udaljena 15 - 20 mm (posljedica direktnog hlađenja vodom) [8, 45]. Sama kora bloka ima 5 - 20 mm debelu sitnozrnatu strukturu koja može prouzročiti probleme. Što je visina metala u kokili niža, površina je finija. Modernije tehnologije koriste elektromagnetsko miješanje u kokilama koje eliminira zračnost. Toplina se odvodi direktnim hlađenjem vodom te se dobiva fina, glatka površina s ujednačenom strukturom ispod površine te bez segregacijskih zona tipičnih za DC lijevanje.

Gruba i neravna površina DC lijevanih blokova može biti problematična i te greške (poput iznojavanja i površinskih segregacija) se moraju ukloniti da bi se dobila zadovoljavajuća kvaliteta bloka. Lijevanim blokovima namijenjenim za naknadno valjanje odstranjuje se površinski sloj glodanjem, a trupci za izvlačenje se moraju istokariti prije daljnje obrade [8].

#### **2.3. USITNJAVANJE ZRNA ALUMINIJSKIH LEGURA ZA GNJEČENJE**

Mikro- i makro struktura lijevanog proizvoda iznimno je važna gledano iz perspektive samog lijevanja, naknadne obradljivosti, kvalitete bloka i mehaničkih svojstava. Fina, sitnozrnata struktura treba biti jednolika u poprečnom presjeku bloka, a istovremeno se trebaju izbjegavati velike zone stubičastih i zamrznutih kristala, s manje makrosegregacija te

je cilj dobiti jednolika i poboljšana mehanička svojstva u polukrutom i krutom stanju s minimalnom tendencijom ka stvaranju toplih i hladnih pukotina. Stoga je nužno obaviti usitnjavanje zrna aluminijских legura prije samog skrućivanja [36].

Efektivnost samog cjepiva procjenjuje se na osnovu veličine zrna i postignute morfologije. Pojedini znanstvenici naglašavaju da je usitnjavanje zrna prilikom DC postupka važno - provodi se zbog dobivanja sitnih i ravnoosnih zrna, a time se postiže nekoliko tehnoloških i ekonomskih prednosti:

- poboljšana mehanička svojstva (čvrstoća, duktilnost),
- poboljšana obradljivost u naknadnim procesima (istiskivanje, valjanje),
- smanjenje površinskih grešaka u legurama tijekom valjanja i istiskivanja,
- reduciranje potrebe za homogenizacijom,
- smanjenje sklonosti toplim pukotinama te mogućnost povećanja brzine lijevanja bez opasnosti od pukotina,
- poboljšana anodizirajuća svojstva konačnog proizvoda i
- smanjena poroznost [44].

Zrno se može usitnjavati prisiljenom konvekcijom ili cjepivima. Metode prisiljene konvekcije podrazumijevaju mehaničko miješanje, ultrazvučne vibracije i elektromagnetsko miješanje. Ovim metodama, uz kontrolu parametara lijevanja (stupanj skrućivanja i temperaturni gradijent) postiže se usitnjavanje zrna bez ikakvih dodanih legirnih elemenata [8, 45].

Cjepiva (predlegure, inokulanti) su kemijski dodaci koji se dodaju u talinu u svrhu promicanja skrućivanja sa sitnom, ravnoosnom strukturom s promjerima zrna 0,2 - 1,0 mm. To je važan kvalitativan zahtjev za DC blok. Cijepljenjem se u talinu dodaju čestice koje mogu djelovati kao centri nukleacije zrna i blokirati rast stubičastih kristala od stijenki kalupa. Po toni aluminija se upotrebljava 0,2 - 10 kg cjepiva [45].

### **2.3.1. VRSTE KOMERCIJALNIH CJEPIVA**

Opće karakteristike dobrih cjepiva su: proizvodnja malog kontaktnog kuta između nukleacijske čestice (supstrata) i rastućeg nukleusa, visoka površinska energija između taline i supstrata i niska površinska energija između nukleusa i supstrata. Najbolji katalizatori za stvaranje klica su oni s koherentnom površinom između nukleusa i supstrata [8].

Karakteristike koje cjepivo mora imati da postane efikasno mjesto za nukleaciju su:

- slične kristalografske ravnine i dobra moćivost,
- točka taljenja mora biti viša od točke taljenja legure koja skrućuje,
- mora moći inicirati smrzavanje pri jako malom pothlađenju,
- mora stvoriti dovoljno mjesta za nukleaciju koja moraju biti raspoređena jednako u talini,
- veličina čestica mora biti veća od kritičnog radijusa.

Cjepiva se mogu raspodijeliti u tri skupine: sa sporim djelovanjem (optimalno vrijeme kontakta je dugo), s brzim djelovanjem (optimalno vrijeme kontakta je sporo) i idealno cjepivo (brzo djeluje i dugo traje) [36, 46]. Različiti proizvodi zahtijevaju različite vrste cjepiva te je sastav cjepiva postao kompleksan s njihovim razvojem. Cjepiva za usitnjavanje aluminijских legura sadržavaju Ca, Al-Ti, Al-B, Al-Sr, Al-Fe, Al-Zr, Al-Sc, Al-Ti-B, Al-Ti-

C, Al-Ti-Be, Al-Nb, B, Al-Ti-B-Re, Al-Ti-B-C-Re. Danas je najčešće korišteno cjepivo Al-Ti-B [46].

### 2.3.2. MEHANIZMI USITNJAVANJA ZRNA CJEPIVIMA

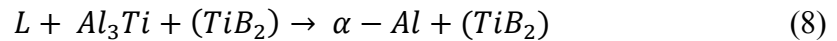
Usitnjavanje zrna je potrebno prilikom postupka lijevanja aluminijskih legura jer smanjuje greške prilikom lijevanja i poboljšava svojstva lijevanog metala. Dodatak cjepiva u aluminijsku leguru je postala uobičajena praksa usitnjavanja zrna. Veličina zrna aluminijske legure ovisi o procesu skrućivanja koje se sastoji od nukleacije i rasta  $\alpha$ -Al. U fazi nukleacije ogromna količina heterogenih nukleacijskih mjesta  $\alpha$ -Al se pojavljuje unutar taline nakon dodatka cjepiva. Heterogena nukleacija se može ubrzati dodatkom otopljenih elemenata koji mogu inducirati konstitucijsko pothlađenje. Rastom zrna  $\alpha$ -Al otopljeni elementi (ili netopljive čestice) mogu se izlučiti po granicama zrna i spriječiti daljnji rast zrna. Tako je veličina zrna smanjena zbog visokog nukleacijskog potencijala i sprječavanjem rasta zrna. Teorije koje opisuju mehanizme usitnjavanja zrna cjepiva su karbidno-boridna teorija, peritektička teorija, teorija dupleks nukleacije i teorija otopljenih elemenata [46].

Po jednoj od teorija pretpostavlja se da se heterogena nukleacija  $\alpha$ -Al promovira karbidnim ili boridnim česticama u procesu skrućivanja aluminijskih legura. Te čestice imaju visoku točku taljenja i male su veličinom te služe kao nukleacijska mjesta  $\alpha$ -Al - to su karbidi, boridi, spojevi na bazi Ca i Nb. Kad se cjepivo doda u talinu aluminijske legure važno je uočiti je li cjepivo stvorilo dovoljno efektivnih mjesta za nukleaciju za induciranje heterogene nukleacije. Neki znanstvenici su preporučili korištenje Ti, V, Zr i Nb za induciranje konstitucijskog pothlađenja i stvaranje heterogenih nukleacijskih mjesta, dok su drugi dodali Al-Ti-C cjepivo u talinu te uvidjeli da su se TiC čestice nakupile i ponašale kao nukleacijska mjesta za  $\alpha$ -Al. Također se pokazalo da intermetalna faza koja sadrži Ca, poput npr.  $\text{CaAl}_2$ , a ima visoku točku tališta, promovira stvaranje nukleacijskih mjesta  $\alpha$ -Al. Pretpostavlja se da su nukleacijska mjesta kod Al-B cjepiva  $\text{AlB}_2$  faze te da se usitnjavanje zrna postiže dodatkom Al-B. Pokusima se pokazalo da  $\text{Al}_3\text{Fe}$  faza kod Al-Fe cjepiva usitnjava zrno čistog Al te da Al-Fe cjepivo promovira stupanj nukleacije i smanjuje rast  $\alpha$ -Al zrna. Pretpostavlja se u ovoj teoriji da su velike količine nukleacijskih mjesta (poput  $\text{Al}_3\text{Nb}$ ,  $\text{NbB}_2$  i intermetalnih čestica na bazi Nb) stvorene dodatkom Nb-B legure. Dodatci Zr (u obliku Al-Zr cjepiva) i Sc (u obliku Al-Sc cjepiva) stvaraju velika mjesta za heterogenu nukleaciju, a dodavanjem La i B dolazi do stvaranja  $\text{LaB}_6$  faze te se pomoću nje moglo postići bolje usitnjavanje zrna. No, neki drugi znanstvenici vjerovali su da netopljive čestice (poput  $\text{TiB}_2$ ) nisu služile kao nukleacijska mjesta za  $\alpha$ -Al u odsutnosti drugih netopivih elemenata. Učinkovito usitnjavanje zrna aluminijskih legura postignuto je dodatkom Al-Ti-B cjepiva. Uočeno je da ne dolazi do usitnjavanja zrna kad se  $\text{TiB}_2$  čestice zasebno dodaju u Al visoke čistoće, ali da dolazi do usitnjavanja zrna kod Al komercijalne čistoće. Postavilo se pitanje jesu li nečistoće (poput Fe, Ti i Si) kod Al komercijalne čistoće aktivirale usitnjavanje zrna dodatkom  $\text{TiB}_2$ . Također se pretpostavilo da cjepiva koja sadrže  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{TiB}_2$  i  $\text{AlB}_2$  čestice bolje usitnjavaju zrno nego ona cjepiva s pojedinačnim česticama. Kod ove teorije se također pretpostavlja da se  $\text{TiB}_2$  i  $\text{TiAl}_{20}\text{Ce}$  čestice kod Al-Ti-B-Re cjepiva ponašaju kao nukleacijska mjesta  $\alpha$ -Al. Er bi mogao usporavati i sprječavati rast zrna  $\alpha$ -Al te da aglomerira  $\text{TiB}_2$  čestice [46].

Peritektička teorija je pokazala da usitnjavanje zrna od strane cjepiva dolazi od peritektičke reakcije: binarna peritektičku reakciju induciranu  $\text{TiAl}_3$ , jednadžba (7).



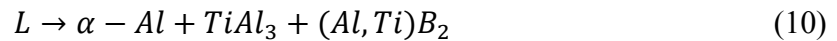
Pretpostavlja se da dolazi do ternarne peritektičke reakcije dodatkom Al-Ti-B cjepiva, jednažba (8).



Binarna eutektičku reakciju inducirana dodatkom Al-B cjepiva u talinu aluminijske legure, jednažba (9).



Ternarna peritektička reakcija za Al-Ti-B cjepivo, jednažba (10).



Međutim, pouzdanost ovih reakcija se tek treba utvrditi. Stog je predložena druga teorija, peritektička *hulk* teorija. Predlaže se da je  $TiAl_3$  okružen s ovojnicom, formiranom od  $TiB_2$  te je stupanj otapanja  $TiAl_3$  smanjen zbog nastale ovojnice. Jednom kad udio Ti dosegne kritičnu vrijednost, kreće peritektička reakcija. Predlože se da peritektička reakcija nije glavni uzrok usitnjavanja zrna. Zato što  $TiAl_3$  čestice nisu stabilne u talini aluminijske legure, količina Ti dovedena cjepivom je manja nego što je potrebno za odvijanje peritektičke reakcije.

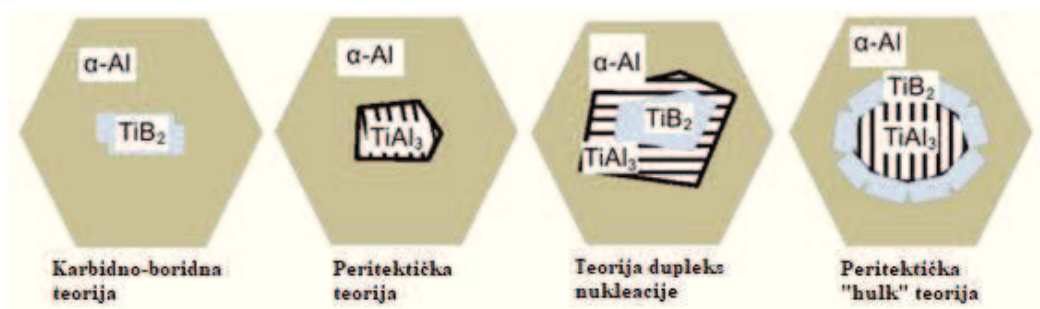
Pod mehanizmom dupleks nukleacije podrazumijeva se odvijanje nukleacije u dvije faze. Prva faza je da se  $TiAl_3$  čestice skupljaju na površini  $TiB_2$  te onda  $\alpha$ -Al nukleira  $TiAl_3$  i  $TiB_2$  česticama. Stoga se predstavila teorija hipernukleacije koja je slična mehanizmu dupleks nukleacije. Međutim, posumnjalo se da je izvor Ti na površini  $TiB_2$  nepouzdan te je ustanovljeno da je problem mehanizma dupleks nukleacije netočnost.

Teorija otopljenog elementa smatra da su otopljeni element, npr. Ti i nukleacijske čestice, neophodni za usitnjavanje zrna aluminijske legure. Konstitucijsko pothlađenje uzrokovano otopljenim elementom promovira heterogenu nukleaciju te segregacija otopljenog elementa blizu kruto-tekuće granice ograničava rast zrna aluminijske legure. Proučavali su se utjecaji Ti, V, Zr, Nb, Cu, Mg i Si na usitnjavanje zrna aluminijskih legura. Otkriveno je da snaga usitnjavanja zrna, od najviše prema najnižoj, ide  $Ti > V, Zr, Nb > Cu, Mg, Si$ . Cu, Mg i Si induciraju usitnjavanje zrna konstitucijskim pothlađenjem. Ti se prikazao najboljim za usitnjavanje zrna jer je inducirao konstitucijsko pothlađenje i stvarao mjesta za heterogenu nukleaciju. Uočeno je da je učinkovitost cijepjenja kod aluminijskih legura nije promijenjena s povećanjem udjela Ti (B) kad je udio prelazio 0,03 mas.%. Također je uočeno da je učinkovitost cjepiva Al-Ti-B-Re ostala nepromijenjena kad je dodatak cjepiva premašio 0,2 mas.%. Pokazalo se da je usitnjavanje zrna promovirano dodatkom elemenata rijetkih zemalja. U teoriji je predloženo da ti elementi budu oko  $TiAl_3$  te smanje površinsku energiju  $TiAl_3$ , ubrzavajući time peritektičku reakciju [46].

Navedene teorije su sumirane u tablici 5 gdje su navedene njihove prednosti i nedostaci, a slika 8 prikazuje shematski prikaz nukleacije kod različitih teorija [46].

**Tablica 5. Usporedba različitih teorija mehanizma usitnjavanja zrna [46]**

| Teorija                            | Pozitivni aspekti   | Negativni aspekti  |
|------------------------------------|---|--|
| <b>Karbidno - boridna</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>TiB_2</math> je vidljiv u Al zrnu</li> <li>- AlTiB predlegura pokazuje bolja svojstva usitnjavanja zrna nego AlTi predlegura</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- AlTiB<sub>2</sub> predlegura ne usitnjava Al visoke čistoće, ali AlTi da</li> <li>- karbidi (ili boridi) ne usitnjavaju zrna u odsutnosti otopljenog Ti</li> </ul>  |
| <b>Peritektička</b>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- objašnjeno je usitnjavanje zrna legurom serije AlTi</li> <li>- teorija ima smisla u rastaljenoj Al leguri koja sadrži <math>TiAl_3</math></li> <li>- <math>TiAl_3</math> se nalazi u centru Al zrna</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- teorija ne može objasniti osnažujući utjecaj B na usitnjavanje zrna</li> <li>- količina slobodnog Ti je značajno niža nego što ga je potrebno za peritektičku reakciju</li> <li>- <math>TiAl_3</math> faza nije termodinamički stabilna za peritektičku reakciju</li> </ul> |
| <b>Peritektička „hulk“</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>TiAl_3</math> faza je stabilna i pri niskim koncentracijama dodanog B</li> <li>- usitnjavanje zrna AlTiB predlegurom (<math>Ti/B &gt; 2,22</math>) objašnjeno je teorijom dupleks nukleacije</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- B nema utjecaj na AlTi fazni dijagram i stabilnost <math>TiAl_3</math></li> <li>- usitnjavanje zrna s AlTiB smanjuje se s produljenjem vremena držanja (može se prekinuti smanjenje miješanjem)</li> </ul>  |
| <b>Dupleks (hipernukleacija)</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- postojanje bogatog Ti sloja na površini <math>TiB_2</math></li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- mala faza između <math>TiB_2</math> i amornog Al je teška za otkriti</li> <li>- u teoriji bi Al, kombinacija Al i <math>Al_3Ti</math> ili srednje AlTi strukture svi mogli nukleirati na površini <math>TiB_2</math> čestice</li> </ul>                                     |
| <b>Teorija otopljenog elementa</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- otopljeni elementi imaju utjecaj na rast zrna</li> <li>- povećan udio otopljenih elemenata inducira povećanu nukleaciju</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- restriktivan utjecaj topivih elemenata ima zanemariv utjecaj na nukleaciju i konačnu veličinu zrna</li> </ul>   |



**Slika 8. Shematski prikaz nukleacija u različitim teorijama usitnjavanja zrna [46]**

## 2.4. SKRUĆIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA I RAZVOJ PRIMARNE STRUKTURE BLOKA LIJEVANOG DC POSTUPKOM

Poznato je da metali mogu postojati u tri (tj. četiri) agregatna stanja te da pod određenim termodinamičkim uvjetima metali mogu prijeći iz jednog stanja u drugo - što se naziva *faznom transformacijom*. Za vrijeme lijevanja dolazi do najčešće fazne transformacije, a to je skrućivanje taline te prelazak iz tekućeg u kruto stanje. Skrućivanje podrazumijeva procese nukleacije i rasta kristalnih zrna iz taline te razvoj primarne strukture, uključujući pretvorbe od solidus temperature do sobne temperature [36, 41].

### 2.4.1. OSNOVE SKRUĆIVANJA

Sustav je grupa tvari koje se nalaze u međusobnoj fizičko - kemijskoj vezi. Može biti homogen (isti sastav i svojstva u svim dijelovima) ili heterogen (sastoji se od više homogenih dijelova međusobno različitih). Faza je homogeni dio nekog sustava koja se može odvojiti mehaničkim putem - dekantiranjem, centrifugiranjem, filtriranjem itd. Komponente su početni, zasebni dijelovi nekog sustava (elementi, kemijski spojevi) koji izgrađuju taj sustav [41]. U krutoj fazi, atomi vibriraju oko čvrstih, ravnotežnih točaka. U tekućoj fazi, atomi se mogu slobodno kretati. Energija povezana s vibracijama atoma na atomskoj razini manifestira se kao toplinska energija (toplina). Mjera toplinske energije je temperatura. Atomi u tekućini posjeduju veću energiju spram onih u krutini. Kruta faza, da bi se transformirala u tekuću, zahtjeva energiju da prebrodi sile koje drže atome zajedno. Ta energija se naziva latentnom toplinom. Drugim riječima, latentna toplina se definira kao količina topline potrebna za promjenu faze materijala, bez povišenja njegove temperature [47].

#### 2.4.1.1. POKRETAČKA SILA ZA SKRUĆIVANJE

Za sustave pri konstantnoj temperaturi i tlaku, relativna stabilnost različitih slobodnih mjesta je opisana Gibbsovom slobodnom energijom. Za fazu se smatra da je u ravnoteži ako je Gibbsova slobodna energija sustava pri danoj temperaturi minimalna. Fazna transformacija se može odviti spontano ako vodi do povišenja Gibbsove slobodne energije. Gibbsova slobodna energija  $G$  [J] opisuje se kao funkcija temperature, jednačba (11).

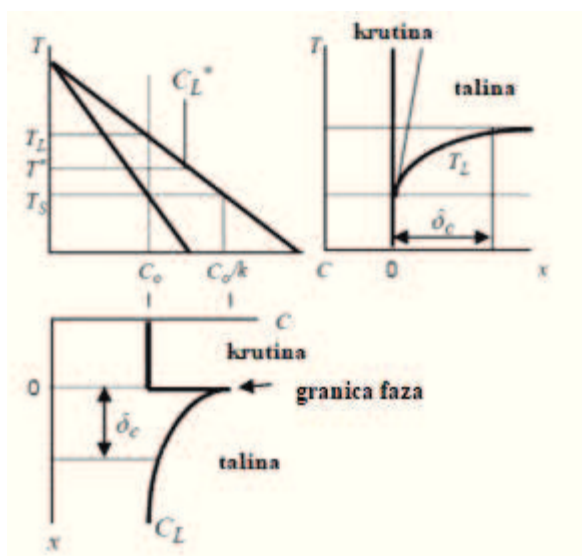
$$G = H - T \cdot S \quad (11)$$

pri čemu  $T$  predstavlja temperaturu [K],  $H$  entalpiju [J] i  $S$  entropiju [J/K]. U krutoj fazi je nered u raspodjeli atoma manji spram tekuće faze, dok je pri višim temperaturama tekuća faza stabilnija, a pri nižim temperaturama je stabilnija kruta faza. Pri temperaturi taljenja, obje faze su u ravnoteži. Fazna transformacija se neće dogoditi ako su sustavi u ravnoteži. Kad se ostvari stanovito pothlađenje, odnosno razlika između temperature taljenja i okolne temperature, sustav će imati pokretačku silu za transformaciju. Tako da je pokretačka sila za skrućivanje direktno proporcionalna pothlađenju [47].

## Pothlađenje

Ako nema pothlađenja, fronta skrućivanja se neće pomaknuti, odnosno kristali neće rasti. Pothlađenje potrebno da bi došlo do pomicanja fronte skrućivanja sastoji se od nekoliko različitih vrsta pothlađenja: toplinskog, konstitucijskog, kritičnog i kinetičkog. Ukupno pothlađenje je zbroj svih vrsta pothlađenja [47]. U realnim uvjetima, konstitucijsko pothlađenje je najodgovornije za nastanak skrućivanja [49].

Konstitucijsko pothlađenje  $\Delta T_c$  nastaje kao posljedica razlike topljivosti legirajućeg elementa u talini i krutini. Slika 9 prikazuje tri dijagrama: lijevi gornji dijagram je fazni dijagram, lijevi donji je sastav-udaljenost  $x$  dijagram i desni je temperatura-udaljenost dijagram.  $C_0$  predstavlja sastav krutine pri  $T_S$  temperaturi solidusa i  $C_0/k$  je sastav taline pri istoj temperaturi.  $\delta_c$  je granični difuzijski sloj koji nastaje uslijed razlike u udjelu taline bliže i dalje od granice faza. Desni dijagram je pokazao da likvidus temperatura u graničnom sloju nije konstantna uslijed razlike u sastavu od  $C_0/k$  do  $C_0$ . Temperaturni gradijent  $G_L$  je derivacija  $T_L(x)$  krivulje s obzirom na  $x$  pri  $T^*$  [49].



**Slika 9. Toplinsko polje i polje otopljenog elementa ispred granice krutina/talina [49, 50]**

Temperaturni gradijent  $G_T$  je prisutan i u talini uslijed toka topline kroz krutinu i određuje se razvojem toplinskog polja. Može se pretpostaviti da je veći dio taline na temperaturi iznad likvidusa, no talina uz granicu fazi je vrlo vjerojatno ispod temperature likvidusa zbog koncentracije otopljenog elementa u difuzijskom sloju. Takva talina je konstitucijski pothlađena. Uzimajući u obzir sliku 9 pothlađenje  $\Delta T_c$  računa se po jednadžbi (12):

$$\Delta T_c = T_L - T^* = -m(C_L^* - C_0) \quad (12)$$

gdje je  $T_L$  temperatura likvidusa [K],  $T^*$  temperatura granične površine u proizvoljno odabrano vrijeme [K],  $m$  je nagib likvidus linije,  $C_L^*$  je sastav taline [mas.%], a  $C_0$  je početni sastav taline legure [mas.%] [49].



### 2.4.1.2. NUKLEACIJA

Nukleacija je prvi korak kod skrućivanja. To je formiranje malih količina krute faze u pothlađenoj talini nakon čega slijedi rast nukleusa. Postoje dvije vrste nukleacije: homogena i heterogena. Pretpostavlja se da je površina između krute i tekuće faze gruba, no istovremeno je i velika te se preko nje odvija difuzija [47]. Samo skrućivanje obuhvaća procese nukleacije i rast kristalnih zrna iz taline te razvoj primarne strukture obuhvaćajući pretvorbe od solidus do likvidus temperature.

Heterogena nukleacija na prisutnim supstratima u talini je energetski povoljnija u usporedbi s homogenom nukleacijom koja zahtijeva znatno pothlađenje. Čestice i supstrati koji su standardno prisutni u aluminiju komercijalne čistoće, poput oksida i raznih drugih nečistoća, zahtijevaju pothlađenje 3 - 5 °C za heterogenu nukleaciju. No, tako bi došlo do krupnozrnate i neprihvatljive strukture zrna te se moraju dodati druge čestice koje djeluju kao nukleanti pri nižim pothlađenjima [8].

#### Heterogena nukleacija

Tijekom heterogene nukleacije nukleus će se prvo formirati na stranoj površini, npr. na zidu kokile, nečistoćama te inokulantima. Za razliku od homogene nukleacije, ne zahtijeva previsoko pothlađenje te je česta za većinu procesa skrućivanja. Razlika slobodne energije za heterogenu nukleaciju predstavljena je jednačinama (13), (14) i (15):

$$\Delta G^{het} = \left( -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma_{SL} \right) \cdot f(\theta), \quad (13)$$

$$\Delta G^{het} = \Delta G^{hom} \cdot f(\theta), \quad (14)$$

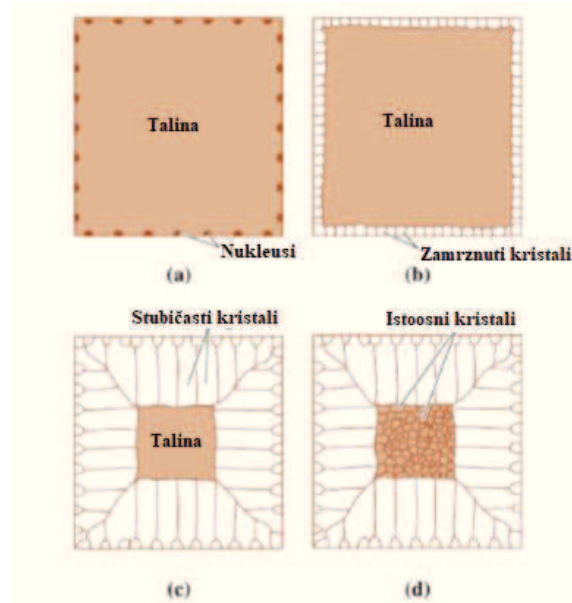
gdje je,

$$f(\theta) = \frac{(2 + \cos\theta) - (1 - \cos\theta)^2}{4} \quad (15)$$

$G_V$  je promjena slobodne energije po jedinici volumena za nastajanje klice oblika kugle,  $r$  je radijus [m],  $\gamma_{SL}$  površinska napetost između krutine i taline [J/m<sup>2</sup>], a  $\theta$  kut kvašenja [°]. Geometrijski faktor  $f(\theta)$  je omjer volumena sfernog odsječka s volumenom cijele kugle s vrijednošću između 0 i 1. Ako je vrijednost jednaka 1, to predstavlja da se odvija homogena nukleacija, odnosno nukleus je spriječen da ima ikakav kontakt sa stranim tijelom. Zaključuje se da pokretačka sila za heterogenu nukleaciju uvijek mora biti manja od one za homogenu nukleaciju [47].

### 2.4.2. RAZVOJ KRISTALNIH ZONA BLOKA LIJEVANOG DC POSTUPKOM

Slika 10 prikazuje različite zone mikrostrukture koje se formiraju prilikom lijevanja bloka.



**Slika 10. Različite zone kod lijevanja bloka [47]**

*a) nukleacija, b) formiranje vanjske jednoosne zone, c) stubičasta zona, d) unutarnja istoosna zona*

Tijekom skrućivanja taline unutar kokile, prvi kruti dijelovi nukleiraju na zidu kokile, slika 10 a). Inicijalno, tijekom kratkom vremena, nukleusi imaju tendenciju rasta u veličinu i formiraju zonu zamrznutih kristala na samom rubu odljevka, slika 10 b), tada se rast tih kristala širi prema sredini kokile, paralelni jedni drugima i u suprotnom smjeru od toplinskog toka, formirajući zonu stubičastih kristala, slika 10 c). Nakon nekog vremena grane se odvoje od stubičastih dendrita. Ostatak taline u sredini bloka skrućuje u grube istoosne sferične kristale, slika 10 d) [47].

Sve tri zone ne moraju uvijek biti prisutne u bloku. S porastom pothlađenja mijenjat će se struktura bloka od potpuno stubičaste do miješano stubičasto ravnoosne strukture. Zaključuje se da će se prijelaz iz stubičastog u ravnoosno dogoditi s porastom pothlađenja [48].

Ako se u odljevku ne nalazi ravnoosna zona, struktura će se u potpunosti sastojati od stubičaste zone. Ravnoosna zrna rastu ispred stubičastih dendrita. U onom trenutku kad ravnoosna zrna postanu dovoljno velika i brojna da spriječe napredak stubičastog fronta doći će do prijelaza iz stubičastog u ravnoosni rast. Faktori koji utječu su veličina i stupanj konstitucijskog pothlađenja te brzina stubičastog fronta. Ravnoosni nukleusi mogu egzistirati ispred stubičastog fronta bez tendencije razvijanja u ravnoosnu zonu jer uvjeti nisu povoljni za njihov rast. Stubičasti front će dominirati u strukturi i apsorbirati mala ravnoosna zrna onda kad je ravnoosni rast spor spram stubičastog ili ako je ograničen na usko pothlađeno područje ispred stubičastog fronta. Za formiranje ravnoosnih zrna nužno je ispuniti uvjete dovoljnog broja ravnoosnih zrna u talini koja rastu brzinom dovoljno da spriječe napredovanje stubičastog fronta [13, 48].

Ravnoosna zona može se smanjiti ili spriječiti održavanjem visokih temperatura unutar taline te smanjenjem prirodne konvekcije. Postojanje blagog temperaturnog gradijenta u talini utječe na ravnoosnu zonu [28]. Poželjna struktura lijevanih proizvoda je ona sastavljena od sitnih ravnoosnih zrna. Cilj je dobiti ujednačenu i sitnozrnatu ravnoosnu strukturu. Blokovi se nakon lijevanja najčešće obrađuju deformacijom u toplom stanju, važna je veličina i oblik zrna u lijevanom stanju te je važno kontrolirati strukturu zrna [13].

Dodavanjem aluminijskih predlegura dodaju se novi nukleanti te se tako najuspješnije kontrolira veličina zrna. Te čestice unutar predlegura nukleiraju nove kristale tijekom skrućivanja. Također, dodavanjem sredstava za usitnjenje zrna može se umanjiti područje stubičastog rasta [13, 36].

### 2.4.3. MIKROSEGREGACIJE

Odvijanje dodatnih reakcija skrućivanja i formiranje ili zadržavanje dodatnih faza tijekom neravnotežnog skrućivanja tijekom DC postupka lijevanja je u većini slučajeva uzrokovano mikrosegregacijama. Mikrosegregacije predstavljaju nehomogenost kemijskog sastava na razini jednog zrna (dendrita). Uzrok mikrosegregacija je dobro poznat - sve fazne transformacije koje se dogode tijekom skrućivanja uzrokovane su difuzijom i treba im neko vrijeme da se odvijaju do kraja. Velika većina legiranih elemenata koji se dodaju aluminiju su manje topljivi u krutoj fazi nego u tekućoj fazi.

U praksi se većina elemenata procjenjuje mikrosegregacijskim omjerom  $k$ , koji predstavlja kvocijent maksimalnog sadržaja otopljenog elementa  $C_S$  [mas.%] i minimalnog sadržaja otopljenog elementa nakon skrućivanja pri konstantnoj temperaturi  $C_L$  [mas.%], jednadžba (16). Stupanj odvijanja faznih transformacija kontroliran je difuzijom putem sljedećih procesa:

- difuzija legiranih elemenata u preostalu masu taline prema i od granične površine kruto/tekuće u cilju nastanka ravnotežne razlike koncentracija prema razlici u koncentracijama u tekućoj i krutoj fazi,
- difuzija u talini od granične površine s ciljem smanjenja koncentracije otopljene tvari ( $k < 1$ ),
- difuzija u krutini u cilju uravnoteženja koncentracije otopljene tvari unutar skrutnutog zrna [23, 40].

Matematička formulacija mikrosegregacijskog omjera  $k$ , jednadžba (16) [23], je:

$$k = \frac{C_S}{C_L} \quad (16)$$

Problem kod ravnotežnih dijagrama je taj da oni vrijede za ravnotežne uvjete skrućivanja i hlađenja. Idealno nastajanje kristala, koji imaju jednoliki sastav kroz cijeli poprečni presjek, nije moguće dobiti konvencionalnim postupkom lijevanja jer gibanje atoma nije dovoljno da u kratkom vremenu oblikuje kristale s jednolikom koncentracijom stranih atoma preko poprečnog presjeka. Količina segregacija u zrnima je povezana s brzinom skrućivanja - što je sporije skrućivanje legure, manja je segregacija u zrnima [8, 36].

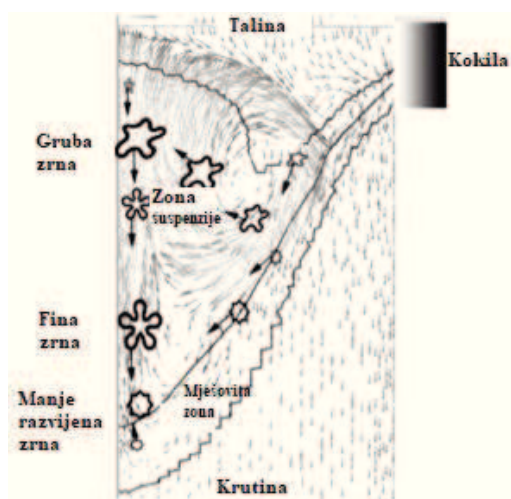
I u krutom stanju atomi imaju veliku pokretljivost na povišenim temperaturama, a na dovoljno visokim temperaturama atomi mogu mijenjati mjesta u čvrstoj strukturi (rešetci). Taj je proces poznat pod imenom difuzija, koja je već prethodno spomenuta. Segregacija u zrnima se može eliminirati i tako se može ostvariti jednolika distribucija stranih atoma u strukturi. Homogenizacijsko žarenje je postupak gdje se legura (u krutom stanju) žari u peći dovoljno dugo na temperaturi malo ispod solidus temperature, što za posljedicu ima eliminaciju varijacija u sadržaju drugih atoma. Drugi način eliminacije segregacije u zrnima je vrlo sporo hlađenje svježih skrutnutih struktura [8].

## 2.4.4. MAKROSEGREGACIJE

Makrosegregacije su dobile ime po segregacijama (ili izdvajanju) legiranih elemenata tijekom skrućivanja. To odvajanje se odvija na razini zrna te se naziva mikrosegregacijama, kako je opisano u poglavlju 2.4.3. Kada se dogodi velika razlika (čak i do nekoliko desetaka postotaka) u sastavu krute i tekuće faze tijekom skrućivanja na mikroskopskoj razini, to je manje od 1% promjene u kemijskom sastavu, na makroskopskoj razini ta se promjena očituje tijekom cijelog procesa lijevanja, odnosno nastaju makrosegregacije. Ozbiljan problem s njima je da se ne mogu ukloniti naknadnim procesima, poput homogenizacije, kao mikrosegregacije. Veliku ulogu u tome čini razlika u duljini područja difuzije, to su mikrometri kod mikrosegregacija i centimetri kod makrosegregacija [36].

Osnove svih mehanizama nastajanja makrosegregacija mogu se objasniti kao relativno kretanje tekuće i krute faze tijekom skrućivanja. Relativno kretanje prenosi odvajanje otopljenih elemenata između tekuće i krute faze (mikrosegregacije) prema razlici u kemijskom sastavu na makroskopskoj razini (makrosegregacije). Postoje različiti slučajevi relativnih kretanja koji su karakteristični za različite dijelove i faze lijevanja, npr. meniskus u bloku tijekom DC postupka:

- eng. *thermo-solutal* konvekcija koju uzrokuje temperatura i koncentracijski gradijent te probijanje konvekcijskog toka u zonu suspenzije (eng. *slurry zone*) i mješovitu zonu (eng. *mushy zone*) bloka, slika 11,
- prijenos krutih zrna kroz zonu suspenzije gravitacijom i silama uzgona, konvekcijski ili prisiljeni tokovi,
- talina teče u mješovitoj zoni koja napaja stiskanje uzrokovano skrućivanjem i toplinskim kontrakcijama koje nastaju tijekom skrućivanja,
- talina teče u mješovitoj zoni uzrokovano metalostatskim tlakom,
- talina teče u mješovitoj zoni uzrokovano deformacijama (toplinske kontrakcije) krute mreže,
- prisilni tok taline, uzrokovan izlivanjem, stvaranjem plinova, miješanjem, vibracijama, taloženjem, rotacijom itd. koji penetrira u mješovitu zonu bloka mijenja smjer konvekcijskog toka.



**Slika 11. Shematski prikaz tipičnog toka taline u prijelaznoj zoni meniskusa kod DC postupka lijevanja bloka s likvidus, koherentnim i solidus izotermama koje odvajaju tekuću zonu, zonu suspenzije, mješovitu zonu i krutu zonu unutar bloka [51]**

*Prikazana su moguća kretanja kristala koji se slobodno kreću. Prikazana je samo polovica bloka na slici*

Poznato je da komercijalne legure većinom skrućuju u obliku dendrita te formiraju sveukupnu istoosnu strukturu unutar bloka. U zoni suspenzije (između likvidusa i koherentnih izoterma u zoni prijenosa) istoosna zrna se mogu slobodno kretati i mogu prijeći kratke ili duže udaljenosti, ovisno o njihovoj veličini i smjeru toka taline, slika 11. U mješovitoj zoni (između koherencijskih izoterma i neravnotežnog solidusa) dendriti formiraju kontinuiranu krutu mrežu te imaju fiksirana mjesta unutar bloka. Smatra se da se oni kreću samo u smjeru skrućivanja [51]. Segregacije glavnih legirnih elemenata posljedica su toka taline i odvajanja otopljenih elemenata između taline i krutine tijekom skrućivanja [52].

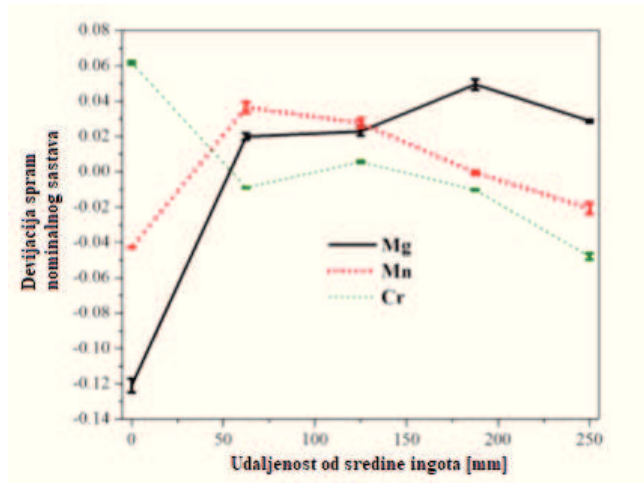
Provedeno je istraživanje makrosegregacija na aluminijskoj leguri EN AW-5182, tablica 6 prikazuje količinu legirnih elemenata od sredine prema površini legure lijevane DC postupkom. Na prvi pogled odmah je vidljivo da postoje značajne makrosegregacije koje su posljedica toka taline tijekom lijevanja i izdvajanja otopljenih elemenata između taline i krutine. Da bi se kvantificirala makrosegregacija legirnih elemenata na različitim lokacijama, korištena je devijacija nominalnog sastava kao reprezentacija segregacije.

**Tablica 6. Prosječni sastav glavnih legirnih elemenata koji su funkcija udaljenosti od sredine ingota [52]**

| Položaj u odnosu na sredinu ingota [mm] | Legirni elementi [mas.%] |      |      |
|---|--------------------------|------|------|
|   | Mg                       | Mn   | Cr   |
| 0                                       | 3,45                     | 0,37 | 0,19 |
| 62                                      | 4,00                     | 0,40 | 0,18 |
| 125                                     | 4,01                     | 0,39 | 0,18 |
| 187                                     | 4,11                     | 0,38 | 0,18 |
| 250 (površina)                          | 4,03                     | 0,38 | 0,17 |

Slika 12 prikazuje devijaciju od nominalnog sastava za svaki legirajući element pri različitim udaljenostima od sredine ingota. Vrijednosti veće od nule za ovu devijaciju impliciraju „pozitivnu“ makrosegregaciju, a vrijednosti manje od nule indiciraju „negativnu“ makrosegregaciju. Magnezij pokazuje značajnu negativnu makrosegregaciju u sredini ingota [52], a to je u skladu s rezultatima prethodnih istraživanja DC blokova od strane Eskin *et al.* [51] Uočena središnja segregacija je vrlo vjerojatno povezana s eng. *solutal convection*. Bazirajući se na tom mehanizmu, male količine čestica se odvoje od prve skrutnute kore i smjeste se u sredini uzrokujući makrosegregaciju. Čestice imaju veću gustoću zbog manjeg udjela Mg i nađu se u dnu meniskusa zbog gravitacije. Mogu se vidjeti male pozitivne segregacije Mg blizu površine ingota [52]. To se objašnjava zbog prisutnosti bogatije taline otopljenim česticama unutar međudendritnih kanala koji su blizu površine tijekom skrućivanja [51]. Zbog stezanja prilikom skrućivanja, talina s većom koncentracijom dalje od površine se „uvlači“ natrag u kanale te skrućuju s većom koncentracijom Mg što rezultira pozitivnom segregacijom Mg bliže površini.

Slično kao i Mg, Mn također pokazuje negativnu segregaciju u sredini te pozitivnu segregaciju između sredine i površine. No, suprotno od Mg, Mn pokazuje negativnu segregaciju na samoj površini bloka, za razliku od prethodno provedenih istraživanja. Cr pozitivno segregira u sredini, ne segregira uopće između sredine i površine te negativno segregira na površini ingota [52].



**Slika 12. Raspodjela relativnih koncentracija različitih legirnih elemenata koji su funkcija udaljenosti od sredine ingota [52]**

Zaključuje se da su segregacije glavnih legirnih elemenata posljedica toka taline i odvajanja otopljenih elemenata između taline i krutine tijekom skrućivanja [52].

Konvekcija utječe na obrasce segregacija u ovisnosti o smjeru toka taline. Prirodne konvekcije koje se događaju u meniskusu bloka lijevanog DC postupkom povećavaju pozitivne segregacije u sredini. Postoji direktna korelacija između geometrije meniskusa (na koju utječu procesni parametri) i stupnja makrosegregacija. Prijenos krutih zrna u meniskus doprinosi negativnim inverznim segregacijama u sredini. Sveukupni obrasci ponašanja makrosegregacija su kompleksna kombinacija različitih mehanizama na koje utječu sastav i procesni parametri. U principu je moguće dobiti pozitivne ili negativne segregacije u sredini za širok spektar različitih veličina proizvoda kontrolom brzine lijevanja, koja utječe na oblik meniskusa i tako na obim stezanja i toka konvekcije i samog formiranja i transporta plutajućih zrna [51]. Moguće je smanjiti količinu makrosegregacija smanjenjem debljine bloka i usporavanjem brzine lijevanja [52].

Stupanj makrosegregacije u leguri je uvjetovan, kako je navedeno, dimenzijom bloka, načinom lijevanja i vrstom i količinom legirnih elemenata. Specifičnost kod DC postupka je pojava makrosegregacija i vrućih pukotina, a pojava tih grešaka povezana je s procesom skrućivanja [36].

## **2.5. PROCES HOMOGENIZACIJE ALUMINIJSKIH LEGURA U INDUSTRIJI**

Homogenizacija je postupak izjednačavanja sastava „jezgrene strukture“, a provodi se pomoću difuzije u čvrstom stanju. Pri sobnoj temperaturi difuzija je spora te se stoga legura zagrijava na temperaturu malo ispod solidus linije. Tako je pri višim temperaturama difuzija brža i homogenizacija nastupa unutar relativno kratkog vremena. Lijeване legure poprimaju ujednačen sastav kad se atomi metala gibaju iz područja više u područje niže koncentracije [41]. Tako se na aluminijskim legurama namijenjenima gnječenju često prije procesa istiskivanja ili valjanja, provodi toplinska obrada homogenizacijom.

Homogenizacija se provodi prvenstveno u svrhu uklanjanja mikrosegrecija [53]. Također se uklanjaju niskotaljivi eutektici, razne čestice i segregacijski gradijenti zbog kojih

nastaju područja s niskim temperaturama taljenja i zaobljuju se čestice s oštrim rubovima (intermetalni spojevi na bazi Fe). Sprječava se nastajanje sekundarnih čestica (disperzoida) radi kontrole veličine zrna tijekom istiskivanja ili valjanja te se legirni elementi ravnomjerno raspoređuju u krutoj otopini prije nekog od postupaka naknadne obrade [36]. Također se homogenizacijom mogu smanjiti zaostala unutarnja naprezanja koja su ostala kao posljedica iznimno velikog temperaturnog gradijenta tijekom skrućivanja. No, ako su ta unutarnja naprezanja pri ili iznad kritične razine potrebne za rast zrna, formirat će se velika zrna tijekom visokotemperaturne toplinske obrade [53]. U industriji proces homogenizacije aluminijskih legura odvija se u tri stupnja: zagrijavanje materijala, držanje materijala na visokim temperaturama i hlađenje materijala.

### Zagrijavanje materijala

Zagrijavanje započinje pri sobnoj temperaturi kad je kruta otopina prezasićena. Prve reakcije koje se počinju odvijati su nukleacija i rast Fe, Mn i Mg<sub>2</sub>Si precipitata. Precipitati se ponovno otapaju pri višim temperaturama, no mogu poslužiti kao nukleusi drugim česticama [53]. Disperzoidi koji sadrže željezo, krom, mangan i cirkonij „preživljavaju“ homogenizaciju, no velik dio tih čestica se uspije otopiti prije nego što se postigne temperatura držanja [36].

### Držanje materijala na visokim temperaturama

Glavne reakcije tijekom ove faze postupka su okrupnjavanje disperzoida, sferoidizacija neotopljenih čestica i reakcija  $\beta\text{-AlFeSi} \rightarrow \alpha\text{-AlFeSi}$  koja je iznimno važna jer  $\beta$ -faza ima nisku razinu duktilnosti pri visokim temperaturama [41]. Niže temperature se koriste kad se želi postići veća gustoća disperzoida Cr, Mn i Zr [28]. Također se tijekom ove faze postupka usklađuju koncentracijski gradijenti na razini zrna, tj. dendrita. Homogenizacija se ustvari odvija na razini koncentracijskih gradijenata na rubovima dendrita te ona smanjuje koncentraciju u područjima s visokovolumnim precipitatima. Tako se ustvari otapaju čestice koje su se formirale tijekom prethodnog postupka zagrijavanja. Visoka temperatura malo ispod točke taljenja je odabrana za ovu fazu da se smanji vrijeme homogenizacije. Također može doći do lokalnog taljenja koje će uzrokovati nastajanje grešaka u mikrostrukтури legure poput praznina, pukotina i mjehurićavosti prilikom naknadnog istiskivanja materijala. Odvojena područja se mogu taliti pri nižim temperaturama od likvidus temperature.

### Hlađenje

Pri hlađenju dolazi do ponovne precipitacije čestica koje su se otopile u prethodnom postupku. Konačna veličina Mg<sub>2</sub>Si, Fe, Mn i Cr čestica je važna za ponovnu rekristalizaciju ili kontrolu veličine zrna tijekom naknadnog toplog valjanja i potpomažu dobrim konačnim mehaničkim svojstvima. Da bi se ove čestice mogle otopiti prilikom naknadne obrade, čestice moraju biti dobro i sitno raspoređene u leguri [53].

Najčešće korištene aluminijske legure pripadaju aluminijskom kutu AlMgSiMn(+Cu) faznog dijagrama gdje je ograničen broj stabilnih intermetalnih faza. Tablica 7 prikazuje najčešće pojavljivanje čestice pri povišenim temperaturama homogenizacija legura serije 5xxx [36].

**Tablica 7. Najčešće pojavljivanje čestice pri povišenim temperaturama homogenizacije legura serije 5xxx [36]**

| Serija 5xxx<br>(AlMg) | Mn, Fe čestice                                     | Mg, Si, Cu čestice |
|-----------------------|--|--------------------|
|                       | $Al_6(Mn,Fe)$                                      | $Al_8Mg_5$         |
|                       | $Al_3Fe$   | $Mg_2Si$           |
|                       | $\alpha-Al(Mn,Fe)Si$<br>(kubična ili heksagonalna) | AlCuMg             |

Tablica 8 prikazuje glavne reakcije nukleacije, rasta i otapanja za vrijeme homogenizacije kod legura serije 5xxx. Prilikom prvog stadija zagrijavanja nukleira nekoliko metastabilnih faza, no toliko su male da se ne mogu uočiti optičkim ili elektronskim mikroskopom, nego se mogu detektirati jedino transmisivskim elektronskim mikroskopom (TEM). Pri otprilike 400 °C vide se sekundarne čestice na bazi Mg, Si i Cu. Čestice na bazi Fe i Mn vidljive su na TEM-u pri 400-500 °C [36].

**Tablica 8. Promjene u mikrostrukturi za vrijeme homogenizacije 5xxx legura [36]**

| Serija 5xxx<br>(AlMg) | Zagrijavanje  | Držanje  | Hlađenje                                       |
|-----------------------|---|--|--|
|                       | Otapanje ili taljenje $Al_3Mg_2$ , parcijalno otapanje $Mg_2Si$ . | Difuzija Mn i Si.<br>Otapanje $Al_3Mg_2$ i djelomično $Mg_2Si$ . | Valjanje. Nešto precipitacije.<br>Deformacija. |



### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovog rada bio je utvrditi homogenost blokova aluminijske legure EN AW-5083 lijevanih na liniji za lijevanje polukontinuiranim vertikalnim postupkom izravnog hlađenja vodom (eng. *Vertical Direct Chill*, VDC), s aspekta mikrostrukturnih i vlačnih svojstava. Ispitivanja su provedena na osnovu statističkog plana pokusa „latinski kvadrat“ na 6 aluminijskih blokova (šarže 3157-3163) u lijevanom stanju koji su izliveni u bivšoj ljevaonici Tvornici lakih metala TLM Šibenik, sadašnji IMPOL-TLM d.o.o. Ovisno o mjestu uzimanja uzoraka u bloku brzina hlađenja će različito utjecati na promjenu broja zrna po jedinici ispitivane površine i vlačna svojstva.

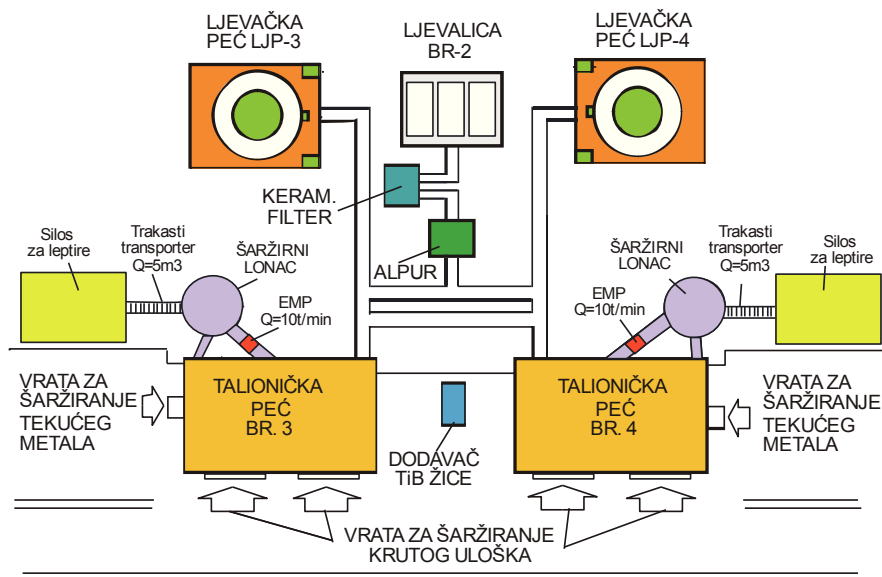
#### 3.1. LIJEVANJE BLOKOVA DC POSTUPKOM

Proizvodnja lijevanih blokova kao poluproizvoda predstavlja početnu, ali i najvažniju fazu cjelovitog tehnološkog procesa izrade valjanih i prešanih proizvoda od aluminijskih legura, budući da se sve nepravilnosti ili greške u primarno lijevanom materijalu višestruko reflektiraju na kvalitetu konačnog proizvoda. Poznavanje tehnologije lijevanja te odabiranje optimalnih parametara lijevanja poluproizvoda će u konačnici povoljno utjecati na dobivanje željenih strukturno - mehaničkih svojstava. Ono što je specifično za industrijsku proizvodnju, a vrijedi i za ljevaonicu TLM d.d. Šibenik su posebne upute u pogonu za lijevanje i strojnu obradu, specifične za svaku aluminijsku leguru. U tablici 9 su navedeni posebni zahtjevi za lijevanje blokova aluminijske legure EN AW-5083.

**Tablica 9. Posebne upute za lijevanje aluminijskih blokova legure EN AW-5083**

| Uputa za lijevanje EN AW-5083                                   | Zahtjev  |
|---|--|
| obavezni sastav šarži   | - primarni aluminij 50-75% (najviše poluge 99,7%)<br>- tehnološki otpadak 25-50% |
| ciljana količina magnezija                                      | 4,3 ± 0,1%   |
| zahtijevana koncentracija natrija                               | < 5 ppm  |
| ostali elementi   | prema postojećim tehnološkim uputama   |
| dolegiranje   | dodavanje magnezija preko šaržirnog lonca EMP,<br>ostatak u talioničku peć       |
| temperatura taline u ljevačkoj peći neposredno prije rafinacije | 715 - 720 °C   |
| trajanje rafinacije s dušikom u ljevačkoj peći                  | 15 min   |
| ukupna količina dodanog berilija u ljevačkoj peći               | 9 kg   |
| količina dodanog modifikatora AlTi5B1 u ljevačkoj peći          | 1 pločica (otprilike 9 kg)   |
| temperatura taline tijekom lijevanja                            | receptura / u granicama ± 2 °C   |
| mjerenje naplinitosti taline                                    | tijekom svakog lijevanja, ispred i iza ALPUR-a                                   |

Blokovi legure EN AW-5083 lijevani su na liniji za lijevanje koja primjenjuje tehnologiju PECHINEY, slika 13.



**Slika 13. Shematski prikaz postupka izrade blokova polukontinuiranim vertikalnim postupkom lijevanja, VDC postupak [8, 36]**

Linija za lijevanje, prikazana na slici 13, sastoji se od: dvije talioničke peći, sustava za ubacivanje tehnološkog otpada u talioničke peći, dvije elektromagnetske pumpe (EMP), automatskog dodavača žice za modifikaciju, sustava žljebova za transport taline, dvije ljevačke peći, sustava za otplinjavanje (ALPUR), keramičkog filtra, lijevalice, sustava za automatsko upravljanje procesom. Tehnološki proces započinje dovozom krutog uloška. Osnovni materijal uloška je aluminij koji se sastoji od primarnog krutog elektrolitičkog aluminija (poluge (A5) ili T-blokovi za pretaljivanje) i sekundarnog aluminija (kruti tehnološki otpad: otpiljci, svitkovi, limovi itd.). Nakon što se doveze kruti uložak slijedi ulaganje istog u talioničke peći, slika 14.

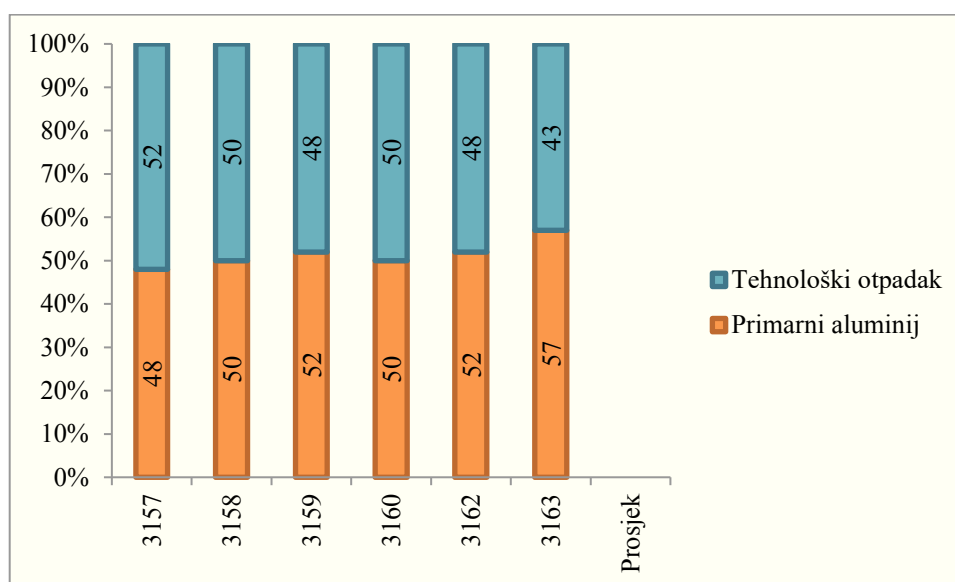


**Slika 14. Talionička peć**

U tablici 10 dana je struktura uloška iz koje se vidi da se udio primarnog aluminija kreće od 47,6% do 57,9%, dok je udio sekundarnog aluminija (tehnološki otpad) od 43,9% do 52,4%, što je u zadanim granicama prema tablici 10. Glavne komponente tehnološkog otpada su legure EN AW-1050, EN AW-5754, EN AW-5049 i EN AW-5083. Da bi se dobili što kvalitetniji blokovi legure EN AW-5083, potrebno je da sve komponente strukture uloška (uključujući i čiste metale i predlegure) budu provjerene kvalitete. Također se na slici 15 vidi udio primarnog i sekundarnog aluminija po svakoj ispitivanoj šarži.

**Tablica 10. Struktura uloška**

| ŠARŽA | POLUGE - PRIMARNI AI |       |       | TEHNOLOŠKI OTPADAK | Σ    |
|-------|----------------------|-------|-------|--------------------|------|
|       | 99,7%                | 97%   | Σ     |                    |      |
| 3157  | 3 t                  | 7 t   | 10 t  | 11,0 t             | 21 t |
|       | 14,0%                | 33,0% | 48,0% | 52,0%              | 100% |
| 3158  | 6 t                  | 5 t   | 11 t  | 11 t               | 22 t |
|       | 27,0%                | 23,0% | 50,0% | 50,0%              | 100% |
| 3159  | 4 t                  | 7 t   | 11 t  | 10 t               | 21 t |
|       | 19,0%                | 33,0% | 52,0% | 48,0%              | 100% |
| 3160  | 4 t                  | 7 t   | 11 t  | 11 t               | 22 t |
|       | 18,0%                | 32,0% | 50,0% | 50,0%              | 100% |
| 3162  | 4 t                  | 7 t   | 11 t  | 10 t               | 21 t |
|       | 19,0%                | 33,0% | 52,0% | 48,0%              | 100% |
| 3163  | 4 t                  | 8 t   | 12 t  | 9 t                | 21 t |
|       | 20,0%                | 37,0% | 57,0% | 43,0%              | 100% |



**Slika 15. Udio primarnog i sekundarnog aluminija po šaržama za aluminijску leguru EN AW-5083**

Prva faza je taljenje krutog uloška (primarni aluminij) i/ili aluminijskog otpada (sekundarni aluminij) koji se miješaju u plamenoj talioničkoj peći pri temperaturi 760 - 850 °C.

Dodavanjem sredstva za legiranje (čisti metali i predlegure) ovako pripremljenom metalu dobivaju se aluminijske legure za specifične konačne proizvode. I čisti metali (kao što su magnezij, mangan, silicij, željezo i dr.) i predlegure (npr. AlMn 80% i AlCr 75%) dodaju se u svrhu oplemenjivanja materijala te za poboljšanje mehaničkih i tehnoloških svojstava.

Kao čisti magnezij pri proizvodnji AlMg legura upotrebljava se magnezij čistoće 99,8%, sa sadržajem pratećih nečistoća silicija, željeza, bakra i nikla manjim od 0,2%. Viši sadržaj ovih elemenata povećava sklonost koroziji magnezija. AlMg predlegura dodaje se u lonac za šaržiranje i ponekad vrlo male količine u ljevačku peć. U svrhu smanjenja odgora magnezija i bolje kvalitete površine konačnog proizvoda (isključivo pri proizvodnji blokova legura skupine 5000) provodi se legiranje berilijem i to dodatkom predlegure s 5% berilija

(AlBe 5%) u ljevačku peć. „Tajna“ je u činjenici da atomi berilija imaju veću brzinu difuzije od atoma magnezija te „osvoje“ površinu taline i tako onemogućuje atomima kisika iz zraka da stupe u kontakt s magnezijem i time sprečavaju oksidaciju taline (vrijedi i za površine krutih proizvoda).

Predlegure AlMn 80% i AlCr 75% dodaju se u talioničku peć. Uobičajeno se legira s 0,003 do 0,01 % Be. Količine dodanih predlegura za svaku šaržu prikazane su u tablici 11. U talioničkim pećima se, uz taljenje metalnog uloška, provodi i ujednačavanje kemijskog sastava odstranjivanjem plinova, metalnih i nemetalnih uključaka i oksida. Uz tekući metal i dimne plinove, u ovom dijelu tehnološkog procesa nastaje i metalna troska koja se dalje prerađuje u TLM-u d.d.

**Tablica 11. Dolegiranje taline aluminijske legure EN AW-5083**

| ŠARŽA | AlMn 80% | AlMg 100% | AlCr 75% | AlBe 5% | Σ      |
|-------|----------|-----------|----------|---------|--------|
|       | (Mn)     | (Mg)      | (Cr)     | (Be)    | -      |
|       | [kg]     |           |          |         |        |
| 3157  | 50,0     | 850,0     | 20,0     | 9,0     | 929,0  |
|       | 40,0     | 850,0     | 15,0     | 0,5     | -      |
| 3158  | 100,0    | 890,0     | 10,0     | 9,0     | 1009,0 |
|       | 80,0     | 890,0     | 7,5      | 0,5     | -      |
| 3159  | 40,0     | 760,0     | 15,0     | 9,0     | 824,0  |
|       | 32,0     | 760,0     | 11,3     | 0,5     | -      |
| 3160  | 20,0     | 570,0     | 10,0     | 9,0     | 609,0  |
|       | 16,0     | 570,0     | 7,5      | 0,5     | -      |
| 3162  | 60,0     | 750,0     | 15,0     | 9,0     | 834,0  |
|       | 48,0     | 750,0     | 11,3     | 0,5     | -      |
| 3163  | 20,0     | 10,0      | 710,0    | 9,0     | 749,0  |
|       | 16,0     | 10,0      | 532,5    | 0,5     | -      |

Na stražnjem zidu svake od navedenih talioničkih peći nalazi se po jedna elektromagnetska pumpa, slika 16 a) s pripadajućim loncem za ulaganje i transporterom za šaržiranje vlastitog sipkog krutog uloška („leptiri“). Funkcija elektromagnetske pumpe je prisilno stavljanje u protok tekućeg metala kroz zatvoreni sustav cjevovoda. Miješanje taline u peći veoma je važno jer osigurava homogenost taline, odnosno ujednačenost njezine temperature po cijelom njenom volumenu i ujednačenost kemijskog sastava u svakom njenom dijelu.

Nakon obrade taline u talioničkoj peći provodi se analiza kemijskog sastava. Ako postotak kemijskih elemenata ne zadovoljava standard, radi se dodatno legiranje. Elementi koji se smatraju nečistoćama, za određenu leguru moraju biti ispod dozvoljenih vrijednosti, a elementi koji su legirajući za tu leguru, moraju biti unutar tolerancija propisanih standardom. Kada se u talioničkoj peći postigne precizno kontroliran kemijski sastav legure, njena homogenost i odgovarajuća temperatura, tekući metal se, sustavom žljebova za transport taline, slika 16 b) (prije ponovne upotrebe se moraju zagrijati na određenu temperaturu kako se talina ne bi skrutnula u njima, slika 16 c), prelijeva u ljevačke peći, slika 16 d). Žljebovima su obje talioničke peći spojene s obje ljevačke peći, a samo usmjeravanje taline provodi se pomoću pregrada. U ljevačkim pećima, provodi se daljnja dorada slitine: rafinacija dušikom (vrijeme trajanja 15 min), obrada taline solima, dodatno legiranje (ako se u talioničkim

pećima nije uspjelo postići odgovarajuću koncentraciju legirnih elemenata) i cijepljenje TiB cjepivom u obliku poluga.



a)



b)



c)



d)

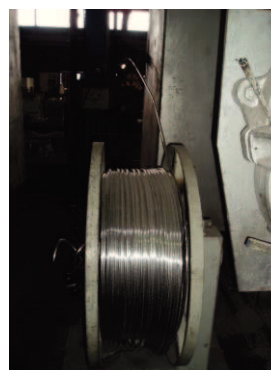
**Slika 16. Proces lijevanja aluminijske legure EN AW-5083**

*a) elektromagnetska pumpa, b) sustav žljebova,  
c) zagrijavanje žljebova, d) ljevačka peć*

Nakon što se kemijskom analizom „pećne probe“ ustanovi početni sadržaj titana u talini, slijedi dodatak sredstva za usitnjavanje zrna - predlegure u obliku polugica AlTi5B u ljevačku peć neposredno prije lijevanja, dok se završno dolegiranje do željene količine titana (i bora) obavlja „on-line“ postupkom - kontinuiranim dodavanjem ovog sredstva u obliku žice pomoću automatskog dodavača žice u žlijeb neposredno ispred ALPUR-a, slika 17 a) i b).



a)



b)

**Slika 17. Sredstva za usitnjavanje zrna**

*a) u obliku polugica, b) u obliku žice*

Sredstvo za usitnjavanje zrna u obliku žice je također predlegura aluminija na bazi titana i bora u obliku žice, oznake AlTi5B. Ona sadrži čestice  $Al_3Ti$  i  $TiB_2$  koje su neophodne u mehanizmu nukleacije, tj. pri stvaranju što većeg broja klica, budućih jezgri kristalnih zrna. Rast jezgri ljevačkog zrna događa se samo na nekim od dodanih čestica u talini. Kako je njihov rast jako ovisan o vremenu koliko dugo predlegura stoji u kontaktu s talinom, za djelotvornost i postizanje maksimalno mogućeg broja zrna u konačnom odljevku jako važan utjecaj ima mjesto gdje se predlegura dodaje. Predlegura u obliku žice dodaje se u žlijeb taline neposredno ispred ALPUR-a te se smatra da ta lokacija osigurava optimalno vrijeme za njezino efikasno djelovanje. Količina žice ima značajan utjecaj i određuje se brzinom dodavanja. Manjak  $TiB_2$  čestica manifestira se nedovoljnim brojem kristalnih zrna u odljevku, dok višak smanjuje plastičnost, povećava poroznost tankih folija, povećava broj pruga na površini profila te oštećuje radne površine valjaka i alata. Količina dodanog sredstva za usitnjavanje u obliku AlTi5B žice i polugica za svaku pojedinačnu šaržu iznosi 2,03 - 2,06 kg/t Al, tablica 12. Vrijednosti brzine žice predstavljaju prosječne vrijednosti postignute pri dužinama blokova od 20 cm, 1 m, 2 m, 3 m i 4 m. Karakteristike polugica i žice dane su u tablici 13.

**Tablica 12. Količine dodanog sredstva za usitnjavanje u obliku Al-Ti-B žice i Al-Ti-B polugica pri lijevanju legure EN AW-5083**

| ŠARŽA          | ŽICA     |        |       |        | POLUGICE |        | Σ     |           |
|----------------|----------|--------|-------|--------|----------|--------|-------|-----------|
|                | [cm/min] | [m]    | [kg]  | [kg/t] | [kg]     | [kg/t] | [kg]  | [kg/t Al] |
| <b>3157</b>    | 161,40   | 182,30 | 36,50 | 1,60   | 9,00     | 0,40   | 45,50 | 2,03      |
| <b>3158</b>    | 159,10   | 181,40 | 36,30 | 1,70   | 9,00     | 0,40   | 45,30 | 2,06      |
| <b>3159</b>    | 160,90   | 183,40 | 36,70 | 1,60   | 9,00     | 0,40   | 45,70 | 2,04      |
| <b>3160</b>    | 159,00   | 181,20 | 36,20 | 1,60   | 9,00     | 0,40   | 45,20 | 2,05      |
| <b>3162</b>    | 160,40   | 182,90 | 36,60 | 1,60   | 9,00     | 0,40   | 45,60 | 2,04      |
| <b>3163</b>    | 163,00   | 185,80 | 37,20 | 1,60   | 9,00     | 0,40   | 46,20 | 2,03      |
| <b>PROSJEK</b> | 160,62   | 182,83 | 36,57 | 1,64   | 9,00     | 0,40   | 45,57 | 2,04      |



**Tablica 13. Karakteristike modifikatora AlTi5B1**

|                   | <b>POLUGICE</b>                               | <b>ŽICA</b>          |
|-------------------|---|----------------------|
| <b>dimenzije</b>  | ~ 440 x 220 x 50 mm<br>(piramidalni segmenti) | 3/8" = 9,525 mm      |
| <b>težina</b>     | 8 – 10 kg/ploči (prosjek 9<br>kg/ploči)       | 0,2 kg/m → 5 m/kg    |
| <b>proizvođač</b> | Hoesch Metallurgie GmbH                       | Anglo Blackwells LTD |

Za vrijeme obrade taline u ljevačkoj peći rade se pripreme za lijevanje taline: grijanje žljebova, ALPUR-a, keramičkog filtra i ljevačkog grla; priprema ljevačkog stola i postavljanje parametara lijevanja. Nakon toga talina se prelijeva iz ljevačke peći u sustav žljebova za transport taline za vrijeme čega prolazi kroz sustav za otplinjavanje (*ALPUR*), slika 18 a) i keramički filter. Temperatura taline u ljevačkoj peći iznosi 715 - 720 °C.



a)



b)



c)



d)

**Slika 18. Daljnji proces lijevanja aluminijske legure EN AW-5083**

a) *ALPUR*, b) ljevalica, lijevanje u dvije žile,  
c) punjenje kokile talinom, d) startne glave - lažno dno

*ALPUR* je tip sustava za otplinjavanje koja za pročišćavanje koristi mješavinu plinova argona i klora. Sustav radi na principu da vodik difuzijom ulazi u mjehuriće argona koji putuju prema gore i tako izlazi iz taline, alkalni metali kemijski reagiraju s klorom, dok mjehurići plina zarobe uključke te ih svojim dizanjem k površini izbacuju te nastane troska. Za vrijeme postupka otplinjavanja sadržaj vodika u aluminijskim talinama se smanjio na 0,15 - 0,2 cm<sup>3</sup>/100 g Al s početnih 0,3 - 0,4 cm<sup>3</sup>/100 g Al. Kako je natrij najštetnije onečišćenje pri proizvodnji blokova iz skupine 5000, za ove legure opće namjene ne smije se pristupiti lijevanju prije nego se sadržaj natrija spusti na <10 ppm [8, 36]. Pri povišenom sadržaju natrija, već na početku toplog valjanja blokova dolazi do pojave rubnih zarezna na toploj traci koji se odstranjuju toplim škarama. Keramički filter je dodatno sredstvo pročišćavanja taline i

koristi se u slučajevima vrlo visoke kvalitete odljevaka za specijalne namjene (osigurava malen broj uključaka). Proizvode se iz keramičke pjene različite poroznosti s učinkovitosti filtriranja od minimalno 60% za veličinu uključaka od 20 µm. Talina tek sada dolazi do lijevalice, slika 18 b) gdje počinje proces skrućivanja. Lijevalice su uređaji koji se baziraju na principu polukontinuiranog bezdanog lijevanja, a sastoje se od ljevačkog stola (koji je podijeljen na dva dijela: gornji i donji dio) i ljevačkog bazena.

Razdjelnik služi za distribuciju taline te je tako moguće lijevati talinu u više žila, u dvije ili tri žile. Lijevaju se blokovi duljine do 6 m, visina im je nepromjenjiva ( $h = 520$  mm), a širine variraju: od 1180 mm - kad se lijevaju 3 bloka (3 žile), do 1310, 1430 i 1680 mm kad se lijevaju dva bloka po šarži. Ispitivani blokovi lijevali su se u dvije žile, odnosno svaka šarža je imala po dva bloka. Razdjelnici su opremljeni plamenicima koji ga zagrijevaju prije lijevanja i održavaju temperaturu taline tijekom lijevanja. Čepovi dizanjem i spuštanjem određuju protok taline, a spojeni su na sustav koji mjeri količinu taline u metalnoj kokili. Hidraulički cilindar regulira protok taline. Ispod razdjelnika taline nalazi se okvir koji sadrži kokile, slika 18 c) unutar kojih se, nakon skrućivanja nalaze izliveni aluminijski blokovi. Nakon rezanja i odbacivanja početka (duljine 200 mm) i kraja (duljine 100 mm) blokova, rezale su se ploče debljine ne manje od 30 mm na kojima će se provoditi ispitivanja izlivenih blokova.

Ispod okvira i kokila nalazi se ljevački bazen. U njemu se nalazi donji dio ljevačkog stola koji sadrži hidrauličke cilindre i lažna dna, slika 18 d). Kod modernizirane linije u TLM-u d.d. lijevaju se samo blokovi i to u kokile s laserskim upravljanjem toka i razine tekućeg metala u kokili. Postupak je visokoautomatiziran te je moguće kontinuirano nadgledanje sljedećih parametara: razina taline u kokilama (meniskus), temperatura lijevanja, protok vode za hlađenje, temperatura metala u nosu i ispusnom žlijebu, temperatura vode za hlađenje, razina vode u jami, duljina bloka i brzina dodavanje žice za usitnjavanje zrna. Tablice 14. i 15. prikazuju parametre lijevanja za ispitivane šarže kod duljine blokova od 200 i 4000 mm. To su duljine najbliže duljinama uzimanja poprečno izrezanih ploča na kojima su provedena ispitivanja u ovom radu.

**Tablica 14. Parametri lijevanja legure EN AW-5083 kod duljine blokova od 200 mm**

| ŠARŽA       |                  |                       | Razina metala u kokilama |        |        | Rashladna voda      |             |
|-------------|------------------|-----------------------|--------------------------|--------|--------|---------------------|-------------|
|             | Brzina lijevanja | Temperatura lijevanja | Blok 1                   | Blok 2 | Blok 3 | Protok              | Temperatura |
|             | [mm/min]         | [°C]                  | [mm]                     | [mm]   | [mm]   | [m <sup>3</sup> /h] | [°C]        |
| <b>3157</b> | 42,57            | 684,41                | 43,53                    | -15,77 | 43,68  | 103,13              | 23,73       |
| <b>3158</b> | 42,57            | 682,43                | 43,16                    | 0      | 43,34  | 102,92              | 24,50       |
| <b>3159</b> | 42,7             | 677,66                | 43,37                    | 0      | 43,15  | 102,86              | 25,32       |
| <b>3160</b> | 42,44            | 689,18                | 42,87                    | 0      | 43,53  | 102,86              | 24,50       |
| <b>3162</b> | 43,36            | 683,62                | 42,60                    | 0      | 43,28  | 102,71              | 22,42       |
| <b>3163</b> | 42,44            | 682,82                | 43,41                    | 0      | 41,33  | 102,92              | 22,77       |



**Tablica 15. Parametri lijevanja legure EN AW-5083 kod duljine blokova od 4000 mm**

| ŠARŽA |                  |                       | Razina metala u kokilama |        |        | Rashladna voda      |             |
|-------|------------------|-----------------------|--------------------------|--------|--------|---------------------|-------------|
|       | Brzina lijevanja | Temperatura lijevanja | Blok 1                   | Blok 2 | Blok 3 | Protok              | Temperatura |
|       | [mm/min]         | [°C]                  | [mm]                     | [mm]   | [mm]   | [m <sup>3</sup> /h] | [°C]        |
| 3157  | 42,98            | 677,66                | 38,11                    | -15,77 | 36,88  | 117,03              | 25,49       |
| 3158  | 43,36            | 679,25                | 38,23                    | 0      | 38,20  | 117,76              | 23,78       |
| 3159  | 44,00            | 671,31                | 37,65                    | 0      | 37,18  | 118,80              | 26,65       |
| 3160  | 43,24            | 675,28                | 37,33                    | 0      | 37,93  | 118,80              | 26,68       |
| 3162  | 42,95            | 674,49                | 37,24                    | 0      | 36,55  | 118,02              | 22,86       |
| 3163  | 43,36            | 682,43                | 37,30                    | 0      | 36,17  | 117,45              | 25,32       |

Iz svake od šarži - 3157, 3158, 3159, 3160, 3162, 3163, izlivena su po dva bloka jednakih dimenzija, tablica 16, gdje su  $h$  - debljina bloka,  $b$  - širina bloka i  $l$  - duljina bloka. Ispitivanja su se provele na jednom bloku od svake šarže.

**Tablica 16. Dimenzije ispitanih blokova**

| Šarža | Dimenzije bloka [mm] |      |      |
|-------|----------------------|------|------|
|       | $h$                  | $b$  | $l$  |
| 3157  | 520                  | 1680 | 4807 |
| 3158  | 520                  | 1680 | 4695 |
| 3159  | 520                  | 1680 | 4820 |
| 3160  | 520                  | 1680 | 4734 |
| 3162  | 520                  | 1680 | 4801 |
| 3163  | 520                  | 1680 | 4895 |

Kemijski sastav talina ispitanih šarži (oznake šarži: 3157, 3158, 3159, 3160, 3162, 3163) aluminijske legure EN AW-5083 određen je optičkim emisijskim spektrometrom (OES), tablica 17. Uzorci za kemijsku analizu uzimali su se tijekom lijevanja pri dužini blokova otprilike pri dužini 500 mm. U tablici se također vidi normom propisan kemijski sastav EN AW-5083 [24].

**Tablica 17. Kemijski sastav talina ispitanih šarži aluminijske legure EN AW-5083 i normom propisan sastav [24]**

| ŠARŽA                          | Kemijski sastav [%] |       |       |           |           |           |        |             |         |         |
|--------------------------------|---------------------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|--------|-------------|---------|---------|
|                                | Si                  | Fe    | Cu    | Mn        | Mg        | Cr        | Zn     | Ti          | Be      | Na      |
| <b>Ciljani sastav</b>          | <0,30               | <0,40 | <0,10 | 0,40-0,70 | 4,10-4,50 | 0,05-0,15 | <0,20  | 0,015-0,030 | 0,0045  | <0,001  |
| <b>3157</b>                    | 0,160               | 0,420 | 0,01  | 0,450     | 4,410     | 0,100     | 0,0040 | 0,0240      | 0,00335 | 0,00032 |
| <b>3158</b>                    | 0,140               | 0,350 | 0,01  | 0,445     | 4,325     | 0,070     | 0,0035 | 0,0210      | 0,0029  | 0,0002  |
| <b>3159</b>                    | 0,150               | 0,385 | 0,01  | 0,470     | 4,175     | 0,090     | 0,0050 | 0,0245      | 0,00305 | 0,00025 |
| <b>3160</b>                    | 0,16                | 0,430 | 0,01  | 0,440     | 4,390     | 0,080     | 0,0050 | 0,0240      | 0,00360 | 0,0002  |
| <b>3162</b>                    | 0,160               | 0,350 | 0,01  | 0,425     | 4,350     | 0,100     | 0,0040 | 0,0220      | 0,00280 | 0,0002  |
| <b>3163</b>                    | 0,175               | 0,375 | 0,01  | 0,435     | 4,490     | 0,090     | 0,0035 | 0,0230      | 0,00350 | 0,0002  |
| <b>Prosječna vrijednost</b>    | 0,160               | 0,388 | 0,01  | 0,441     | 4,355     | 0,087     | 0,0041 | 0,0231      | 0,00312 | 0,00024 |
| <b>EN AW-5083 (norma) [15]</b> | <0,4                | <0,4  | <0,1  | 0,4-1,0   | 4,0-4,9   | 0,05-0,25 | <0,25  | <0,150      |         |         |

Slika 19 a) prikazuje vađenje aluminijskog bloka iz bazena za hlađenje, dok se na slici 19 b) vidi lijevani aluminijski blok legure EN AW-5083 izliven na rekonstruiranoj liniji za lijevanje blokova u ljevaonici TLM d.d.



a)



b)

**Slika 19. Izliveni aluminijski blok legure EN AW-5083**  
*a) vađenje bloka iz bazena za hlađenje, b) lijevani blok*

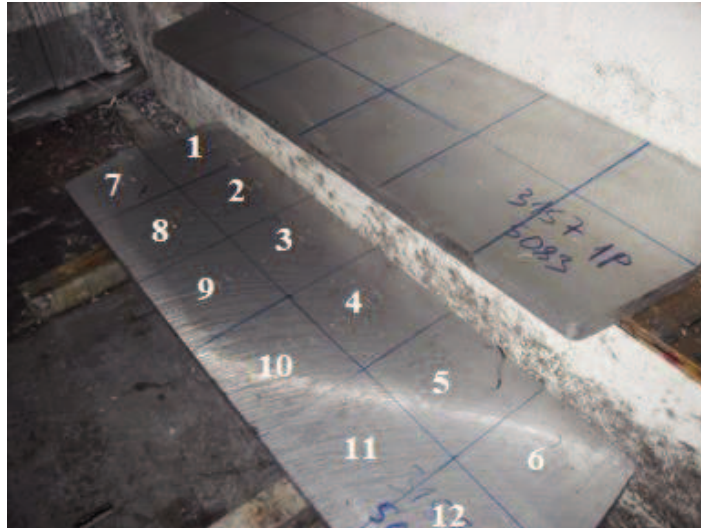
## 3.2. METODOLOGIJA ISPITIVANJA

Eksperimentalni dio ovog rada obuhvatio je ispitivanja mikrostrukture i vlačnih svojstava šest lijevanih blokova, slika 20, koji su lijevani polukontinuiranim vertikalnim postupkom izravnog hlađenja, a proizvedeni su iz 6 različitih šarži aluminijske legure EN AW-5083 (oznake šarži: 3157, 3158, 3159, 3160, 3162, 3163). Svako od ispitivanja je provedeno na statistički određenim mjestima unutar jedne ploče, prema planu pokusa „latinski kvadrat“. Ispitivanja vlačnih svojstava i kemijskog sastava izlivenih blokova provedena su u ljevaonici TLM d.d. Šibenik. Ispitivanja veličine, odnosno broja zrna po jedinici ispitivane površine provedena su na Metalurškom fakultetu, u Zavodu za procesnu metalurgiju (Laboratorij za željezo, čelik i ljevarstvo), a uključuju odgovarajuću pripremu uzoraka i njihovu obradu na metalografskom mikroskopu s digitalnom kamerom i sustavu za automatsku obradu slike AnalySiS<sup>®</sup> Material Research Lab. Statistička obrada dobivenih rezultata omogućila je praćenje razlike mikrostrukturnih i vlačnih svojstava između ploča s početka i kraja bloka. Dimenzije blokova i njihov kemijski sastav navedeni su u poglavlju 3.1.



**Slika 20. Lijevani aluminijski blokovi**

Iz šest izlivenih blokova navedenih šarži s početka i kraja svakog bloka odrezane su ploče debljine približno 30 mm. Ovisno o tome je li ploča uzimana s početka ili kraja bloka nose oznake P ili K. Slika 21 prikazuje ploču odrezanu s početka lijevanog bloka aluminijske legure EN AW-5083, šarže 3157 koja je kasnije razrezana i podijeljena na 12 manjih segmenata, a pozicije su u presjeku označene rednim brojevima 1 - 12. Ispitivanja su provedena na donjim polovicama ploča, odnosno segmentima 7 - 12. Razlog tome što je ispitivan samo donji dio ploča je što se smatra da su, obzirom na zrcalnu simetriju, uvjeti hlađenja i skrućivanja gornje i donje polovice ploča jednaki.

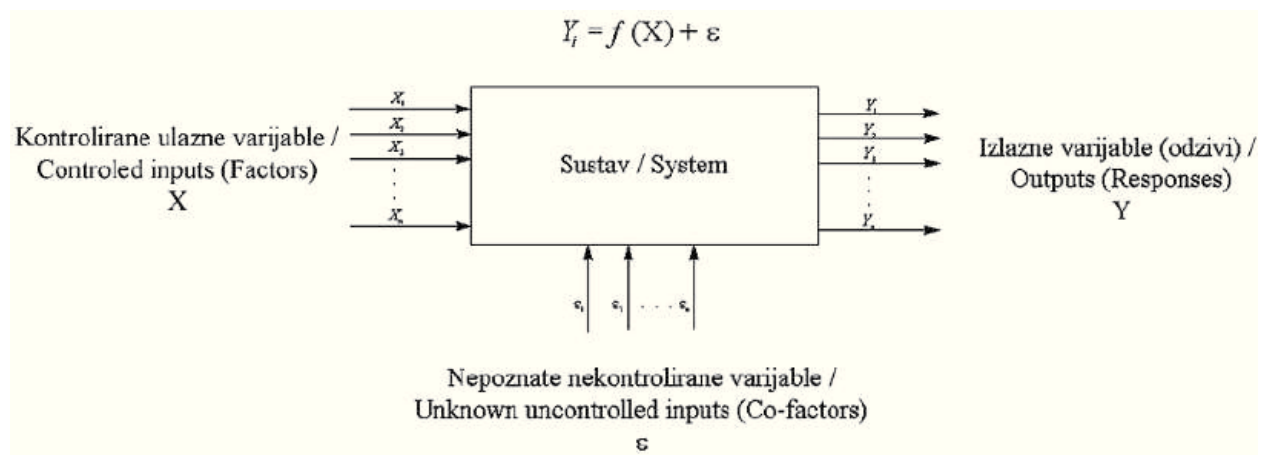


**Slika 21. Poprečni presjek bloka (ploče) uzet s početka i kraja aluminijskog bloka šarže 3157 i podjela na manje segmente (oznake 1 - 12)**

### 3.2.1. STATISTIČKO PLANIRANJE POKUSA

Istraživanja u znanosti i inženjerstvu, s naglaskom na industriju, su u velikoj mjeri empirijska. Korištenje statističkih metoda planiranja pokusa može uvelike pripomoći efikasnosti samog procesa eksperimentiranja i tako dovesti do boljih i pouzdanijih zaključaka [54]. U inženjerstvu eksperimentiranje ima veliku ulogu pri razvoju novih proizvoda, a isto tako se poboljšava i proces proizvodnje.

Metoda crne kutije se koristi za prikazivanje pristupa eksperimentiranju, slika 22. Sustav ili proces se karakteriziraju s ulaznim varijablama, koje mogu biti kontrolirane i nekontrolirane te izlaznim varijablama, odnosno odzivima sustava. Termini statistike govore da su ulazne varijable nezavisni, a izlazne zavisni čimbenici. Varijable koje nisu kontrolirane te su nepoznate uzrok su pogreške mjerenja. Konačni cilj eksperimenta je utvrđivanje uzročno-posljedične veze [54].



**Slika 22. Metoda crne kutije [54]**

Odabir vrijednosti nezavisnih varijabli ima velik utjecaj na procjenu utjecaja čimbenika. Da bi bila osigurana precizna procjena utjecaja, podaci se moraju prikupiti na

pravilan način, a on ovisi o izabranom planu pokusa. Statističke metode planiranja za cilj imaju odabir pravog izbora plana za odabrani model s maksimalnom osjetljivošću prema procjeni parametara, a tako se postiže bolja pouzdanost procjene.

Sama svrha korištenja planiranja pokusa je dobiti što više informacija o istraživanom sustavu uz minimum eksperimentalnog i financijskog angažmana. Sastoji se od sustavnog odabira strukturiranog plana u kojem ulazni čimbenici variraju na organiziran način da bi se dobili utjecaji pojedinih čimbenika na stanoviti odziv, tj. da bi se optimizirao odziv s najmanje moguće varijabilnosti [54]. Ako se uspije oblikovati adekvatan plan pokusa, obzirom na više kriterija optimalnosti, on postaje primaran zadatak u procesu eksperimentiranja. Da bi se formirao što primjereniji plan pokusa potrebno je istražiti odnos utrošenih resursa u eksperimentiranju i ostvarene preciznosti modela. Odabir modela planova pokusa je osnovni problem eksperimentiranja, a osnovni pojam koji se koristi u području eksperimentiranja kao mjera adekvatnosti dobivenog modela je preciznost. Preciznost procjene usko je vezana za pogrešku koja se pojavljuje provedbom eksperimentalnih točaka. Izražava se kroz standardnu pogrešku koja se temelji na procijenjenoj varijanci i broju ponavljanja. Standardna pogreška se može koristiti za definiranje intervala povjerenja koji daje konkretnu sliku o mogućoj varijaciji promatrane, mjerene pojave [55].

Najčešći modeli iz grupe statistički planiranih pokusa su: jednostavni komparativni planovi; slučajni blokovski, latinski kvadrat i kvadrati s više abeceda; faktorski planovi prvog reda; faktorski planovi drugog višeg reda; centralno - kompozitni pokusi [8, 56].

### **3.2.1.1. UZIMANJE UZORAKA PO PLANU POKUSA „LATINSKI KVADRAT“**

Model plana pokusa „latinski kvadrat“ spada u grupu ortogonalnih modela pokusa, tj. pripada grupi modela koje se uspješno primjenjuju u slučajevima pojava kod kojih se ne očekuju interakcije među izvorima varijabilnosti - faktorima procesa. Prilikom odabiranja adekvatne metode eksperimentiranja, uzete su u obzir dimenzije bloka (duljina, širina i visina) koje su međusobno očito mogući izvor varijabilnosti, ali bez mogućnosti interakcija - model se učinio primjerenim za utvrđivanje mogućih nehomogenosti sastava aluminijskih blokova, a shodno time i mehaničkih svojstava. Pojedine šarže lijevanja smatrale su se glavnim mogućim uzročnikom varijabilnosti i nehomogenosti u ovom slučaju - „latinski kvadrat“ je izabran kao plan pokusa baš zbog toga što omogućuje provjeru jednog izvora varijabilnosti. Pretpostavka je, sa šaržom, da bi i osnovne dimenzije odlivenog bloka (ploče) mogle biti izvor neželjenih varijabilnosti. Iz tog razloga se visina ploče (debljina bloka) i širina ploče (širina bloka) uzimaju kao još dva moguća izvora varijabilnosti. U konačnici, ovaj model se čini prikladnim za utvrđivanje eventualnih mikrostrukturnih nehomogenosti ispitivanih blokova aluminijske legure EN AW-5083.

„Latinski kvadrat“ je shema pokusa gdje se grupiranje pokusnih jedinica provodi prema dva različita kriterija ili u dva različita smjera (redovi i stupci). Svako tretiranje u svakom redu i u svakom stupcu se javlja samo jedanput. Redovi postaju „vodoravne“ repeticije, a stupci „okomite“ repeticije. Svaki red ili svaki stupac je cjelovito ponavljanje (repeticija), a time se omogućuje kontrola i procjena varijabilnosti uvjetovane različitošću između redova i između stupaca, odnosno izdvajanje tih dijelova varijabilnosti iz pogreške pokusa. Dvosmjerne repeticije su ujedno i ograničenje u primjeni - broj ponavljanja (vodoravnih i okomitih) mora biti jednak broju tretiranja pokusa [8, 61]. U matematici, „latinski kvadrat“ je ustvari matrica tipa  $n \times n$ , koja sadrži u sebi  $n$  broj elemenata koji će se pojaviti jednom u svakom stupcu i jednom u svakom retku [58]. Preporučuje se za pokuse s 5

do 8 ili maksimalno 10 tretiranja - zahtijeva se 5 - 8 - 10 ponavljanja. Preporučuje se korištenje gotovih shema [8, 57].

U danom primjeru korišten je „latinski kvadrat“ tipa  $6 \times 6$ . Rabi se 6 tretiranja što uvjetuje 6 ponavljanja, a model predstavlja shema prikazana na slici 23.

| $Y_{ijk}$        |    | ŠIRINA PLOČE (j) |      |      |      |      |      |
|------------------|----|------------------|------|------|------|------|------|
|                  |    | 1.               | 2.   | 3.   | 4.   | 5.   | 6.   |
| VISINA PLOČE (i) | 1. | 3159             | 3158 | 3157 | 3163 | 3162 | 3160 |
|                  | 2. | 3158             | 3157 | 3163 | 3162 | 3160 | 3159 |
|                  | 3. | 3157             | 3163 | 3162 | 3160 | 3159 | 3158 |
|                  | 4. | 3163             | 3162 | 3160 | 3159 | 3158 | 3157 |
|                  | 5. | 3162             | 3160 | 3159 | 3158 | 3157 | 3163 |
|                  | 6. | 3160             | 3159 | 3158 | 3157 | 3163 | 3162 |

→ slučajni izbor

} permutacije slučajnog izbora

**Slika 23. Shema „latinskog kvadrata“, n=6**

gdje su - vodoravne repeticije (redovi): *visina ploče*, tj. debljina bloka ( $i = 1 - 6$ ), okomite repeticije (stupci): *širina ploče*, tj. širina bloka ( $j = 1 - 6$ ) i tretiranja: ispitivane šarže aluminijske legure EN AW-5083 (3157, 3158, 3159, 3160, 3162, 3163).

Ovakav princip uzimanja uzoraka („latinski kvadrat“) proveden je na pločama odrezanih i s početka i s kraja izlivenih blokova gdje je 6 šarži = 12 ploča, sa segmenata 7 - 12, kao što je prikazano shemama na slikama 25 - 30 gdje je  $i$  - *visina ploče* (debljina bloka) i  $j$  - *širina ploče* (širina bloka).

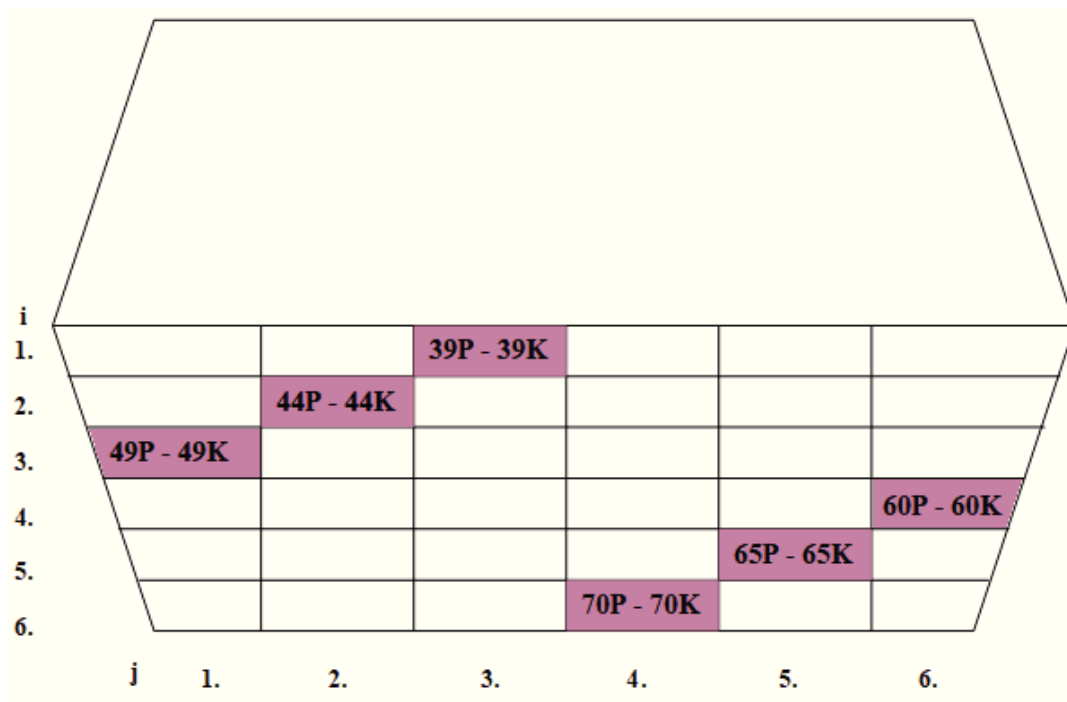
Ispitivanja su se provela na 6 segmenata: 7, 8, 9, 10, 11 i 12 koji predstavljaju stupce u shemi „latinskog kvadrata“ (*širina ploče*,  $j = 1 - 6$ ), slika 23. Da bi se dobili redovi u shemi „latinskog kvadrata“ (*visina ploče*,  $i = 1 - 6$ ), svaki ispitani segment je po visini prerezan na 6 jednakih dijelova. Tako su dobiveni manji komadi (isječci) iz kojih su uzimani uzorci za vlačna i metalografska ispitivanja te ispitivanja kemijskog sastava, što će biti opisano u poglavlju 3.2.2. i 3.2.3.

Uzorci koji su se uzeli iz ploča rezanih s početka blokova nose uz broj uzorka i oznaku P, a oni s kraja blokova nose oznaku K. Način uzimanja uzoraka za istu šaržu isti je za ploče uzete s početka i s kraja bloka, a za različite šarže uzorci su uzimani sukladno statističkom planu pokusa, prema rasporedu prikazanim u tablicama 18 - 23 i shematski na slikama 24 - 29 gdje su mjesta uzimanja uzoraka na svakom ispitanom bloku označena drugom bojom.

Za šaržu 3157, uzimanje uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja lijevanog bloka provedeno je prema rasporedu prikazanom u tablici 18 i prema shemi na slici 24.

**Tablica 18. Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3157**

| Oznaka uzorka | Visina ploče, $i$ | Širina ploče, $j$ |
|---------------|-------------------|-------------------|
| 39P - 39K     | 1.                | 3.                |
| 44P - 44K     | 2.                | 2.                |
| 49P - 49K     | 3.                | 1.                |
| 60P - 60K     | 4.                | 6.                |
| 65P - 65K     | 5.                | 5.                |
| 70P - 70K     | 6.                | 4.                |



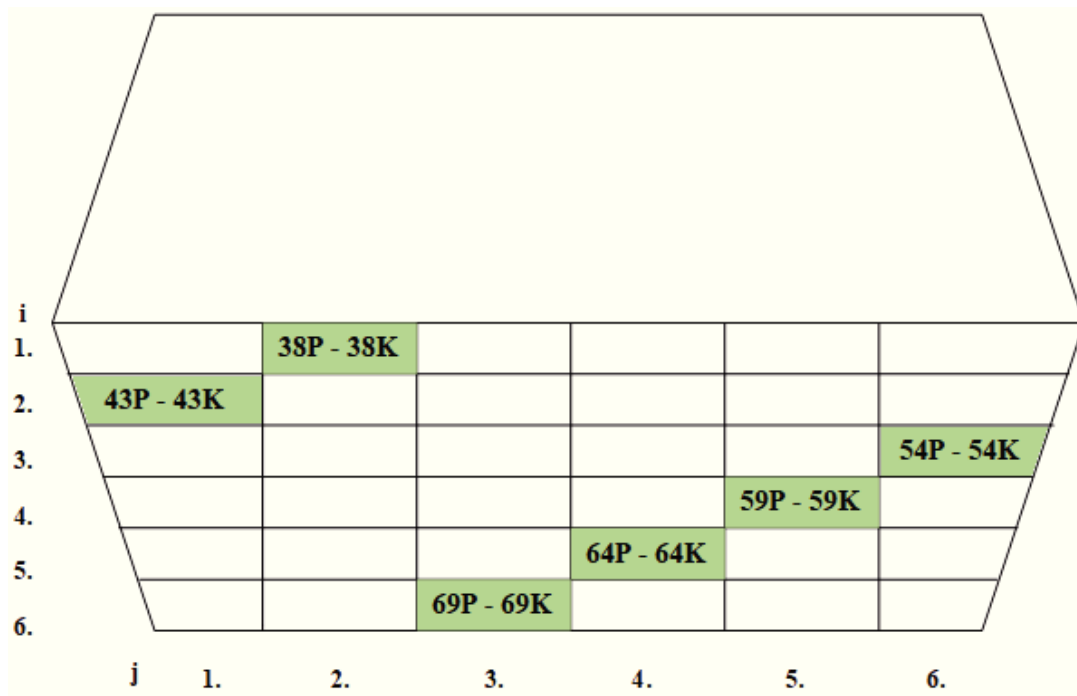
**Slika 24. Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3157**

Za šaržu 3158, uzimanje uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja lijevanog bloka provedeno je prema rasporedu prikazanom u tablici 19 i prema shemi na slici 25.

**Tablica 19. Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3158**

| Oznaka uzorka | Visina ploče, <i>i</i> | Širina ploče, <i>j</i> |
|---------------|------------------------|------------------------|
| 38P - 38K     | 1.                     | 2.                     |
| 43P - 43K     | 2.                     | 1.                     |
| 54P - 54K     | 3.                     | 6.                     |
| 59P - 59K     | 4.                     | 5.                     |
| 64P - 64K     | 5.                     | 4.                     |
| 69P - 69K     | 6.                     | 3.                     |





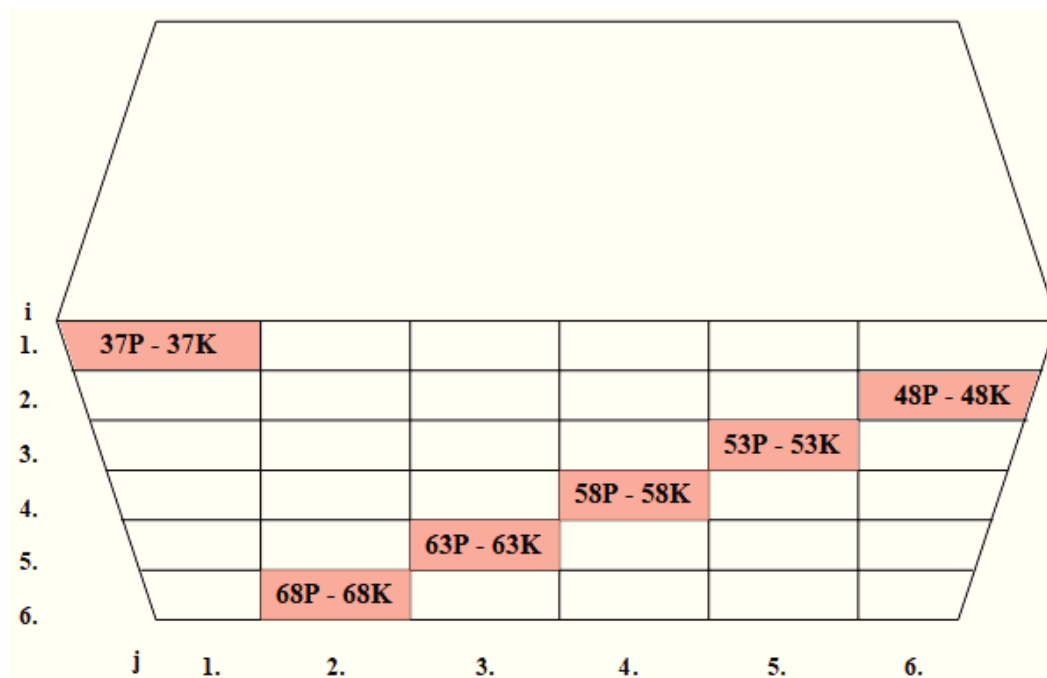
**Slika 25. Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3158**

Za šaržu 3159, uzimanje uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja lijevanog bloka provedeno je prema rasporedu prikazanom u tablici 20 i prema shemi na slici 26.

**Tablica 20. Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3159**

| Oznaka uzorka | Visina ploče, <i>i</i> | Širina ploče, <i>j</i> |
|---------------|------------------------|------------------------|
| 37P - 37K     | 1.                     | 1.                     |
| 48P - 48K     | 2.                     | 6.                     |
| 53P - 53K     | 3.                     | 5.                     |
| 58P - 58K     | 4.                     | 4.                     |
| 63P - 63K     | 5.                     | 3.                     |
| 68P - 68K     | 6.                     | 2.                     |



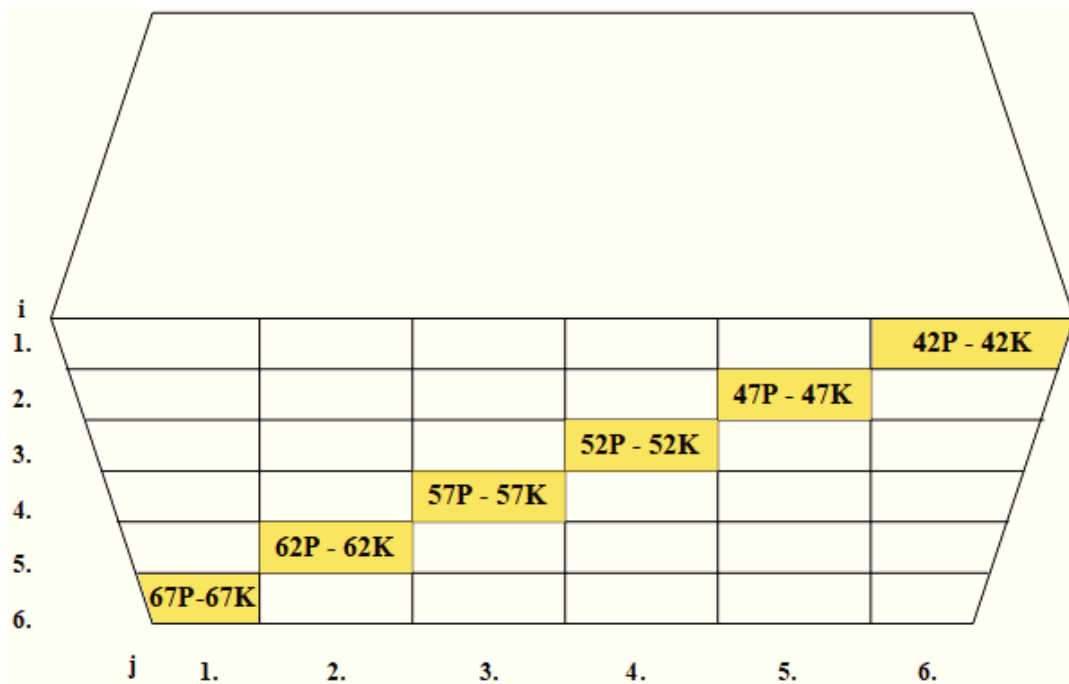


**Slika 26. Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3159**

Za šaržu **3160**, uzimanje uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja lijevanog bloka provedeno je prema rasporedu prikazanom u tablici 21 i prema shemi na slici 27.

**Tablica 21. Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3160**

| Oznaka uzorka | Visina ploče, <i>i</i> | Širina ploče, <i>j</i> |
|---------------|------------------------|------------------------|
| 42P - 42K     | 1.                     | 6.                     |
| 47P - 47K     | 2.                     | 5.                     |
| 52P - 52K     | 3.                     | 4.                     |
| 57P - 57K     | 4.                     | 3.                     |
| 62P - 62K     | 5.                     | 2.                     |
| 67P - 67K     | 6.                     | 1.                     |

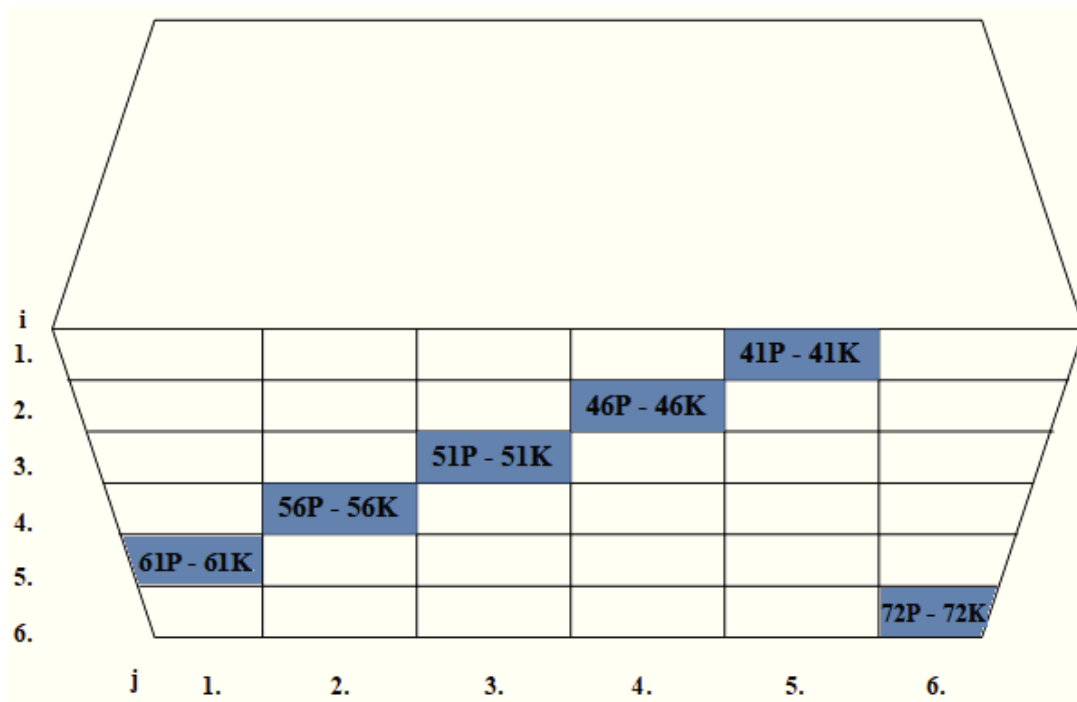


**Slika 27. Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3160**

Za šaržu **3162**, uzimanje uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja lijevanog bloka provedeno je prema rasporedu prikazanom u tablici 22 i prema shemi na slici 28.

**Tablica 22. Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3162**

| Oznaka uzorka | Visina ploče, <i>i</i> | Širina ploče, <i>j</i> |
|---------------|------------------------|------------------------|
| 41P - 41K     | 1.                     | 5.                     |
| 46P - 46K     | 2.                     | 4.                     |
| 51P - 51K     | 3.                     | 3.                     |
| 56P - 56K     | 4.                     | 2.                     |
| 61P - 61K     | 5.                     | 1.                     |
| 72P - 72K     | 6.                     | 6.                     |

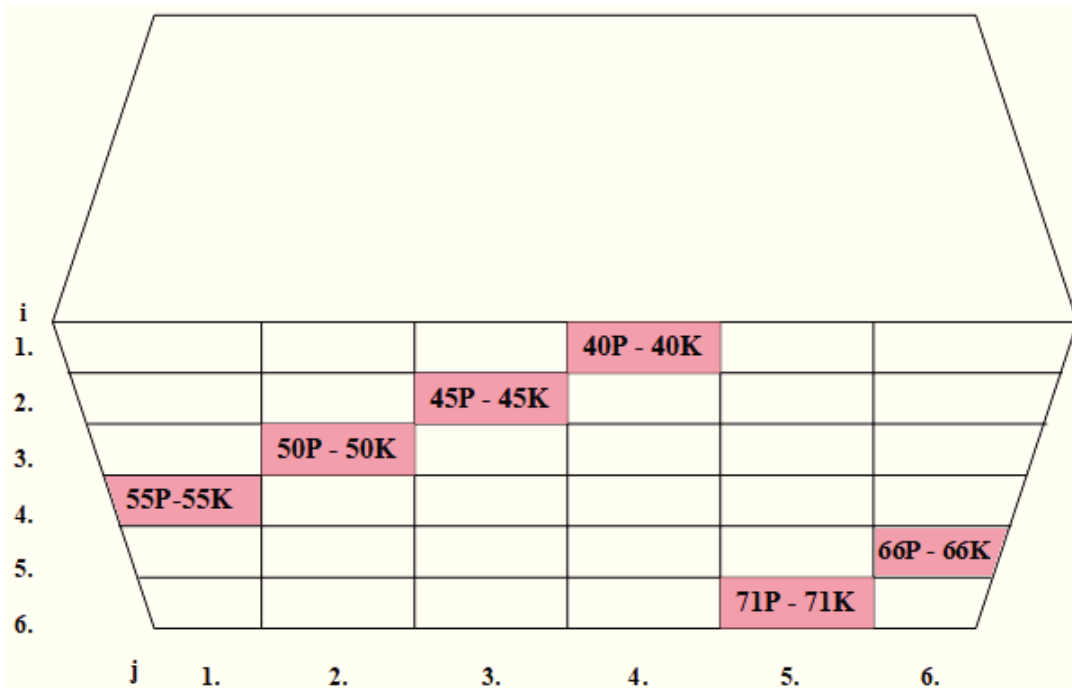


**Slika 28. Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3162**

Za šaržu 3163, uzimanje uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja lijevanog bloka provedeno je prema rasporedu prikazanom u tablici 23 i prema shemi na slici 29.

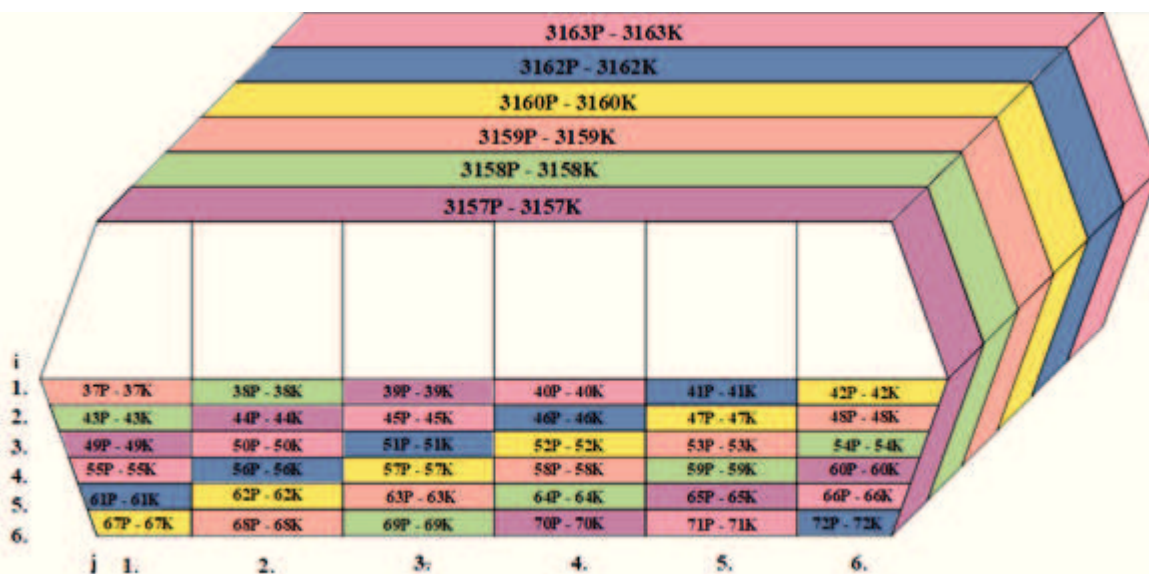
**Tablica 23. Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ s ploča uzetih s početka i kraja bloka šarže 3163**

| Oznaka uzorka | Visina ploče, <i>i</i> | Širina ploče, <i>j</i> |
|---------------|------------------------|------------------------|
| 40P - 40K     | 1.                     | 4.                     |
| 45P - 45K     | 2.                     | 3.                     |
| 50P - 50K     | 3.                     | 2.                     |
| 55P - 55K     | 4.                     | 1.                     |
| 66P - 66K     | 5.                     | 6.                     |
| 71P - 71K     | 6.                     | 5.                     |



Slika 29. Shematski prikaz uzimanja uzoraka s ploča uzetih s početka i s kraja bloka šarže 3163

U tablici 24 prikazan je cijeli prikaz uzimanja uzoraka sa svih ploča, gdje je uzimano s početka i kraja 6 ispitivanih blokova, a shematski je vidljiv na slici 30. Svaka boja predstavlja jedan ispitivani blok, odnosno šaržu.



Slika 30. Prikaz uzimanja uzoraka kroz svih 6 ispitivanih blokova

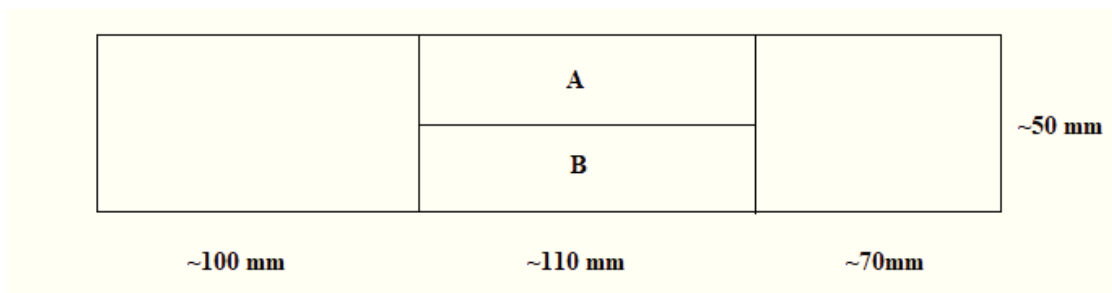
**Tablica 24. Raspored uzimanja uzoraka prema planu pokusa „latinski kvadrat“ sa svih ploča uzetih s početka i kraja 6 ispitivanih blokova**

| Oznaka uzorka | Visina ploče, <i>i</i> | Širina ploče, <i>j</i> | Šarža     |
|---------------|------------------------|------------------------|-----------|
| 37P - 37K     | 1.                     | 1.                     | 3159P - K |
| 38P - 38K     | 1.                     | 2.                     | 3158P - K |
| 39P - 39K     | 1.                     | 3.                     | 3157P - K |
| 40P - 40K     | 1.                     | 4.                     | 3163P - K |
| 41P - 41K     | 1.                     | 5.                     | 3162P - K |
| 42P - 42K     | 1.                     | 6.                     | 3160P - K |
| 43P - 43K     | 2.                     | 1.                     | 3158P - K |
| 44P - 44K     | 2.                     | 2.                     | 3157P - K |
| 45P - 45K     | 2.                     | 3.                     | 3163P - K |
| 46P - 46K     | 2.                     | 4.                     | 3162P - K |
| 47P - 47K     | 2.                     | 5.                     | 3160P - K |
| 48P - 48K     | 2.                     | 6.                     | 3159P - K |
| 49P - 49K     | 3.                     | 1.                     | 3157P - K |
| 50P - 50K     | 3.                     | 2.                     | 3163P - K |
| 51P - 51K     | 3.                     | 3.                     | 3162P - K |
| 52P - 52K     | 3.                     | 4.                     | 3160P - K |
| 53P - 53K     | 3.                     | 5.                     | 3159P - K |
| 54P - 54K     | 3.                     | 6.                     | 3158P - K |
| 55P - 55K     | 4.                     | 1.                     | 3163P - K |
| 56P - 56K     | 4.                     | 2.                     | 3162P - K |
| 57P - 57K     | 4.                     | 3.                     | 3160P - K |
| 58P - 58K     | 4.                     | 4.                     | 3159P - K |
| 59P - 59K     | 4.                     | 5.                     | 3158P - K |
| 60P - 60K     | 4.                     | 6.                     | 3157P - K |
| 61P - 61K     | 5.                     | 1.                     | 3162P - K |
| 62P - 62K     | 5.                     | 2.                     | 3160P - K |
| 63P - 63K     | 5.                     | 3.                     | 3159P - K |
| 64P - 64K     | 5.                     | 4.                     | 3158P - K |
| 65P - 65K     | 5.                     | 5.                     | 3157P - K |
| 66P - 66K     | 5.                     | 6.                     | 3163P - K |
| 67P - 67K     | 6.                     | 1.                     | 3160P - K |
| 68P - 68K     | 6.                     | 2.                     | 3159P - K |
| 69P - 69K     | 6.                     | 3.                     | 3158P - K |
| 70P - 70K     | 6.                     | 4.                     | 3157P - K |
| 71P - 71K     | 6.                     | 5.                     | 3163P - K |
| 72P - 72K     | 6.                     | 6.                     | 3162P - K |

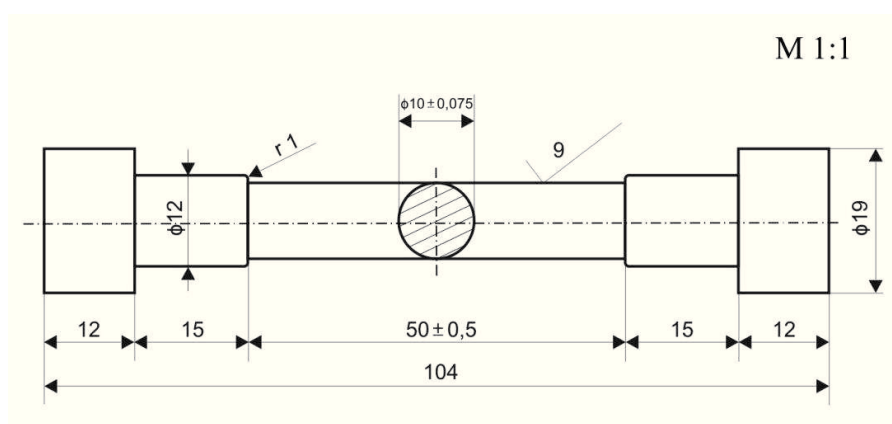
### 3.2.2. ISPITIVANJE VLAČNIH SVOJSTAVA

Na uzorcima uzetima iz blokova aluminijske legure EN AW-5083 ispitivana su vlačna svojstva. Ta ispitivanja su obuhvaćala mjerenja vlačne čvrstoće, granice proporcionalnosti i izduženja. Sa svakog odrezanog isječka - 36 komada s početka i 36 komada s kraja bloka, uzeta su dva paralelna uzorka A i B da bi se mogla provesti ispitivanja. Iz paralelnih uzoraka A i B, vidljivih na slici 31, izrađena je po jedna epruveta za vlačna ispitivanja, prema normi za statičko vlačno ispitivanje pri sobnoj temperaturi ISO 6892-1:2016 [59]. Kao rezultat uzimana je njihova srednja vrijednost. Epruvete za vlačna

ispitivanja izrađene su prema shemi na slici 32. s označenim dimenzijama. Tako dobivene epruvete, s početka i kraja ispitivanih blokova prikazane su na slici 32.



**Slika 31. Mjesto uzimanja uzoraka s isječka za vlačna ispitivanja**  
*A – mjesto uzimanja uzorka A za vlačna ispitivanja*  
*B – mjesto uzimanja uzorka B za vlačna ispitivanja*



**Slika 32. Shema epruvete za vlačna ispitivanja s naznačenim dimenzijama mjernog područja**

Vlačna ispitivanja provedena su na kidalici Roell-Korthaus AMSLER, tipa 10THZ722, maksimalne sile razvlačenja do 100 kN.

### 3.2.3. ISPITIVANJE MIKROSTRUKTURE

Nakon vlačnih ispitivanja, odrezale su se glave epruveta za vlačna ispitivanja uzetih s pozicije A. Glave su odrezane u uređaju za rezanje koji je hlađen vodom te su se dalje koristile za metalografsku analizu.

#### 3.2.3.1. METALOGRAFSKA PRIPREMA UZORAKA

Nakon što su se izrezale glave uzoraka, provedena je njihova automatska priprema – pripremila im se površina u svrhu ispitivanja na svjetlosnom mikroskopu. Automatska priprema uzoraka uključuje brušenje i poliranje te zbog toga uzorci moraju biti u obliku valjčića promjera 30 mm. Uzorci se ulažu u dvokomponentnu hladnopolarizirajuću masu Varidur 20, slika 33 a) Taj postupak ulaganja uzoraka naziva se hladnim postupkom ulaganja. Masa u praškasta:tekuća = 2:1. Visina mase u kalupima mora biti manja od visine uzoraka, slika 33 b). Nakon pripreme uzoraka slijedi postupak elektrolitičkog nagrivanja gdje se donja

površina uzorka (odnosno površina koja se brusila i polirala) elektrolitički nagriza, a gornja površina uzorka služi za kontakt kleme i uzorka da bi se ostvario protok struje kroz materijal te da dođe do reakcije. Nakon ulaganja u masu uzorci su brušeni pod mlazom vode na uređaju za automatsku pripremu uzoraka Vector LC (Buehler), slika 33. c), s brusnim papirima gradacije 180, 240, 400, 600, 800 i 1000, pod mlazom vode.



a)

b)



c)

### Slika 33. Metalografska priprema uzoraka

- a) dvokomponentna hladnopolarizirajuća masa Varidur 20
- b) ulaganje uzoraka u masu
- c) uređaj za automatsku pripremu uzoraka Vector LC (Buehler)

Brušenje je najvažnija faza pripreme uzoraka koje za cilj ima smanjiti mehanička oštećenja površine na najmanju moguću mjeru, a koja se moraju ukloniti u sljedećoj fazi poliranjem. Ovisno o gradaciji brusnog papira, uzorci su brušeni između 3 i 10 min po brusnom papiru kod sile opterećenja od 10 N i brzine okretanja rotacijskog diska 150 okr./min. Nakon brušenja na najfinijoj gradaciji uzorci se poliraju na odgovarajućoj tkanini vodenom otopinom glinice granulacije 0,3  $\mu\text{m}$ , na istom uređaju i pri istim uvjetima. Na kraju se uzorci ispiru u vodi, nakon toga u alkoholu i suše se u struji vrućeg zraka.

### 3.2.3.2. ELEKTROLITIČKO NAGRIZANJE UZORAKA

Elektrolitičko nagrivanje površine uzoraka (anodizacija) služi za otkrivanje granica zrna i za njihovu kvalifikaciju. Ono se provodi istosmjernom strujom različitih napona (10 i 20 V) i trajanja (60 do 270 s) u Barkerovom reagensu (5 ml  $\text{HBF}_4$  (48%) + 200 ml  $\text{H}_2\text{O}$ ). Anodizacija ili anodna oksidacija je postupak elektrolitskog nagrivanja da bi se nanio oksidni film na površinu metala koji je često nadgrađen - epitaksijalan, na strukture zrna.

Interferentne boje koje se dobiju funkcija su anodnog filma, a on ovisi o voltaži anodizacije, otopini i/ili strukturi prisutnoj u uzorku. Ovaj postupak omogućuje dobru razlučivost između različito obojenih zrna, gdje operater sam „namješta“ boje da bi se dobio najbolji kontrast između susjednih zrna u svrhu preciznijeg i točnijeg naknadnog mjerenja.

Uzorak se prihvaća klemom tako da mu je samo površina uronjena u otopinu za nagrivanje, slika 34. Uzorak se ponaša kao anoda, a platinska elektroda, koja je također uronjena u otopinu, se ponaša kao katoda. Nagrivena površina ispiri se vodom, nakon toga alkoholom i suši u struji vrućeg zraka.



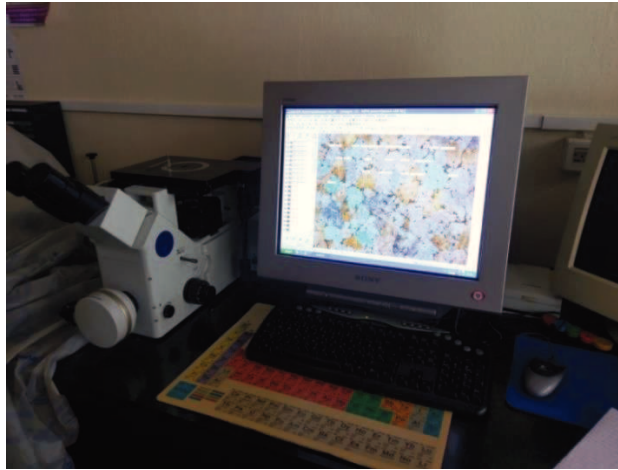
**Slika 34. Elektrolitičko nagrivanje uzoraka (aparatura)**

### **3.2.3.3. ODREĐIVANJE VELIČINE ZRNA POMOĆU SVJETLOSNOG MIKROSKOPA**

Kako je već navedeno, elektrolitičkim nagrivanjem površine uzoraka dobivaju se interferentne boje granica zrna. Granice jednog zrna određuje prisutnost različitih boja koje nastaju zbog različitog kuta upada i refleksije svjetlosti od površine zrna. Kad je obojenje zrna takvo da se mogu odrediti granice zrna, ponavljanje postupka nagrivanja prestaje te se pomoću svjetlosnog mikroskopa snima određen broj slika na kojima se, uz pomoć računala, statistički određuje prosječna veličina zrna te broj zrna po jedinici površine.

Metalografska ispitivanja provedena su na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX 51 s digitalnom kamerom Olympus DP70, i sustavom za automatsku obradu slike je AnalySIS<sup>®</sup> Materials Research Lab, s povećanjem 100x, slika 35. „AnalySIS<sup>®</sup> Materials Research Lab“ je dio „Soft Imaging Sistem's“ serije software paketa za proučavanja strukture materijala. Software automatski računa srednju duljinu presijecanja zrna  $\bar{l}$ , iz koje se linearnom aproksimacijom [60] izračuna broj zrna po jedinici ispitivane površine za  $n$  mjerenih područja,  $N_A$  [No./mm<sup>2</sup>] ili  $G$ -broj.

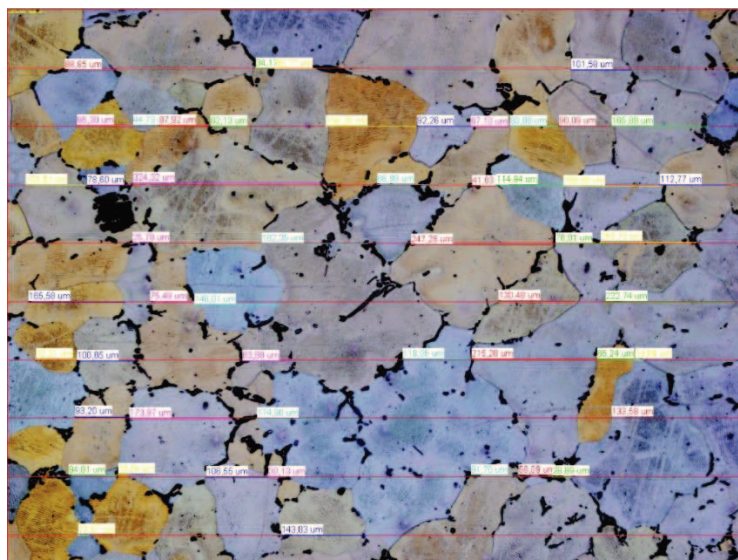




**Slika 35. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 opremljen digitalnom kamerom Olympus DP70 i programskim paketom Analysis® Materials Research Lab**

### **3.2.3.4. POLUAUTOMATSKA METODA MJERENJA VELIČINE ZRNA MJERENJEM DULJINE PRESIJEKANJA ZRNA $\bar{l}$**

Poluautomatska metoda mjerenja veličine zrna mjerenjem duljine presijecanja zrna (eng. *intercept procedure*) obuhvaća da operater ručno odredi minimalno 500 duljina presijecanja zrna da bi rezultat bio statistički opravdan. *Software* automatski računa prosječnu (srednju) duljinu presijecanja  $\bar{l}$  [ $\mu\text{m}$ ] iz koje se linearnom aproksimacijom iz norme ASTM 112-96 [60] izračuna srednji broj zrna po jedinici površine za  $n$  mjerenih područja  $\bar{N}_A$  [ $\text{N}_0/\text{mm}^2$ ] ili G - broj. Nakon nagrizanja uzoraka na njima se provodi mjerenje veličine zrna metodom mjerenja duljine presijecanja zrna, a primjer određivanja duljine presijecanja zrna uzorka 48PA iz šarže 3159P je prikazan na slici 36.

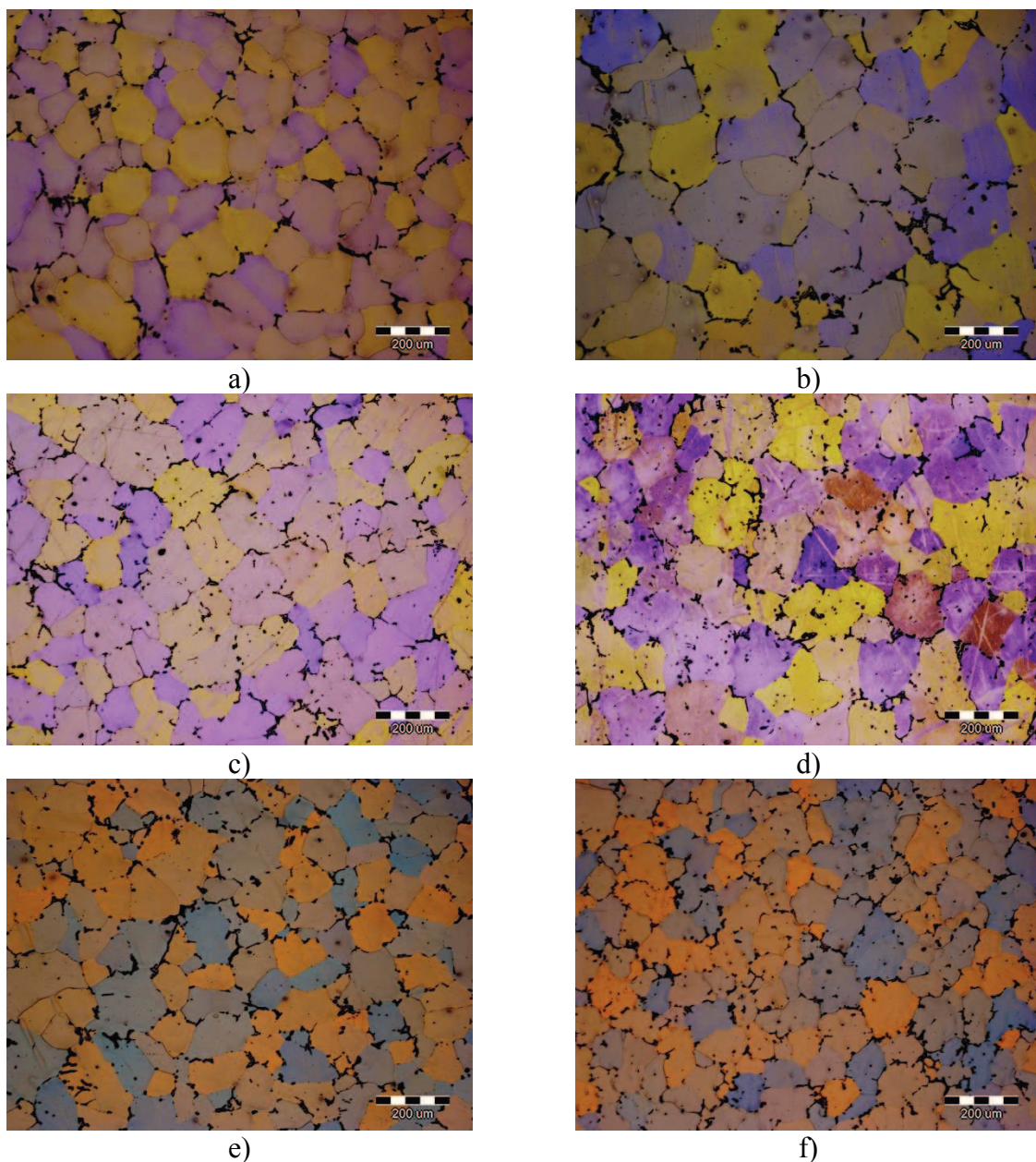


**Slika 36. Primjer određivanja veličine zrna poluautomatskom metodom mjerenja duljine presijecanja zrna na uzorku 48PA iz šarže 3159P nagriženim Barkerovim reagensom promatran pod polarizacijskim svjetlom uz dodatak tintnog filtra**

## 4. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

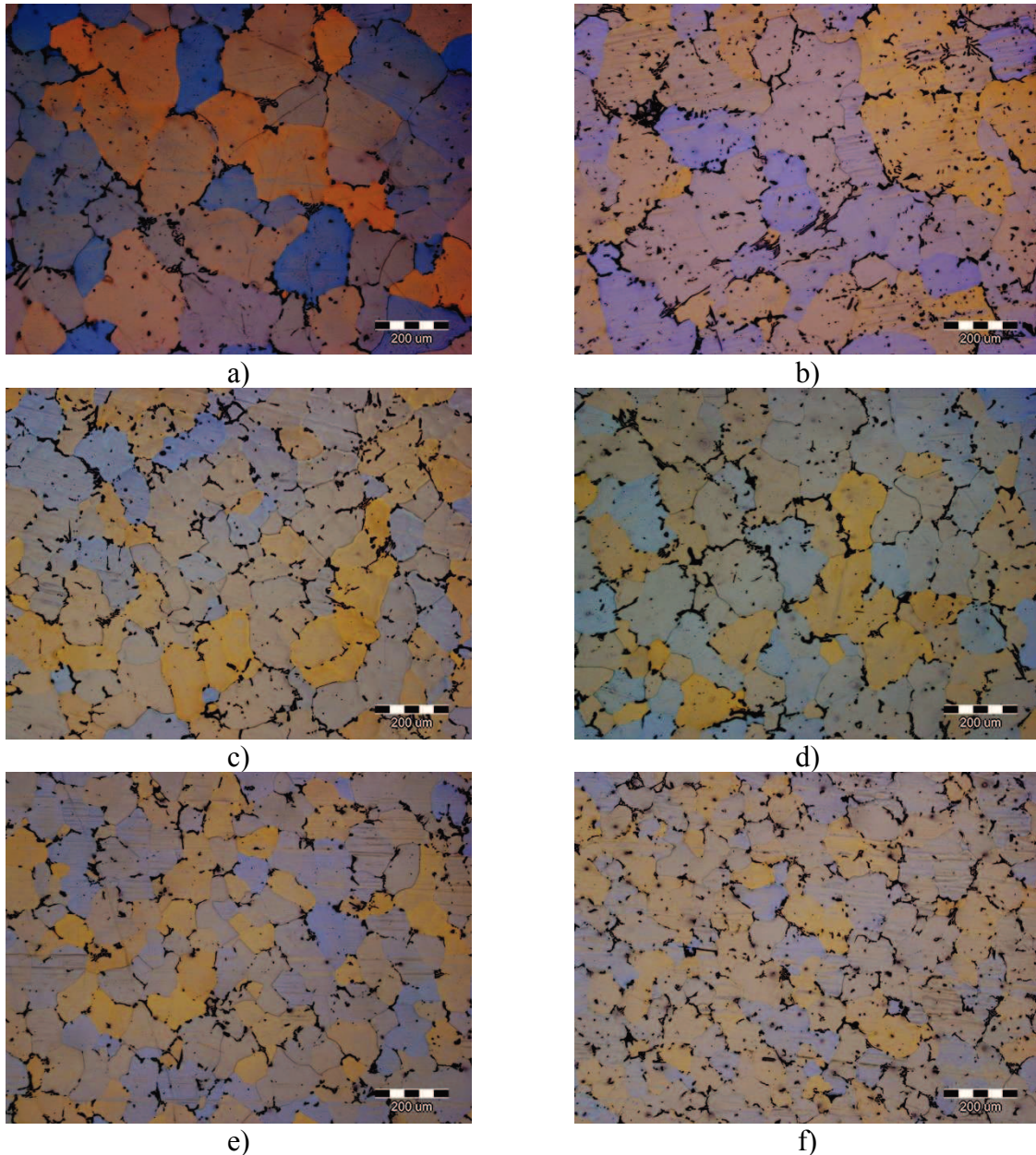
### 4.1. REZULTATI ISPITIVANJA MIKROSTRUKTURE

Na slikama 37 i 38 prikazane su mikrostrukture uzoraka uzetih s početka (39PA, 44PA, 49PA, 60PA, 65PA i 70PA) i kraja (39KA, 44KA, 49KA, 60KA, 65KA i 70KA) bloka aluminijske legure EN AW-5083 šarže 3157 nagriženih elektrolitički Barkerovim reagensom i promatrani svjetlosnim mikroskopom uz dodatak polarizacijskog svjetla i tintnog filtra.



**Slika 37. Snimke mikrostrukture uzoraka šarže 3157 aluminijske legure EN AW-5083**  
*a) uzorak 39PA, b) uzorak 44PA, c) uzorak 49PA,*  
*d) uzorak 60PA, e) uzorak 65PA, f) uzorak 70PA*





**Slika 38. Snimke mikrostrukture uzoraka šarže 3157 aluminijске legure EN AW-5083**

*a) uzorak 39KA, b) uzorak 44KA, c) uzorak 49KA,  
d) uzorak 60KA, e) uzorak 65KA, f) uzorak 70KA*

Vizualnom usporedbom slika 37 i 38 vidljivo je da se broj zrna na uzorcima uzetih iz istih šarži ponašaju slično na početku i na kraju lijevanja - broj zrna se povećava od rubova prema unutarnjem dijelu bloka što je i očekivano radi veće brzine hlađenja na rubovima bloka, odnosno ploče. Radi točne kvantifikacije provodi se mjerenje veličine, odnosno broja zrna jednom od standardiziranih metoda.

U tablicama 25 i 26 prikazani su rezultati mjerenja veličine, odnosno broja zrna uzoraka nagriženih Barkerovim reagensom dobiveni poluautomatskom metodom određivanja veličine zrna mjerenjem srednje duljine presjeka zrna svih uzoraka s početka i kraja blokova aluminijске legure EN AW-5083. U tablicama  $\bar{l}$  predstavlja srednju duljinu presijecanja u  $[\mu\text{m}]$ , iz koje se linearnom aproksimacijom [64] izračuna srednji broj zrna po jedinici ispitivane površine  $\bar{N}_A$  ili *G-broj*.

**Tablica 25. Rezultati mjerenja broja zrna po jedinici ispitivane površine  $N_A$  dobiveni poluautomatskom metodom određivanja veličine zrna mjerenjem srednje duljine presjecanja zrna za uzorke uzete s početka blokova aluminijske legure EN AW-5083**

| Oznaka uzorka | $\bar{l}$<br>[ $\mu\text{m}$ ] | Broj presjeka,<br>count | G - broj | $\bar{N}_A$<br>[No./mm <sup>2</sup> ] |
|---------------|--------------------------------|-------------------------|----------|---------------------------------------|
| 37PA          | 94,92                          | 546                     | 3,51     | 88,11                                 |
| 38PA          | 94,64                          | 543                     | 3,52     | 88,79                                 |
| 39PA          | 99,95                          | 510                     | 3,37     | 80,76                                 |
| 40PA          | 101,26                         | 563                     | 3,33     | 78,89                                 |
| 41PA          | 97,77                          | 553                     | 3,43     | 83,87                                 |
| 42PA          | 96,48                          | 680                     | 3,46     | 85,71                                 |
| 43PA          | 90,75                          | 515                     | 3,64     | 105,97                                |
| 44PA          | 108,97                         | 511                     | 3,11     | 67,89                                 |
| 45PA          | 115,74                         | 527                     | 2,94     | 59,76                                 |
| 46PA          | 100,43                         | 534                     | 3,35     | 80,08                                 |
| 47PA          | 97,14                          | 545                     | 3,44     | 84,77                                 |
| 48PA          | 96,12                          | 539                     | 3,47     | 86,22                                 |
| 49PA          | 88,79                          | 576                     | 3,71     | 102,80                                |
| 50PA          | 105,52                         | 500                     | 3,21     | 72,81                                 |
| 51PA          | 95,23                          | 506                     | 3,50     | 87,49                                 |
| 52PA          | 108,50                         | 511                     | 3,13     | 68,56                                 |
| 53PA          | 94,24                          | 526                     | 3,53     | 89,75                                 |
| 54PA          | 89,34                          | 545                     | 3,69     | 101,53                                |
| 55PA          | 93,06                          | 547                     | 3,57     | 92,59                                 |
| 56PA          | 82,16                          | 527                     | 3,93     | 118,80                                |
| 57PA          | 84,31                          | 586                     | 3,86     | 113,63                                |
| 58PA          | 97,43                          | 568                     | 3,44     | 97,43                                 |
| 59PA          | 98,19                          | 545                     | 3,40     | 83,27                                 |
| 60PA          | 92,56                          | 518                     | 3,58     | 93,79                                 |
| 61PA          | 81,93                          | 527                     | 3,94     | 119,36                                |
| 62PA          | 83,37                          | 555                     | 3,89     | 115,89                                |
| 63PA          | 92,97                          | 541                     | 3,57     | 93,24                                 |
| 64PA          | 78,25                          | 515                     | 4,07     | 131,08                                |
| 65PA          | 77,60                          | 546                     | 4,09     | 133,71                                |
| 66PA          | 96,26                          | 548                     | 3,47     | 86,03                                 |
| 67PA          | 76,65                          | 521                     | 4,13     | 137,55                                |
| 68PA          | 72,41                          | 613                     | 4,30     | 154,69                                |
| 69PA          | 76,71                          | 593                     | 4,13     | 137,31                                |
| 70PA          | 72,38                          | 602                     | 4,30     | 154,82                                |
| 71PA          | 79,33                          | 536                     | 4,03     | 126,71                                |
| 72PA          | 82,84                          | 604                     | 3,91     | 117,17                                |

**Tablica 26. Rezultati mjerenja veličine zrna  $N_A$  dobiveni poluautomatskom metodom određivanja veličine zrna mjerenjem srednje duljine presjecanja zrna za uzorke uzete s kraja blokova aluminijske legure EN AW-5083**

| Oznaka uzorka | $\bar{l}$<br>[ $\mu\text{m}$ ] | Broj presjeka,<br>count | G - broj | $\bar{N}_A$<br>[No./mm <sup>2</sup> ] |
|---------------|--------------------------------|-------------------------|----------|---------------------------------------|
| 37KA          | 83,46                          | 597                     | 3,89     | 115,68                                |
| 38KA          | 114,63                         | 503                     | 2,96     | 60,70                                 |
| 39KA          | 114,18                         | 502                     | 2,97     | 61,08                                 |
| 40KA          | 124,62                         | 502                     | 2,73     | 52,22                                 |
| 41KA          | 107,68                         | 504                     | 3,15     | 69,73                                 |
| 42KA          | 89,53                          | 507                     | 3,68     | 101,08                                |
| 43KA          | 83,05                          | 532                     | 3,90     | 118,89                                |
| 44KA          | 108,95                         | 500                     | 3,12     | 67,92                                 |
| 45KA          | 126,72                         | 529                     | 2,68     | 50,44                                 |
| 46KA          | 104,27                         | 527                     | 3,25     | 74,60                                 |
| 47KA          | 99,16                          | 513                     | 3,39     | 81,89                                 |
| 48KA          | 80,79                          | 575                     | 3,97     | 122,10                                |
| 49KA          | 80,83                          | 586                     | 3,97     | 122,00                                |
| 50KA          | 111,68                         | 534                     | 3,03     | 63,74                                 |
| 51KA          | 95,49                          | 567                     | 3,49     | 87,12                                 |
| 52KA          | 104,77                         | 531                     | 3,23     | 73,88                                 |
| 53KA          | 95,92                          | 553                     | 3,48     | 86,51                                 |
| 54KA          | 96,69                          | 509                     | 3,46     | 85,41                                 |
| 55KA          | 104,88                         | 558                     | 3,23     | 73,73                                 |
| 56KA          | 95,70                          | 524                     | 3,48     | 86,82                                 |
| 57KA          | 86,52                          | 587                     | 3,78     | 108,32                                |
| 58KA          | 91,69                          | 543                     | 3,61     | 95,88                                 |
| 59KA          | 98,16                          | 537                     | 3,40     | 83,31                                 |
| 60KA          | 95,30                          | 509                     | 3,49     | 87,39                                 |
| 61KA          | 81,72                          | 523                     | 3,94     | 119,86                                |
| 62KA          | 81,10                          | 528                     | 3,96     | 121,35                                |
| 63KA          | 77,59                          | 583                     | 4,09     | 133,75                                |
| 64KA          | 88,42                          | 500                     | 3,72     | 103,75                                |
| 65KA          | 82,35                          | 514                     | 3,92     | 118,35                                |
| 66KA          | 86,51                          | 533                     | 3,78     | 108,34                                |
| 67KA          | 72,09                          | 625                     | 4,31     | 155,99                                |
| 68KA          | 68,96                          | 546                     | 4,43     | 168,65                                |
| 69KA          | 71,62                          | 514                     | 4,33     | 157,89                                |
| 70KA          | 77,90                          | 563                     | 4,08     | 132,49                                |
| 71KA          | 80,43                          | 555                     | 3,99     | 122,97                                |
| 72KA          | 74,88                          | 500                     | 4,20     | 144,74                                |

Pregledom tablice 25 uočava se da najmanja srednja duljina presijecanja zrna na uzorcima s početka ispitivanih blokova iznosi 72,38  $\mu\text{m}$  ( $G$ -broj = 4,30) za uzorak 70PA (šarža 3157P), što iznosi  $N_A = 154,82$  No./mm<sup>2</sup>, a najveća za uzorak 45PA (šarža 3163P) od 115,74  $\mu\text{m}$  ( $G$ -broj = 2,94) što iznosi  $N_A = 59,76$  No./mm<sup>2</sup>. Iz tablice 26 uočava se da je najmanja srednja duljina presijecanja zrna dobivena na kraju ispitivanih blokova nešto manja nego na početku i iznosi 68,96  $\mu\text{m}$  ( $G$ -broj = 4,43) za uzorak 68KA (šarža 3159K) što odgovara  $N_A = 168,65$  No./mm<sup>2</sup>. Najveća srednja duljina presijecanja zrna dobivena je na uzorku 45KA (šarža 3163K) od 126,72  $\mu\text{m}$  ( $G$ -broj = 2,68) što odgovara  $N_A = 50,44$  No./mm<sup>2</sup>.

## 4.2. REZULTATI ISPITIVANJA VLAČNIH SVOJSTAVA

U tablici 27. prikazani su rezultati mjerenja vlačne čvrstoće  $R_m$  za uzorke uzete s početka i kraja ispitivanih aluminijskih blokova.

**Tablica 27. Rezultati mjerenja vlačne čvrstoće  $R_m$  uzoraka uzetih s početka i s kraja ispitivanih blokova aluminijske legure EN AW-5083**

| Oznaka uzorka | $R_m$ [MPa] | $\bar{R}_m$ [MPa] | Oznaka uzorka | $R_m$ [MPa] | $\bar{R}_m$ [MPa] |
|---------------|-------------|-------------------|---------------|-------------|-------------------|
| 37PA; 37PB    | 261; 262    | 261,5             | 37KA; 37KB    | 262; 258    | 260,0             |
| 38PA; 37PB    | 248; 250    | 249,0             | 38KA; 38KB    | 241; 240    | 240,5             |
| 39PA; 39PB    | 229; 235    | 232,0             | 39KA; 39KB    | 217; 241    | 229,0             |
| 40PA; 40PB    | 241; 248    | 244,5             | 40KA; 40KB    | 239; 231    | 235,0             |
| 41PA; 41PB    | 547; 249    | 248,0             | 41KA; 41KB    | 238; 247    | 242,5             |
| 42PA; 42PB    | 266; 263    | 264,5             | 42KA; 42KB    | 262; 265    | 236,5             |
| 43PA; 43PB    | 263; 262    | 262,5             | 43KA; 43KB    | 263; 263    | 263,0             |
| 44PA; 44PB    | 237; 241    | 239,0             | 44KA; 44KB    | 245; 248    | 246,5             |
| 45PA; 45PB    | 249; 255    | 252,0             | 45KA; 45KB    | 251; 257    | 254,0             |
| 46PA; 46PB    | 246; 249    | 247,5             | 46KA; 46KB    | 251; 256    | 253,5             |
| 47PA; 47PB    | 254; 256    | 255,0             | 47KA; 47KB    | 252; 258    | 255,0             |
| 48PA; 48PB    | 261; 259    | 260,0             | 48KA; 48KB    | 258; 262    | 260,0             |
| 49PA; 49PB    | 250; 250    | 250,0             | 49KA; 49KB    | 261; 260    | 260,5             |
| 50PA; 50PB    | 257; 261    | 258,5             | 50KA; 50KB    | 257; 262    | 259,5             |
| 51PA; 51PB    | 252; 256    | 254,0             | 51KA; 51KB    | 253; 257    | 255,0             |
| 52PA; 52PB    | 257; 261    | 259,0             | 52KA; 52KB    | 258; 263    | 260,5             |
| 53PA; 53PB    | 254; 261    | 257,5             | 53KA; 53KB    | 256; 260    | 258,0             |
| 54PA; 54PB    | 263; 262    | 262,5             | 54KA; 54KB    | 266; 272    | 269,0             |
| 55PA; 55PB    | 262; 263    | 262,5             | 55KA; 55KB    | 262; 263    | 262,5             |
| 56PA; 56PB    | 258; 261    | 259,5             | 56KA; 55KB    | 260; 263    | 261,5             |
| 57PA; 57PB    | 260; 263    | 261,5             | 57KA; 57KB    | 262; 266    | 264,0             |
| 58PA; 58PB    | 261; 268    | 264,5             | 58KA; 58KB    | 260; 266    | 263,0             |
| 59PA; 59PB    | 263; 267    | 265,0             | 59KA; 59KB    | 265; 266    | 265,5             |
| 60PA; 60PB    | 253; 254    | 253,5             | 60KA; 60KB    | 262; 265    | 263,5             |
| 61PA; 61PB    | 260; 262    | 261,0             | 61KA; 61KB    | 261; 263    | 262,0             |
| 62PA; 62PB    | 265; 264    | 264,5             | 62KA; 62KB    | 269; 269    | 269,0             |
| 63PA; 63PB    | 265; 265    | 265,0             | 63KA; 63KB    | 267; 267    | 267,0             |
| 64PA; 64PB    | 266; 267    | 266,5             | 64KA; 64KB    | 262; 248    | 255,0             |
| 65PA; 65PB    | 255; 257    | 256,0             | 65KA; 65KB    | 265; 264    | 266,5             |
| 66PA; 66PB    | 262; 263    | 262,5             | 66KA; 66KB    | 269; 272    | 273,0             |
| 67PA; 67PB    | 263; 259    | 261,0             | 67KA; 67KB    | 275; 270    | 272,5             |
| 68PA; 68PB    | 265; 259    | 262,0             | 68KA; 68KB    | 265; 257    | 261,0             |
| 69PA; 69PB    | 269; 262    | 265,5             | 69KA; 69KB    | 268; 254    | 261,0             |
| 70PA; 70PB    | 266; 259    | 262,5             | 70KA; 70KB    | 261; 269    | 265,0             |
| 71PA; 71PB    | 265; 261    | 263,0             | 71KA; 71KB    | 265; 266    | 265,5             |
| 72PA; 72PB    | 262; 266    | 264,0             | 72KA; 72KB    | 271; 273    | 272,0             |

Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće  $R_m$  za uzorke uzete s početka blokova nalaze se u rasponu od 232,0 MPa (uzorak 39PA - šarža 3157P) do 266,5 MPa (uzorak 64PA - šarža 3158P). Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće  $R_m$  za uzorke uzete s kraja blokova nalaze se u rasponu od 229,0 MPa (uzorak 39KA - šarža 3157K) do 273 MPa (uzorak 66KA - šarža 3163K).

U tablici 28 prikazani su rezultati mjerenja granice proporcionalnosti  $R_{p0.2}$  za uzorke uzete s početka i kraja ispitivanih aluminijskih blokova.

**Tablica 28. Rezultati mjerenja granice proporcionalnosti  $R_{p0.2}$  uzoraka uzetih s početka i s kraja ispitivanih blokova aluminijske legure EN AW-5083**

| Oznaka uzorka     | $R_{p0.2}$ [MPa] | $\overline{R}_{p0.2}$ [MPa] | Oznaka uzorka     | $R_{p0.2}$ [MPa] | $\overline{R}_{p0.2}$ [MPa] |
|-------------------|------------------|-----------------------------|-------------------|------------------|-----------------------------|
| <b>37PA; 37PB</b> | 195; 181         | 188,0                       | <b>37KA; 37KB</b> | 191; 201         | 196,0                       |
| <b>38PA; 37PB</b> | 201; 175         | 188,0                       | <b>38KA; 38KB</b> | 164; 182         | 173,0                       |
| <b>39PA; 39PB</b> | 192; 172         | 182,0                       | <b>39KA; 39KB</b> | 166; 195         | 180,5                       |
| <b>40PA; 40PB</b> | 189; 178         | 183,5                       | <b>40KA; 40KB</b> | 179; 204         | 191,5                       |
| <b>41PA; 41PB</b> | 180; 219         | 199,5                       | <b>41KA; 41KB</b> | 220; 207         | 213,5                       |
| <b>42PA; 42PB</b> | 179; 197         | 188,0                       | <b>42KA; 42KB</b> | 229; 191         | 210,0                       |
| <b>43PA; 43PB</b> | 193; 164         | 178,5                       | <b>43KA; 43KB</b> | 165; 183         | 174,0                       |
| <b>44PA; 44PB</b> | 164; 193         | 178,5                       | <b>44KA; 44KB</b> | 194; 168         | 181,0                       |
| <b>45PA; 45PB</b> | 173; 197         | 185,0                       | <b>45KA; 45KB</b> | 189; 191         | 190,0                       |
| <b>46PA; 46PB</b> | 191; 176         | 183,5                       | <b>46KA; 46KB</b> | 199; 169         | 184,0                       |
| <b>47PA; 47PB</b> | 199; 203         | 201,0                       | <b>47KA; 47KB</b> | 186; 206         | 196,0                       |
| <b>48PA; 48PB</b> | 215; 210         | 212,5                       | <b>48KA; 48KB</b> | 206; 200         | 203,0                       |
| <b>49PA; 49PB</b> | 163; 189         | 176,0                       | <b>49KA; 49KB</b> | 176; 192         | 184,0                       |
| <b>50PA; 50PB</b> | 207; 173         | 190,0                       | <b>50KA; 50KB</b> | 175; 176         | 175,5                       |
| <b>51PA; 51PB</b> | 166; 198         | 182,0                       | <b>51KA; 51KB</b> | 201; 176         | 188,5                       |
| <b>52PA; 52PB</b> | 193; 211         | 202,0                       | <b>52KA; 52KB</b> | 216; 168         | 192,0                       |
| <b>53PA; 53PB</b> | 208; 219         | 213,5                       | <b>53KA; 53KB</b> | 226; 186         | 206,0                       |
| <b>54PA; 54PB</b> | 214; 192         | 203,0                       | <b>54KA; 54KB</b> | 242; 186         | 214,0                       |
| <b>55PA; 55PB</b> | 200; 206         | 203,0                       | <b>55KA; 55KB</b> | 222; 200         | 211,0                       |
| <b>56PA; 56PB</b> | 202; 190         | 196,0                       | <b>56KA; 55KB</b> | 170; 207         | 188,5                       |
| <b>57PA; 57PB</b> | 172; 171         | 171,5                       | <b>57KA; 57KB</b> | 177; 222         | 199,5                       |
| <b>58PA; 58PB</b> | 173; 242         | 207,5                       | <b>58KA; 58KB</b> | 176; 202         | 189,0                       |
| <b>59PA; 59PB</b> | 211; 210         | 210,5                       | <b>59KA; 59KB</b> | 203; 188         | 195,5                       |
| <b>60PA; 60PB</b> | 198; 191         | 194,5                       | <b>60KA; 60KB</b> | 219; 178         | 198,5                       |
| <b>61PA; 61PB</b> | 213; 204         | 208,5                       | <b>61KA; 61KB</b> | 211; 181         | 196,0                       |
| <b>62PA; 62PB</b> | 203; 194         | 198,5                       | <b>62KA; 62KB</b> | 177; 215         | 196,0                       |
| <b>63PA; 63PB</b> | 174; 211         | 192,5                       | <b>63KA; 63KB</b> | 171; 173         | 172,0                       |
| <b>64PA; 64PB</b> | 175; 169         | 172,0                       | <b>64KA; 64KB</b> | 198; 244         | 221,0                       |
| <b>65PA; 65PB</b> | 213; 189         | 201,0                       | <b>65KA; 65KB</b> | 175; 203         | 189,0                       |
| <b>66PA; 66PB</b> | 192; 171         | 181,5                       | <b>66KA; 66KB</b> | 232; 172         | 202,0                       |
| <b>67PA; 67PB</b> | 187; 178         | 182,5                       | <b>67KA; 67KB</b> | 178; 169         | 173,5                       |
| <b>68PA; 68PB</b> | 178; 198         | 188,0                       | <b>68KA; 68KB</b> | 198; 206         | 202,0                       |
| <b>69PA; 69PB</b> | 178; 190         | 184,0                       | <b>69KA; 69KB</b> | 167; 198         | 182,5                       |
| <b>70PA; 70PB</b> | 198; 181         | 189,5                       | <b>70KA; 70KB</b> | 239; 192         | 215,5                       |
| <b>71PA; 71PB</b> | 212; 190         | 201,0                       | <b>71KA; 71KB</b> | 218; 199         | 208,5                       |
| <b>72PA; 72PB</b> | 186; 194         | 190,0                       | <b>72KA; 72KB</b> | 234; 181         | 207,5                       |

Srednje vrijednosti granice proporcionalnosti  $R_{p0.2}$  za uzorke uzete s početka blokova nalaze se u rasponu od 171,5 MPa (uzorak 57PA - šarža 3160P) do 213,5 MPa (uzorak 53PA - šarža 3159P). Srednje vrijednosti granice proporcionalnosti  $R_{p0.2}$  za uzorke uzete s kraja blokova nalaze se u rasponu od 172,0 MPa (uzorak 63KA - šarža 3159K) do 221 MPa (uzorak 64KA - šarža 3158K).

U tablici 29 prikazani su rezultati mjerenja izduženja  $A_{50}$  za uzorke uzete s početka i kraja ispitivanih aluminijskih blokova.

**Tablica 29. Rezultati mjerenje izduženja  $A_{50}$ , uzoraka uzetih s početka i s kraja ispitivanih blokova aluminijske legure EN AW-5083**

| Oznaka uzorka | $A_{50}$ [%] | $\overline{A}_{50}$ [%] | Oznaka uzorka | $A_{50}$ [%] | $\overline{A}_{50}$ [%] |
|---------------|--------------|-------------------------|---------------|--------------|-------------------------|
| 37PA; 37PB    | 20; 22       | 21,0                    | 37KA; 37KB    | 20; 16       | 18,0                    |
| 38PA; 37PB    | 22; 22       | 22,0                    | 38KA; 38KB    | 20; 14       | 17,0                    |
| 39PA; 39PB    | 20; 14       | 17,0                    | 39KA; 39KB    | 16; 16       | 16,0                    |
| 40PA; 40PB    | 18; 16       | 17,0                    | 40KA; 40KB    | 14; 16       | 15,0                    |
| 41PA; 41PB    | 18; 20       | 19,0                    | 41KA; 41KB    | 22; 20       | 21,0                    |
| 42PA; 42PB    | 26; 24       | 25,0                    | 42KA; 42KB    | 20; 23       | 21,5                    |
| 43PA; 43PB    | 22; 21       | 21,5                    | 43KA; 43KB    | 18; 24       | 21,0                    |
| 44PA; 44PB    | 18; 18       | 18,0                    | 44KA; 44KB    | 16; 12       | 14,0                    |
| 45PA; 45PB    | 16; 18       | 17,0                    | 45KA; 45KB    | 14; 16       | 15,0                    |
| 46PA; 46PB    | 16; 18       | 17,0                    | 46KA; 46KB    | 18; 20       | 19,0                    |
| 47PA; 47PB    | 21; 20       | 20,5                    | 47KA; 47KB    | 17; 18       | 17,5                    |
| 48PA; 48PB    | 22; 20       | 21,0                    | 48KA; 48KB    | 18; 18       | 18,0                    |
| 49PA; 49PB    | 22; 20       | 21,0                    | 49KA; 49KB    | 20; 22       | 21,0                    |
| 50PA; 50PB    | 16; 22       | 19,0                    | 50KA; 50KB    | 18; 20       | 19,0                    |
| 51PA; 51PB    | 18; 20       | 19,0                    | 51KA; 51KB    | 18; 18       | 18,0                    |
| 52PA; 52PB    | 24; 22       | 23,0                    | 52KA; 52KB    | 18; 20       | 19,0                    |
| 53PA; 53PB    | 20; 20       | 20,0                    | 53KA; 53KB    | 18; 17       | 17,5                    |
| 54PA; 54PB    | 22; 22       | 22,0                    | 54KA; 54KB    | 24; 24       | 24,0                    |
| 55PA; 55PB    | 22; 24       | 23,0                    | 55KA; 55KB    | 20; 22       | 21,0                    |
| 56PA; 56PB    | 22; 22       | 22,0                    | 56KA; 55KB    | 22; 20       | 21,0                    |
| 57PA; 57PB    | 20; 24       | 22,0                    | 57KA; 57KB    | 20; 22       | 21,0                    |
| 58PA; 58PB    | 22; 22       | 22,0                    | 58KA; 58KB    | 19; 21       | 20,0                    |
| 59PA; 59PB    | 24; 22       | 23,0                    | 59KA; 59KB    | 25; 26       | 25,5                    |
| 60PA; 60PB    | 24; 20       | 22,0                    | 60KA; 60KB    | 26; 26       | 26,0                    |
| 61PA; 61PB    | 22; 20       | 21,0                    | 61KA; 61KB    | 24; 22       | 23,0                    |
| 62PA; 62PB    | 24; 26       | 25,0                    | 62KA; 62KB    | 20; 26       | 23,0                    |
| 63PA; 63PB    | 22; 22       | 22,0                    | 63KA; 63KB    | 22; 26       | 24,0                    |
| 64PA; 64PB    | 22; 26       | 24,0                    | 64KA; 64KB    | 22; 21       | 21,5                    |
| 65PA; 65PB    | 24; 22       | 23,0                    | 65KA; 65KB    | 24; 26       | 25,0                    |
| 66PA; 66PB    | 22; 20       | 21,0                    | 66KA; 66KB    | 27; 27       | 27,0                    |
| 67PA; 67PB    | 21; 25       | 23,0                    | 67KA; 67KB    | 26; 22       | 24,0                    |
| 68PA; 68PB    | 24; 22       | 23,0                    | 68KA; 68KB    | 26; 20       | 23,0                    |
| 69PA; 69PB    | 22; 22       | 22,0                    | 69KA; 69KB    | 26; 18       | 22,0                    |
| 70PA; 70PB    | 24; 20       | 22,0                    | 70KA; 70KB    | 25; 25       | 25,0                    |
| 71PA; 71PB    | 23; 22       | 22,5                    | 71KA; 71KB    | 24; 25       | 24,5                    |
| 72PA; 72PB    | 24; 22       | 23,0                    | 72KA; 72KB    | 25; 24       | 24,5                    |

Srednje vrijednosti izduženja  $A_{50}$  za uzorke uzete s početka blokova nalaze se u rasponu od 17,0% (uzorak 39PA - šarža 3157P; uzorak 40PA - šarža 3163P; uzorak 45PA - šarža 3163P; uzorak 46PA - šarža 3162P) do 25,0% (uzorak 42PA - šarža 3160P; uzorak 62PA - šarža 3160P). Srednje vrijednosti izduženja  $A_{50}$  za uzorke uzete s kraja blokova nalaze se u rasponu od 14,0% (uzorak 44KA - šarža 3157K) do 27,0% (uzorak 66KA - šarža 3163K).



### 4.3. STATISTIČKA ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Analiza varijance - ANOVA je postupak usporedbe više uzoraka pri čemu svaki uzorak predstavlja zasebni osnovni skup, odnosno populaciju. U proizvodnim uvjetima analiza varijance je postupak koji se koristi u provjeri djelovanja promjene stanja nekog proizvodnog faktora na mjerenu vrijednost - rezultat. Analizom varijance provjeravaju se promjene aritmetičkih sredina uzoraka [61, 62]. Postupak ove metode razvio je Ronald A. Fischer te se često ova metoda naziva Fischerova analiza varijance. Primjenom je slična t- (Studentovom) i F-testu, tako što se koristi za usporedbu srednjih vrijednosti i relativne varijance između njih, no ANOVA se najbolje primjenjuje u slučajevima dva ili više skupova (ili populacije) koji se moraju usporediti.

Moraju se zadovoljiti određene pretpostavke za analizu varijance: neovisnost uzorka - uzorak mora biti nasumičan, normalna distribucija (često se koriste Kolmogor-Smirnov ili Shapiro-Wilk testovi za utvrđivanje normaliteta skupa) te homogenost varijanci - varijance između skupova moraju biti jednake (Leveneov test se koristi za testiranje homogenosti) [63].

Latinski kvadrat, shema s dvosmjernim repeticijama, omogućuje analiziranje varijabilnosti kroz procjenu ovih suma kvadratnih odstupanja (SS) [36, 64]:

$$SS_{\text{ukupno}} = \begin{cases} SS_{\text{Tretiranja (šarže)}} \\ SS_{\text{Redovi (visina ploče)}} \\ SS_{\text{Stupci (širina ploče)}} \\ SS_{\text{ostatak}} \end{cases}$$

Stupnjevi slobode za svaki izvor varijabilnosti, obzirom da je jednak broj vodoravnih jedinica pokusa, okomitih jedinica pokusa i tretiranja ( $n_r = n_s = n$ ), su:

#### Stupnjevi slobode (n - 1)

|                            |  |
|----------------------------|--|
| $SS_{\text{Ukupno}}$       | $\rightarrow n^2 - 1 = 6^2 - 1 = 35$   |
| $SS_{\text{šarže}}$        | $\rightarrow n - 1 = 6 - 1 = 5$  |
| $SS_{\text{Visina ploče}}$ | $\rightarrow n - 1 = 6 - 1 = 5$  |
| $SS_{\text{širina ploče}}$ | $\rightarrow n - 1 = 6 - 1 = 5$  |
| $SS_{\text{ostatak}}$      | $\rightarrow SS_{\text{Ukupno}} - SS_{\text{šarže}} - SS_{\text{Visina ploče}} - SS_{\text{širina ploče}} =$<br>$= (n^2 - 1) - (n - 1) - (n - 1) - (n - 1) = 20$ |

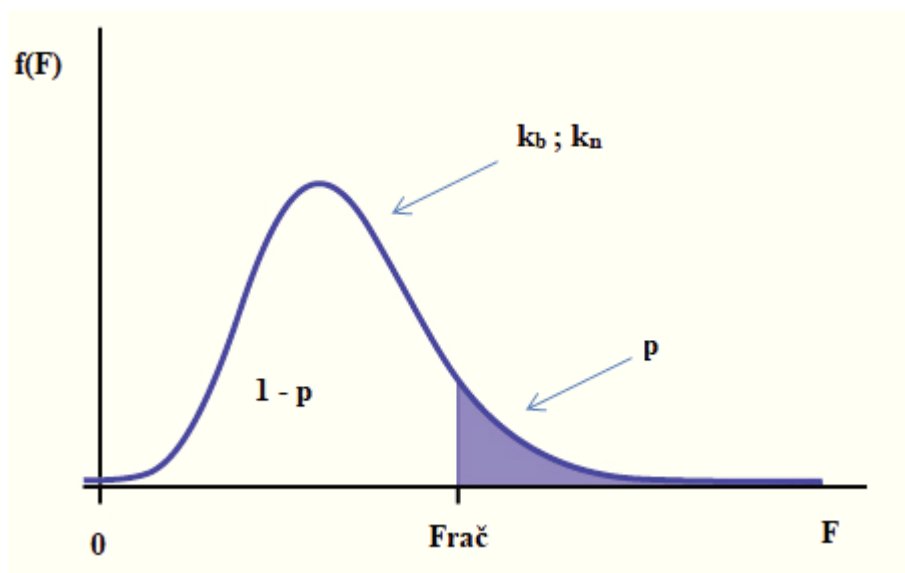
Nakon određivanja varijabilnosti što potječu od pojedinog uzorka određuju se procijenjene varijance  $s^2$ , dijeleći svaku sumu kvadrata odstupanja SS s brojem stupnjeva slobode,  $n - 1$ . Tako su se odredile 3 nezavisne procijenjene varijance, što uz poznavanje procijenjene varijance ostatka, tj. prirodne varijabilnosti, omogućuje formiranje uobičajenog F-testa (jednadžbe (17) - (19)):

$$F_{\text{šarže}} = \frac{s_{\text{šarže}}^2}{s_{\text{ostataka}}^2} \quad (17)$$

$$F_{\text{visine ploče}} = \frac{s_{\text{visine ploče}}^2}{s_{\text{ostataka}}^2} \quad (18)$$

$$F_{\text{širine ploče}} = \frac{s_{\text{širine ploče}}^2}{s_{\text{ostatka}}^2} \quad (19)$$

Na kraju ostaje utvrđivanje statističke značajnosti za svaku od određenih vrijednosti  $F$  varijable, što se izvodi uporabom  $F$ -testa, slika 39.



**Slika 39. Krivulja  $F$ -distribucije [36, 64]**

gdje su:

- ( $F$ ) - funkcija gustoće vjerojatnosti  $F$ -razdiobe za odgovarajuće parametre;
- $k_b$  - stupnjevi slobode procijenjene varijance u brojniku za  $Frač$ ;
- $k_n$  - stupnjevi slobode procijenjene varijance u nazivniku za  $Frač$ ;
- $p$  - vjerojatnost da se dogodi utvrđena vrijednost za  $Frač$  u uvjetima ispravnosti nulte hipoteze  $H_0$ :

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

uz alternativnu hipotezu:

$$H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$$

$\sigma_1^2$  i  $\sigma_2^2$  predstavljaju varijance osnovnih skupova iz kojih potječu podaci eksperimenta, uz konvencionalni uvjet da je u brojniku izraza  $Frač$  unesena veća varijanca. Ako je vrijednost  $p$  premala (najčešće  $p < 0,05$  i  $p < 0,01$ ) može se odbaciti nulta hipoteza  $H_0$ . Time se automatski implicira prihvatanje alternativne hipoteze  $H_1$ , uz vjerojatnost pogrešnog odbacivanja nulte hipoteze (a da je ta hipoteza ipak ispravna) koja iznosi upravo  $p$ . Tako se u konačnici odredila značajnost utjecaja pojedinog od izvora varijabilnosti i to posve neovisno o drugim utjecajima.

Uz ovaj osnovni podatak o djelovanju pojedinih izvora varijabilnosti određuju se i utjecaji pojedinih varijabli po nivoima. To je ustvari razlika aritmetičke sredine izmjerenih vrijednosti za svaku od razina utjecajnih varijabli i sveukupne aritmetičke sredine rezultata. Grafički prikaz djelovanja razmatranih čimbenika je vidljiv na dijagramima prikazanim na slikama 40. - 47.

Koeficijent jednostavne linearne korelacije je brojčani izraz kojim se mjeri stupanj i smjer povezanosti dviju pojava koje su u linearnom statističkom odnosu. Mjerenje se temelji na parovima empirijskih vrijednosti numeričkih varijabli ( $x_i, y_i$ ). Koeficijent korelacije,  $r$ , pokazuje stupanj slaganja između ovih promjenjivih varijabli u linearnoj međuzavisnosti. Koeficijent korelacije je jedan relativni pokazatelj nezavisan od jedinica mjere u kojima su izraženi originalni podaci i pogodan je za uspoređivanje s drugim koeficijentima korelacije [36, 64].

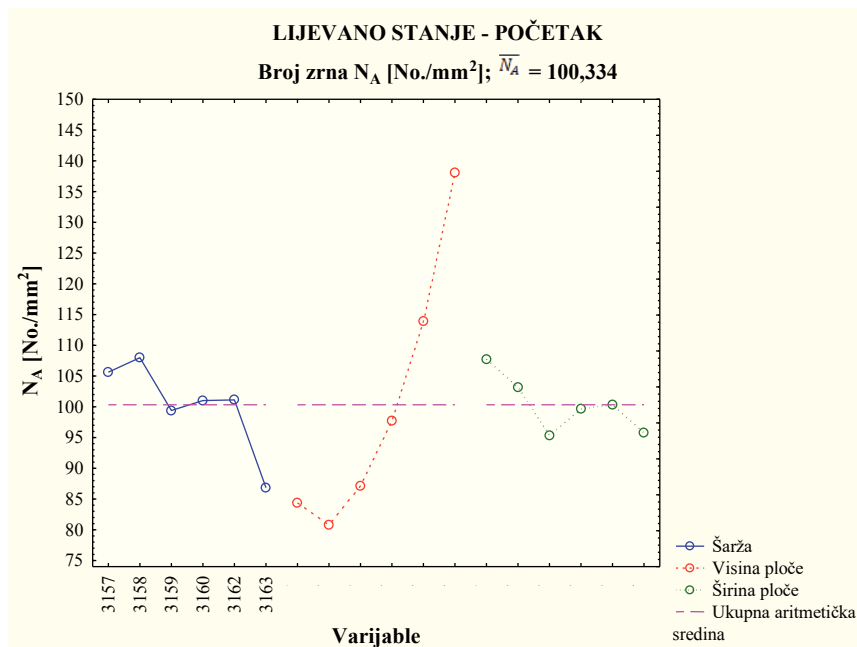
Metodom uzoraka u teoriji korelacije dobiva se granični  $r$ ,  $|r_{gran}|$  koji je važan prilikom testiranja izračunatog  $r$ .  $|r_{gran}|$  za 36 parova podataka iznosi 0,33, a za 6 parova podataka iznosi 0,81. U slučaju  $r > |r_{gran}|$  postoji korelacija između odabrane dvije varijable za određen broj podataka i tad je  $r$  označen crveno.

U ovom diplomskom radu statistička obrada podataka provedena je programskim paketom StatSoft® STATISTICA 13, programom „Experimental Design“ gdje se za svaku zavisnu, tj. mjerenu, varijablu (broj zrna po jedinici ispitivane površine, vlačna čvrstoća, granica proporcionalnosti i izduženje) izračunaju:

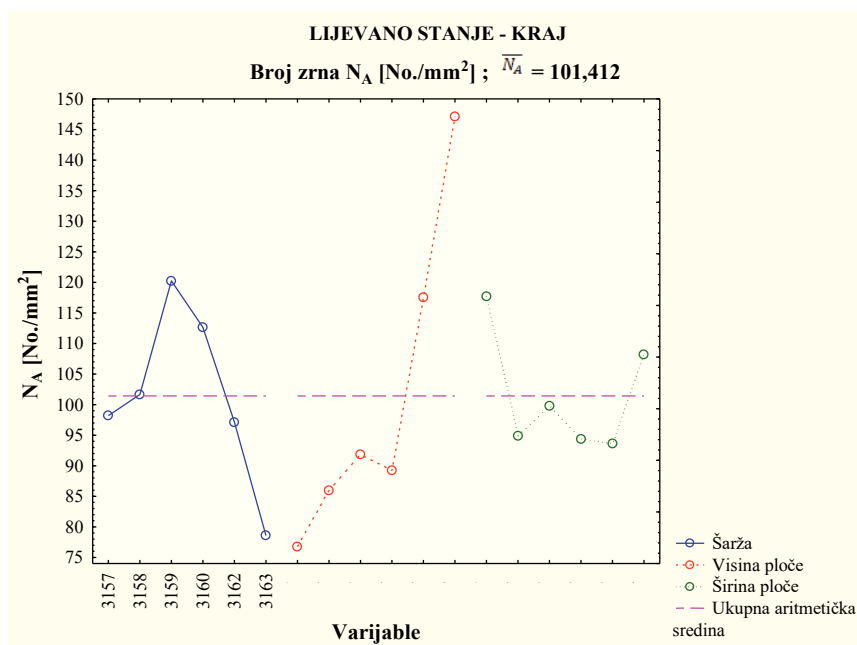
- tablice sa srednjim vrijednostima, procjenom parametara, standardnim devijacijama i koeficijentima varijacije za početke i krajeve lijevanih blokova (tablice P.1. - P.8. u prilogu),
- grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima (eng. *Graph of Main Effects*), slike 40. - 47. Grafovi prikazuju promjenu ispitivane zavisne varijable za ukupno svih 6 lijevanih blokova za početke i krajeve ovisno o *šarži* (3157, 3158, 3159, 3160, 3162, 3163, plava puna linija), *visini ploče* ( $i = 1 - 6$ , crvena isprekidana linija) i o *širini ploče* ( $j = 1 - 6$ , zelena točkasta linija),
- tablica analize varijance za svaku zavisnu varijablu za početke i krajeve lijevanih blokova ukupno,
- koeficijent korelacije za svaku zavisnu varijablu između početka i kraja za svaki lijevani ispitivani blok, odnosno šaržu pojedinačno ( $r_{\$,LP-LK}$ )
- ukupni koeficijent korelacije između početaka i krajeva ( $r$ ) [36].

### 4.3.1. UTJECAJ IZVORA VARIJABILNOSTI NA BROJ ZRNA

Na slikama 40 i 41 dani su grafički prikazi utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za broj zrna po jedinici ispitivane površine  $N_A$  za početak i kraj blokova.



Slika 40. Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za broj zrna  $N_A$  - početak blokova



Slika 41. Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za broj zrna  $N_A$  - kraj blokova

Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za broj zrna  $N_A$  - početak blokova, slika 40 pokazuje sljedeće činjenice:

- utjecaj *šarži* pokazuje izraženije varijacije u odnosu na ukupnu aritmetičku sredinu ( $\overline{N_{A,P}} = 100,334 \text{ No./mm}^2$ ) u oba smjera,
- utjecaj *visine ploče* pokazuje izraženu zakonitost po nivoima: od  $-15,9792 \text{ No./mm}^2$  za nivo  $i = 1$  (sredina bloka) do  $+37,7075$  za nivo  $i = 6$  (rub bloka),
- utjecaj *širine ploče* pokazuje odstupanje od zakonitosti za nivo  $i = 6$  gdje bi se očekivalo, s obzirom na veći intenzitet odvođenja topline, puno veći broj zrna po jedinici površine jer se radi o rubnom području ispitivanih ploča. Ovo se može objasniti tako što je na početku lijevanja nestacionarno stanje i potrebno je određeno vrijeme da se uvjeti lijevanja stabiliziraju, što izravno utječe i na sam proces skrućivanja.

Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za broj zrna  $N_A$  - kraj blokova, slika 41 pokazuje sljedeće činjenice:

- utjecaj *šarži* je značajan, tj. dosta su velika odstupanja od ukupne aritmetičke sredine ( $\overline{N_{A,K}} = 101,412 \text{ No./mm}^2$ ) u oba smjera,
- utjecaj *visine ploče* pokazuje izraženu zakonitost po nivoima: od  $-24,6633 \text{ No./mm}^2$  za nivo  $i = 1$  (sredina bloka) do  $+45,7050 \text{ No./mm}^2$  za nivo  $i = 6$  (rub bloka),
- utjecaj *širine ploče* pokazuje trend rasta broja zrna i uz uže i uz dulje rubove blokova; dobivena zakonitost se potvrđuje time da broj zrna raste od sredine prema rubovima i utječe na veći intenzitet odvođenja topline s rubnog područja ploča i samim time veće pothlađenje. Razlike broja zrna po *visini ploče* mnogo su veće nego po *širini ploče*, što ukazuje na veći intenzitet odvođenja topline po debljini bloka nego po njegovoj širini.

Iz dobivenih rezultata utjecaja pojedinih varijabli na broj zrna uočava se da je ukupna aritmetička sredina broja zrna za početak blokova gotovo identična onoj s kraja ( $\overline{N_{A,P}} = 100,334 \text{ No./mm}^2$ ,  $\overline{N_{A,K}} = 101,412 \text{ No./mm}^2$ ).

Iz analize varijance za broj zrna  $N_A$  - početak blokova, tablica 30, uočava se izrazita značajnost razlika po *visini ploče* ( $p = 0,000005$ ), dok izvori varijabilnosti *šarža* i *širina ploče* nisu značajni.

**Tablica 30. Analiza varijance latinskog kvadrata za broj zrna  $N_A$  - početak blokova**

| <b>Broj zrna <math>N_A</math> [No./mm<sup>2</sup>] - početak blokova; Mean = 100,334</b> |                                     |                               |   |                 |                          |
|--|-------------------------------------|-------------------------------|---|-----------------|--------------------------|
| <b>Varijable</b>   | <b>Suma kvadrata odstupanja, SS</b> | <b>Stupnjevi slobode, n-1</b> | <b>Srednji kvadrat odstupanja, <math>s^2</math></b> | <b>Frač</b>     | <b>Pogreška 1. vrste</b> |
| <b>Šarža</b>   | 1623,89                             | 5                             | 324,779   | 1,60089         | 0,205504                 |
| <b>Visina ploče</b>  | <b>14548,27</b>                     | <b>5</b>                      | <b>2909,655</b>                                     | <b>14,34221</b> | <b>0,000005</b>          |
| <b>Širina ploče</b>  | 650,79                              | 5                             | 130,158   | 0,64157         | 0,670798                 |
| <b>Ostatak</b>   | 4057,47                             | 20                            | 202,874   |                 |                          |

Pregledom tablice 31 analize varijance za broj zrna  $N_A$  - kraj blokova, uočava se izrazita značajnost razlika i među šaržama i po širini i po visini ploče. Vjerojatnost pogreške prve vrste za utjecaj varijabilnosti visina ploče jednak je nuli ( $p = 0,000000$ ), dok su i druga dva izvora varijabilnosti dosta značajna.

**Tablica 31. Analiza varijance latinskog kvadrata za broj zrna  $N_A$  - kraj blokova**

| <b>Broj zrna <math>N_A</math> [No./mm<sup>2</sup>] - kraj blokova; Mean = 101,412</b> |                                     |                               |   |                 |                          |
|---|-------------------------------------|-------------------------------|---|-----------------|--------------------------|
| <b>Varijable</b>  | <b>Suma kvadrata odstupanja, SS</b> | <b>Stupnjevi slobode, n-1</b> | <b>Srednji kvadrat odstupanja, <math>s^2</math></b> | <b>Frač</b>     | <b>Pogreška 1. vrste</b> |
| <b>Šarža</b>  | <i>6186,82</i>                      | <i>5</i>                      | <i>1237,365</i>                                     | <i>7,85224</i>  | <i>0,000314</i>          |
| <b>Visina ploče</b>   | <i>20619,59</i>                     | <i>5</i>                      | <i>4123,918</i>                                     | <i>26,17012</i> | <i>0,000000</i>          |
| <b>Širina ploče</b>   | <i>2800,92</i>                      | <i>5</i>                      | <i>560,185</i>                                      | <i>3,55490</i>  | <i>0,018392</i>          |
| <b>Ostatak</b>  | 3151,62                             | 20                            | 157,581   |                 |                          |

U tablici 32 prikazani su koeficijenti korelacije za broj zrna  $r_s(N_A)$  između ploča s početka i krajeva ispitivanih blokova za svaku pojedinačnu šaržu. Relativno visoki koeficijenti korelacije za gotovo sve šarže ukazuju na visoku strukturnu homogenost ispitivanih blokova lijevanih DC postupkom. Koeficijenti korelacije su nešto niži za šarže 3158 i 3162.

**Tablica 32. Koeficijenti korelacije za broj zrna  $r_s(N_A)$ , između ploča uzetih s početka i kraja ispitivanih blokova za svaku pojedinačnu šaržu**

| <b>Šarža</b>                 | <b>3157</b> | <b>3158</b> | <b>3159</b> | <b>3160</b> | <b>3162</b> | <b>3163</b> |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b><math>r_s(N_A)</math></b> | <i>0,88</i> | 0,67        | <i>0,83</i> | <i>0,93</i> | 0,75        | <i>0,87</i> |

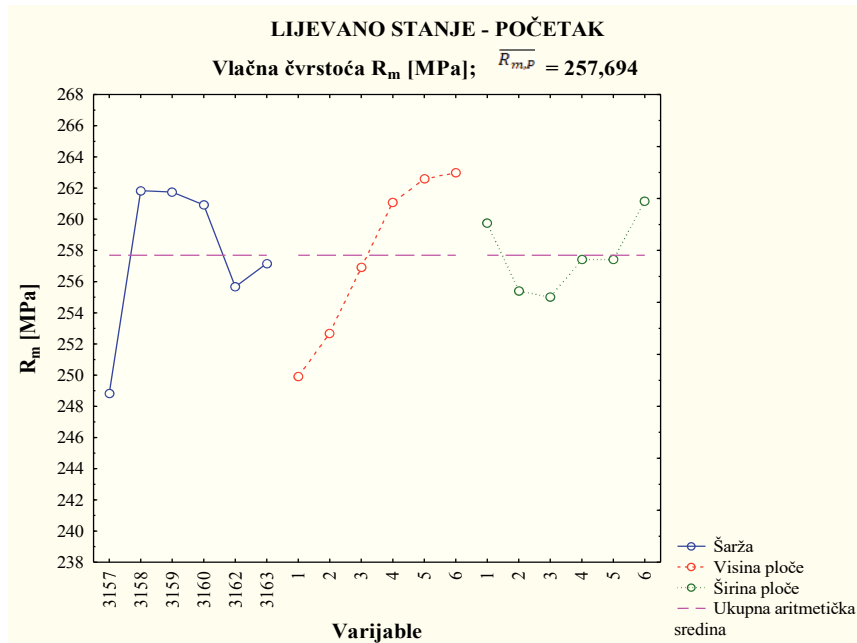
Dobivena varijacija i raspodjela broja zrna unutar šarži ispitivanih ploča je očekivana zbog različitog intenziteta odvođenja topline zbog čega nije moguće unutar cijelog presjeka bloka dobiti istoosna zrna približno istih veličina.

Iz dobivenog ukupnog koeficijenta korelacije za broj zrna za sve šarže  $r(N_A) = 0,77$ , zapaža se relativno visoki stupanj povezanosti svih početaka i krajeva blokova, što ukazuje na pravilnu raspodjelu broja zrna unutar svih blokova.

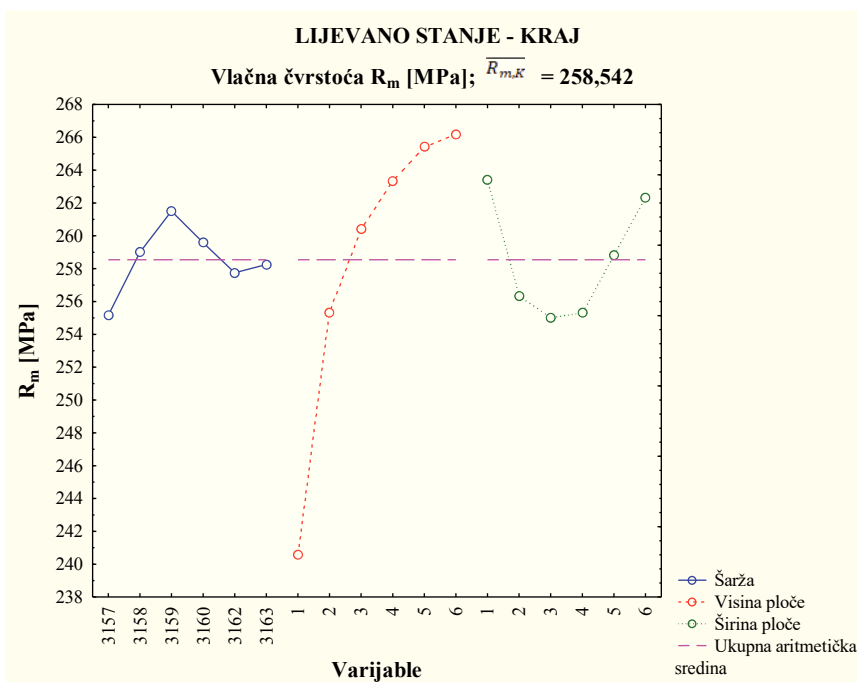
S aspekta cijepjenja i razvoja mikrostrukture potrebno je istaknuti da je dobivena uglavnom jednolika sitnozrnata struktura bez izražene zone stubičastih kristala. Takva struktura garantira jednoliku raspodjelu izlučenih faza, kraća vremena homogenizacije i sposobnost daljnje plastične obrade. Cilj je koristiti učinkovitija cjepiva i optimizirati procesne parametre lijevanja da se dobije sitnozrnata struktura uz manju upotrebu cjepiva.

#### **4.3.2. UTJECAJ IZVORA VARIJABILNOSTI NA VLAČNU ČVRSTOĆU**

Na slikama 42 i 43 dani su grafički prikazi utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za vlačnu čvrstoće  $R_m$  za početak i kraj blokova.



Slika 42. Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za *vlačnu čvrstoću  $R_m$  - početak blokova*



Slika 43. Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za *vlačnu čvrstoću  $R_m$  - kraj blokova*

Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za *vlačnu čvrstoću  $R_m$  - početak blokova*, slika 42 pokazuje sljedeće činjenice:

- utjecaj *šarži* pokazuje relativno velike varijacije u odnosu na ukupnu aritmetičku sredinu od  $\overline{R_{m,P}} = 257,694$  MPa,
- utjecaj *visine ploče* pokazuje vrlo izraženu zakonitost po nivoima: od  $-7,77778$  MPa za nivo  $i = 1$  (sredina bloka) do  $+5,30556$  MPa za nivo  $i = 6$  (rub bloka) s trendom povećanja vlačne čvrstoće prema užim rubovima blokova,

- utjecaj *širine ploče* varira od -2,69444 MPa do +3,47222, s trendom povećanja vlačne čvrstoće prema rubovima po širini blokova.

Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za *vlačnu čvrstoću  $R_m$  - kraj blokova*, slika 43 pokazuje sljedeće:

- utjecaj *šarži* pokazuje manje varijacije u odnosu na ukupnu aritmetičku sredinu od  $\overline{R_{m,K}} = 258,542$  MPa,
- utjecaj *visine ploče* pokazuje vrlo izraženu zakonitost po nivoima: od -17,95830 MPa za nivo  $i = 1$  (sredina bloka) do + 7,62500 MPa za nivo  $i = 6$  (rub bloka), kao i kod početka, ali s većim odstupanjima od ukupne aritmetičke sredine;
- utjecaj *širine ploče* varira od -3,5417 MPa do + 4,8750 MPa, te prati trend ponašanja početka blokova.

Usporedbom ukupne aritmetičke sredine vrijednosti vlačne čvrstoće za početak i kraj blokova vidljivo je da su vrijednosti gotovo jednake ( $\overline{R_{m,P}} = 257,694$  MPa,  $\overline{R_{m,K}} = 258,542$  MPa). Može se rezimirati da vrijednosti uzoraka vlačne čvrstoće rastu i po visini i po širini ploče od sredine prema rubu što analogno prati i promjenu broja zrna ( $i$  za početke i za krajeve blokova).

Tablica analize varijance za *vlačnu čvrstoću  $R_m$  - početak blokova*, tablica 33 pokazuje da su izvori varijabilnosti *šarža* i *visina ploče* vrlo značajni. Treći izvor varijabilnosti, *širina ploče*, nije značajan.

**Tablica 33. Analiza varijance latinskog kvadrata za *vlačnu čvrstoću  $R_m$  - početak blokova***

| <b>Vlačna čvrstoća <math>R_m</math> [MPa] - početak blokova; Mean = 257,694</b> |                              |                        |                                   |          |                   |
|---|------------------------------|------------------------|-----------------------------------|----------|-------------------|
| Varijable   | Suma kvadrata odstupanja, SS | Stupnjevi slobode, n-1 | Srednji kvadrat odstupanja, $s^2$ | Frač     | Pogreška 1. vrste |
| Šarža   | 761,2222                     | 5                      | 152,2444                          | 7,534264 | 0,000405          |
| Visina ploče  | 899,4722                     | 5                      | 179,8944                          | 8,902605 | 0,000142          |
| Širina ploče  | 173,3056                     | 5                      | 34,6611                           | 1,715307 | 0,177105          |
| Ostatak   | 404,1389                     | 20                     | 20,2069                           |          |                   |

Tablica analize varijance za *vlačnu čvrstoću  $R_m$  - kraj blokova*, tablica 34 pokazuje izrazitu značajnost razlika po *visini ploče*, uz gotovo siguran zaključak, odnosno vjerojatnost pogreške prve vrste je gotovo jednaka nuli ( $p = 0,000001$ ). Uočava se da druga dva izvora varijabilnosti, *šarža* i *širina ploče*, nisu značajni.

**Tablica 34. Analiza varijance latinskog kvadrata za *vlačnu čvrstoću  $R_m$  - kraj blokova***

| <b>Vlačna čvrstoća <math>R_m</math> [MPa] - kraj blokova; Mean = 258,542</b> |                              |                        |                                   |          |                   |
|--|------------------------------|------------------------|-----------------------------------|----------|-------------------|
| Varijable  | Suma kvadrata odstupanja, SS | Stupnjevi slobode, n-1 | Srednji kvadrat odstupanja, $s^2$ | Frač     | Pogreška 1. vrste |
| Šarža  | 132,896                      | 5                      | 26,5792                           | 0,82984  | 0,543521          |
| Visina ploče   | 2788,063                     | 5                      | 557,6125                          | 17,40952 | 0,000001          |
| Širina ploče   | 395,646                      | 5                      | 79,1292                           | 2,47054  | 0,067363          |
| Ostatak  | 640,583                      | 20                     | 32,0292                           |          |                   |



Koeficijenti korelacije za vlačnu čvrstoću  $r_s$  ( $R_m$ ), između početka i kraja pojedinačnog bloka, odnosno šarže, tablica 35, upućuju na relativno veliku homogenost blokova s aspekta vlačne čvrstoće. Niže vrijednosti su vidljive kod šarži 3158 i 3160.

**Tablica 35. Koeficijenti korelacije za vlačnu čvrstoću  $r_s$  ( $R_m$ ), između ploča uzetih s početka i kraja ispitivanih blokova za svaku pojedinačnu šaržu**

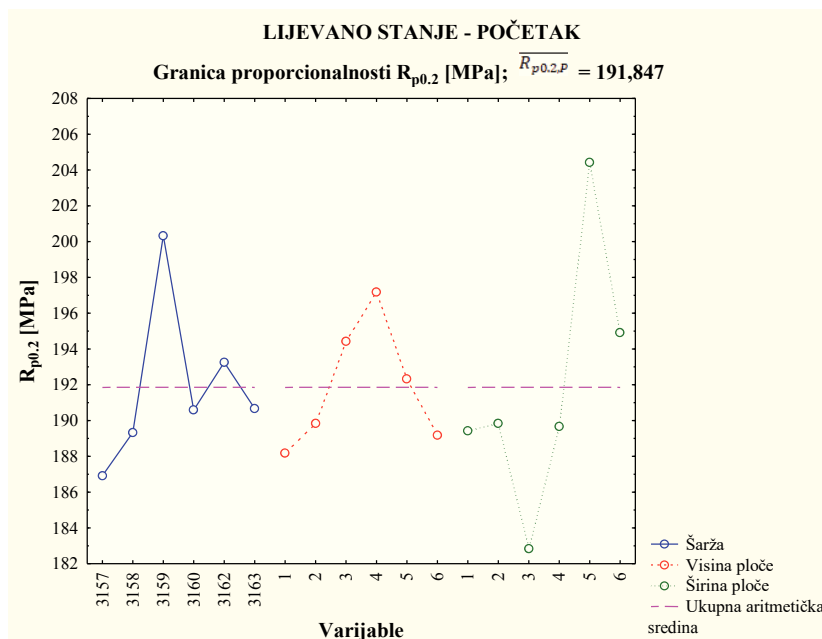
| Šarža           | 3157 | 3158 | 3159 | 3160  | 3162 | 3163 |
|-----------------|------|------|------|-------|------|------|
| $r_s$ ( $R_m$ ) | 0,94 | 0,77 | 0,90 | -0,09 | 0,91 | 0,95 |

Iz dobivenog ukupnog koeficijenta korelacije za vlačnu čvrstoću  $r$  ( $R_m$ ) = 0,72, zapaža se relativno visoki stupanj povezanosti početaka i krajeva blokova, bez obzira na to što se uzorci nalaze u lijevanom stanju. To ukazuje na relativnu homogenost vlačne čvrstoće unutar svakog od blokova, odražavajući tako kemijsku i strukturnu jednodolnost bloka, tj. šarže. Implicira se stabilnost i ponovljivost postupka lijevanja i adekvatna primjena tehnike i tehnologije.

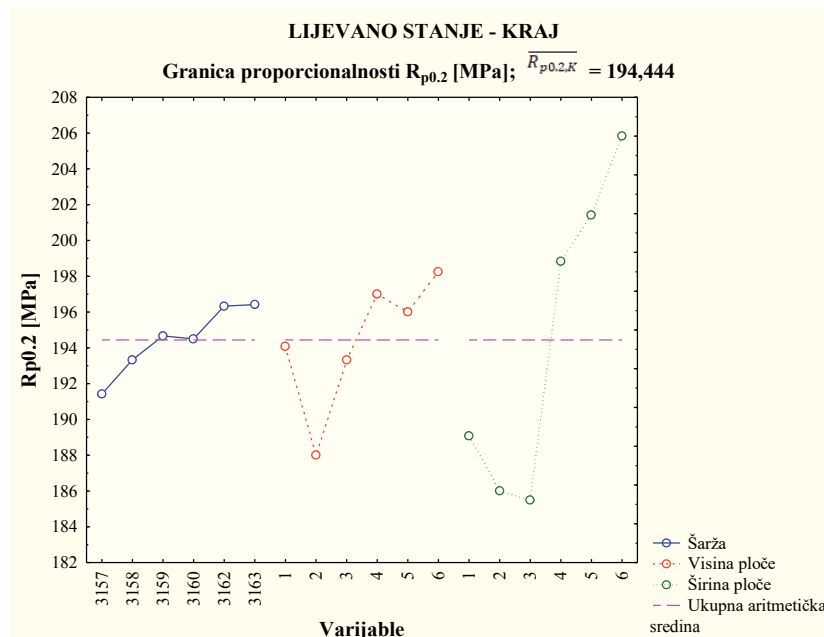
### 4.3.3. UTJECAJ IZVORA VARIJABILNOSTI NA GRANICU PROPORCIONALNOSTI

Na slikama 44 i 45 dani su grafički prikazi utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za **granicu proporcionalnosti  $R_{p0.2}$  za početak i kraj blokova**. Iz grafičkog prikaza utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za **granicu proporcionalnosti  $R_{p0.2}$  - početak i kraj blokova**, slike 44. i 45., uočava se da sva tri izvora varijabilnosti pokazuju velike varijacije u oba smjera, bez posebne zakonitosti u odnosu na ukupnu aritmetičku sredinu.

Ako se uspoređuju ukupne aritmetičke sredine granice proporcionalnosti za početak i kraj blokova, vidljivo je da su vrijednosti gotovo jednake. Vrijednost ukupne aritmetičke sredine granice proporcionalnosti za početak blokova iznosi  $\overline{R_{p0.2,P}} = 191,847$  MPa, a za kraj blokova iznosi  $\overline{R_{p0.2,K}} = 194,444$  MPa



**Slika 44. Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za granicu proporcionalnosti  $R_{p0.2}$  - početak blokova**



**Slika 45. Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za granicu proporcionalnosti  $R_{p0.2}$  - kraj blokova**

Iz tablica 36 i 37 uočava se da za granicu proporcionalnosti za početak i za kraj blokova niti jedan izvor varijabilnosti nije značajan, osim u slučaju granice proporcionalnosti kod početka blokova, izvor varijabilnosti *širina ploče*, koji je blago značajan.

**Tablica 36. Analiza varijance latinskog kvadrata za granicu proporcionalnosti  $R_{p0.2}$  - početak blokova**

| <b>Granica proporcionalnosti <math>R_{p0.2}</math> [MPa] - kraj blokova; Mean = 191,847</b> |                              |                        |                                   |                 |                   |
|---|------------------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------|
| Varijable   | Suma kvadrata odstupanja, SS | Stupnjevi slobode, n-1 | Srednji kvadrat odstupanja, $s^2$ | Frač            | Pogreška 1. vrste |
| Šarža   | 645,618                      | 5                      | 129,1236                          | 1,269669        | 0,315448          |
| Visina ploče  | 359,535                      | 5                      | 71,9069                           | 0,707059        | 0,624963          |
| Širina ploče  | <b>1580,285</b>              | <b>5</b>               | <b>316,0569</b>                   | <b>3,107780</b> | <b>0,030953</b>   |
| Ostatak   | 2033,972                     | 20                     | 101,6986                          |                 |                   |

**Tablica 37. Analiza varijance latinskog kvadrata za granicu proporcionalnosti  $R_{p0.2}$  - kraj blokova**

| <b>Granica proporcionalnosti <math>R_{p0.2}</math> [MPa] - kraj blokova; Mean = 194,444</b> |                              |                        |                                   |          |                   |
|---|------------------------------|------------------------|-----------------------------------|----------|-------------------|
| Varijable   | Suma kvadrata odstupanja, SS | Stupnjevi slobode, n-1 | Srednji kvadrat odstupanja, $s^2$ | Frač     | Pogreška 1. vrste |
| Šarža   | 107,472                      | 5                      | 21,4944                           | 0,124240 | 0,985282          |
| Visina ploče  | 397,972                      | 5                      | 79,5944                           | 0,460065 | 0,801148          |
| Širina ploče  | 2265,806                     | 5                      | 453,1611                          | 2,619323 | 0,055976          |
| Ostatak   | 3460,139                     | 20                     | 173,0069                          |          |                   |

Utjecaj pojedinih varijabli na granicu proporcionalnosti ukazuje da postoji veliki utjecaj sva tri izvora varijabilnosti i da nema povezanosti unutar jedne šarže niti između šarži uzetih s početka i kraja blokova.

Koeficijenti korelacije za granicu proporcionalnosti  $r_s (R_{p0.2})$ , između početka i kraja pojedinačnog bloka, odnosno šarže su vrlo niski (tablica 38) i ukazuju na neprimjerenost ove varijable u ocjeni stupnja homogenosti lijevanih blokova.

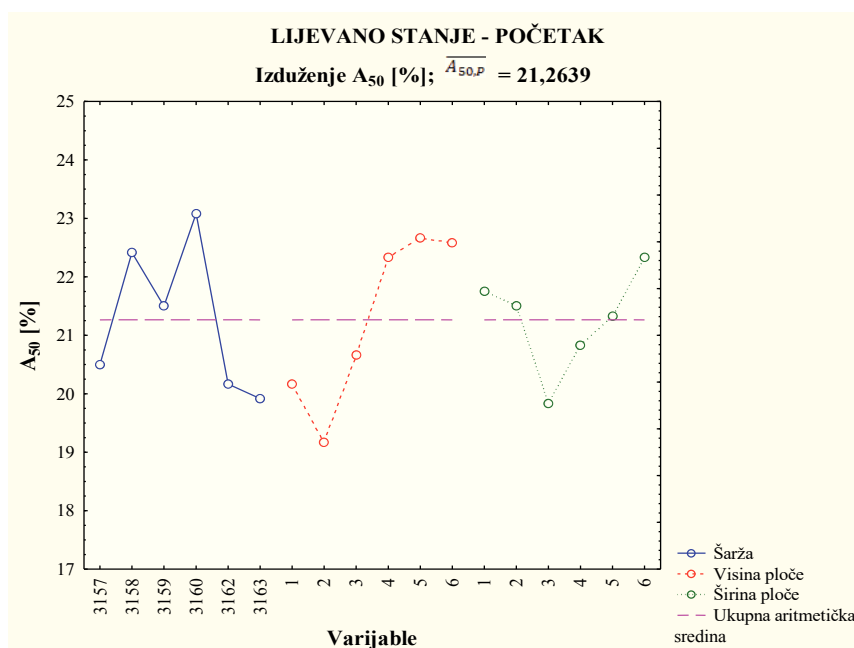
**Tablica 38. Koeficijenti korelacije za granicu proporcionalnosti  $r_s (R_{p0.2})$ , između ploča uzetih s početka i kraja ispitivanih blokova za svaku pojedinačnu šaržu**

| Šarža            | 3157 | 3158 | 3159 | 3160 | 3162 | 3163 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| $r_s (R_{p0.2})$ | 0,55 | 0,09 | 0,37 | 0,05 | 0,01 | 0,30 |

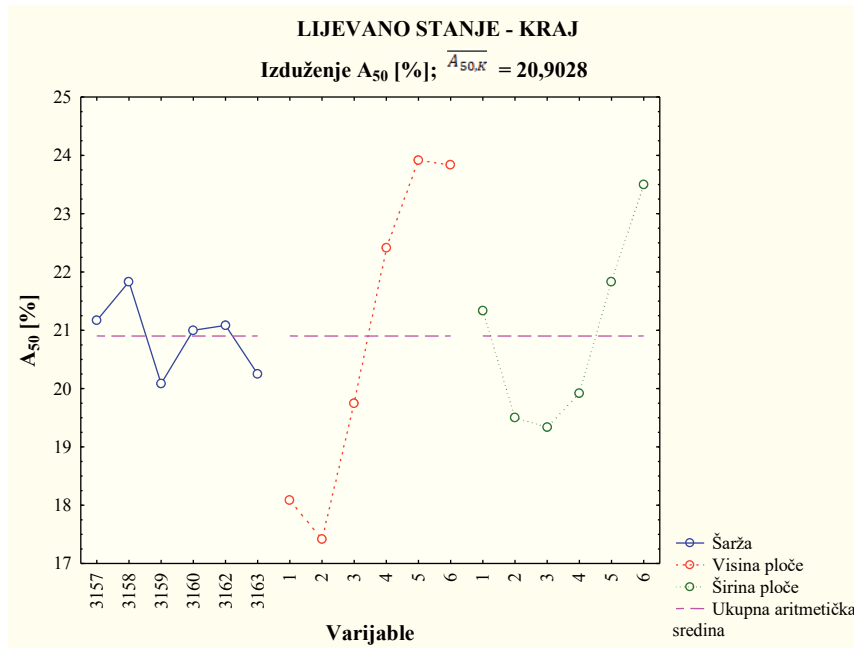
Iz dobivenog ukupnog koeficijenta korelacije za granicu proporcionalnosti  $r (R_{p0.2}) = 0,27$ , potvrđuje se činjenica da granica proporcionalnosti odražava svojstva plastičnosti ispitivanog materijala. Pošto je ovo lijevano stanje, tj. primarno i nehomogenizirano, rezultati upućuju na potrebu homogenizacijskog žarenja u cilju poboljšanja plastičnosti. Granica proporcionalnosti, kao parametar, nije relevantna za ocjenu homogenosti materijala u lijevanom stanju.

#### 4.3.4. UTJECAJ IZVORA VARIJABILNOSTI NA IZDUŽENJE

Na slikama 46 i 47 dan je grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za *izduženje  $A_{50}$ , za početak i kraj* ispitivanih lijevanih blokova.



**Slika 46. Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za *izduženje  $A_{50}$  - početak blokova***



**Slika 47. Grafički prikaz utjecaja pojedinih varijabli po nivoima za izduženje  $A_{50}$  - kraj blokova**

Utjecaj pojedinih varijabli po nivoima za izduženje  $A_{50}$  - početak blokova, slika 46, pokazuje:

- utjecaj *šarži* pokazuje velike varijacije i to u oba smjera u odnosu na ukupnu aritmetičku sredinu ( $\overline{A_{50,P}} = 21,2639\%$ ),
- utjecaj *visine ploče* pokazuje djelomičnu zakonitost po nivoima od -1,09722% za nivo  $i = 1$  (sredina bloka) do +1,31944% za nivo  $i = 6$  (rub bloka), s trendom povećanja izduženja od sredine prema užim rubovima blokova,
- utjecaj *širine ploče* varira od -1,43056% do +1,06944%, gdje je izduženje veće uz rubove blokova.

Utjecaj pojedinih varijabli po nivoima za izduženje  $A_{50}$  - kraj blokova, slika 47, pokazuje:

- utjecaj *šarži* pokazuje manje varijacije u odnosu na početak blokova u odnosu na ukupnu aritmetičku sredinu ( $\overline{A_{50,K}} = 20,9028\%$ ),
- utjecaj *visine ploče* pokazuje djelomičnu zakonitost po nivoima od -2,81944% za nivo  $i = 1$  (sredina bloka) do +2,93056% za nivo  $i = 6$  (rub bloka), slično kao i za početke uz malo veća odstupanja od ukupne aritmetičke sredine, a prikaz također prati trend broja zrna po jedinici površine i vlačne čvrstoće,
- utjecaj *širine ploče* varira od -1,56944% do +2,59722, gdje je izduženje veće uz rubove blokova.

Početak i kraj blokova su pokazali vrlo slične činjenice pod utjecajem pojedinih varijabli po nivoima, ali s različitim intenzitetom odstupanja. Usporedbom vrijednosti ukupnih aritmetičkih sredina za izduženje također je vidljivo da su vrijednosti gotovo jednake za početak i kraj blokova ( $\overline{A_{50,P}} = 21,2639\%$ ,  $\overline{A_{50,K}} = 20,9028\%$ ).

Iz grafičkih prikaza utjecaja pojedinih varijabli može se zaključiti da vrijednosti izduženja (i po visini i po širini blokova) prate trend promjene broja zrna po jedinici površine i vrijednosti vlačne čvrstoće.

Iz tablice analize varijance za *izduženje A<sub>50</sub> - početak blokova*, tablica 39, uočava se da su sva tri izvora varijabilnosti vrlo značajna.

**Tablica 39. Analiza varijance latinskog kvadrata za *izduženje A<sub>50</sub> - početak blokova***

| <b>Izduženje A<sub>50</sub> [%] - početak blokova; Mean = 21,2639</b> |                              |                        |  |          |                   |
|---|------------------------------|------------------------|--|----------|-------------------|
| Varijable   | Suma kvadrata odstupanja, SS | Stupnjevi slobode, n-1 | Srednji kvadrat odstupanja, s <sup>2</sup> | Frač     | Pogreška 1. vrste |
| Šarža   | 49,78472                     | 5                      | 9,95694                                    | 7,226815 | 0,000520          |
| Visina ploče  | 64,86806                     | 5                      | 12,97361                                   | 9,416331 | 0,000098          |
| Širina ploče  | 22,03472                     | 5                      | 4,40694                                    | 3,198589 | 0,027800          |
| Ostatak   | 27,55556                     | 20                     | 1,37778                                    |          |                   |

Iz tablice analize varijance za *izduženje A<sub>50</sub> - kraj blokova*, tablica 40, uočava se da su izvori varijabilnosti *visina ploče* i *širina ploče* vrlo značajni. Izvor varijabilnosti *šarža* za *izduženje A<sub>50</sub> - kraj blokova*, nije značajan.

**Tablica 40. Analiza varijance latinskog kvadrata za *izduženje A<sub>50</sub> - kraj blokova***

| <b>Izduženje A<sub>50</sub> [%] - početak blokova; Mean = 20,9028</b> |                              |                        |  |          |                   |
|---|------------------------------|------------------------|--|----------|-------------------|
| Varijable   | Suma kvadrata odstupanja, SS | Stupnjevi slobode, n-1 | Srednji kvadrat odstupanja, s <sup>2</sup> | Frač     | Pogreška 1. vrste |
| Šarža   | 12,4514                      | 5                      | 2,49028                                    | 0,77351  | 0,580054          |
| Visina ploče  | 248,3681                     | 5                      | 49,67361                                   | 15,42925 | 0,000003          |
| Širina ploče  | 79,2014                      | 5                      | 15,84028                                   | 4,92019  | 0,004258          |
| Ostatak   | 64,3889                      | 20                     | 3,21945                                    |          |                   |

Koeficijenti korelacije za *izduženje r<sub>s</sub> (A<sub>50</sub>)*, između početka i kraja pojedinačnog bloka, odnosno *šarže*, tablica 41, upućuju na relativnu homogenost blokova s aspekta *izduženja*, gdje se značajnije odstupanje uočava jedino kod *šarže 3158*.

**Tablica 41. Koeficijenti korelacije za *izduženje r<sub>s</sub> (A<sub>50</sub>)*, između ploča uzetih s početka i kraja ispitivanih blokova za svaku pojedinačnu šaržu**

|                                   |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Šarža                             | 3157 | 3158 | 3159 | 3160 | 3162 | 3163 |
| r <sub>s</sub> (A <sub>50</sub> ) | 0,94 | 0,26 | 0,83 | 0,67 | 0,79 | 0,80 |

Ukupni koeficijent korelacije za *izduženje r (A<sub>50</sub>) = 0,66*, pokazuje da ipak postoji povezanost između početaka i krajeva blokova. Ukazuje se na relativnu homogenost *izduženja* po svim parametrima za početak i kraj blokova, osim za parametar *šarža* kod *izduženja* za kraj blokova.

## 5. ZAKLJUČAK

Razradom eksperimentalnih rezultata ispitivanja mikrostrukturnih i vlačnih svojstava šest blokova aluminijske legure EN AW-5083 lijevanih polukontinuiranim vertikalnim DC postupkom te njihovom statističkom obradom utvrdilo se sljedeće:

1. Ispitivanjem mikrostrukture unutar svih ispitivanih ploča uočava se nejednolika raspodjela istoosnih zrna bez zone stubičastih kristala. Najznačajniji izvor varijabilnosti broja zrna po jedinici ispitivane površine je *visina ploče* koji i za početke i za krajeve pokazuje dosta izraženu zakonitost po nivoima - povećanje broja zrna od sredine prema rubovima ploča što je posljedica različitog intenzita hlađenja, odnosno različitih brzina hlađenja. Izvor varijabilnosti *širina ploče* pokazuje sličnu zakonitost za početke i krajeve blokova, gdje je uglavnom prisutan trend rasta zrna uz rubove bloka. Ukupne srednje vrijednosti broja zrna su gotovo jednake za početak i kraj blokova, dok je ukupni koeficijent korelacije  $r(N_A) = 0,77$  vrlo visok. Sve to ukazuje na relativno visoku homogenost blokova s aspekta mikrostrukture i na adekvatno primijenjenu tehnologiju obrade i ispravne parametre lijevanja i hlađenja taline te učinkovito cijepljenje.
2. Glavni izvor varijabilnosti za vlačnu čvrstoću  $R_m$  i za početke i za krajeve blokova je *visina ploče* čije vrijednosti rastu po visini od sredine prema rubu s vrlo izraženom zakonitosti po razinama koja prati trend promjene broja zrna. Ukupne srednje vrijednosti vlačne čvrstoće za početak i kraj blokova su također gotovo jednake, dok relativno visok ukupni koeficijent korelacije  $r(R_m) = 0,72$  implicira kemijsku i strukturnu jednodolnost blokova. Zaključuje se da je proces lijevanja i skrućivanja stabilan, ponovljiv te adekvatno primijenjen.
3. Kod granice proporcionalnosti je vidljiv utjecaj sva tri izvora varijabilnosti te nema povezanosti unutar jedne šarže niti između ploča uzetih s početka i krajeva blokova. Pošto je ispitivani materijal u primarnom, lijevanom stanju, rezultati upućuju na potrebu homogenizacijskog žarenja da bi se poboljšala plastičnost. Granica proporcionalnosti, kao parametar, nije relevantna za ocjenu homogenosti materijala u lijevanom stanju.
4. Najznačajniji izvori varijabilnosti za izduženje predstavljaju *visina* i *širina ploče* čije vrijednosti rastu i po visini i po širini od sredine prema rubu s vrlo izraženom zakonitosti po razinama koja također prati trend promjene broja zrna. Ukupne srednje vrijednosti izduženja za početak i kraj blokova su gotovo jednake, dok relativno visok ukupni koeficijent korelacije  $r(A_{50}) = 0,66$  ukazuje na relativnu homogenost blokova s aspekta izduženja.
5. Uspoređujući dobivene vrijednosti ukupnih koeficijenata korelacije za broj zrna po jedinici ispitivane površine, vlačnu čvrstoću i izduženje koje se nalaze u rasponu od 0,66 do 0,77, vidljivo je da su ispitivani lijevani blokovi aluminijske legure EN AW-5083 u svih 6 šarži pokazali zadovoljavajuću kemijsku, mikrostrukturnu i mehaničku homogenost. Promatrajući cijeli postupak, od taljenja, obrade taline i lijevanja blokova aluminijske legure EN AW-5083 zaključuje se da je postupak relativno konzistentan i ponovljiv. Upućuje se na važnost kontrole procesnih varijabli i svojstava lijevanog proizvoda da bi se navedene varijable mogle optimizirati.

## 6. LITERATURA

- [1] Z. Lenhard, Metalurgija obojenih metala II, Interna skripta, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [2] Handbook of Extractive Metallurgy, ed. F. Habashi, Weinheim, Federal Republic of Germany, Weinheim: WILEY - VCH, 1997.
- [3] M. Mišović, N. Tadić, D. Lučić, Deformation Characteristics of Aluminium Alloys, Građevinar, **68**(2016) 3, str. 179-189.
- [4] <http://www.world-aluminium.org/statistics/> - Primary Aluminium Production [06. prosinac 2018.]
- [5] <https://www.european-aluminium.eu/data/industry-overview/> - European Overview: Aluminium Plants Location [06. prosinac 2018.]
- [6] Total Materia, Euronorm Standard List: Aluminium Materials, 2011., <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=EN&site=KTS&NM=324> [06. prosinac 2018.]
- [7] T. Alam, A. H. Ansari, Review on Aluminium and Its Alloys for Automotive Applications, International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, **5**(2017) 5, str. 278-294.
- [8] N. Dolić, Homogenost blokova Al-slitine 5083 proizvedenih vertikalnim DC postupkom, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2006.
- [9] I. Duplančić, Obrada deformiranjem, Interna skripta, Sveučilište u Splitu Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2004.
- [10] M. Glazoff, V. Zolotarevsky, N. Belov, Casting Aluminium Alloys, Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands, 2007.
- [11] D. Kopeliovich, Cast aluminium alloys, SubsTech, 2013. [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=cast\\_aluminum\\_alloys](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=cast_aluminum_alloys) [02. veljače 2019.]
- [12] <http://web.deu.edu.tr/metalurjimalzeme/pdf/MME5059aluminium-technologies/ALUMINIUMTECHNOLOGIES-week8.pdf> [2. veljače 2019.]
- [13] Z. Zovko Brodarac, Teorija lijevanja metala, Interna skripta, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2017.
- [14] Ø. Ryen, Work Hardening and Mechanical Anisotropy of Aluminium Sheets and Profiles, Doctoral Thesis, Fakultet for naturvitenskap og teknologi, Trondheim, 2003.
- [15] Aluminium: Properties and Physical Metallurgy, ur. J. E. Hatch, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1984.
- [16] Total Materia, Precipitation of Aluminium Alloys, 2010. <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=235> [08. prosinac 2018.]
- [17] D. Kopeliovich, Precipitation hardening, SubsTech, 2012. [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=precipitation\\_hardening](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=precipitation_hardening) [02. veljače 2019.]
- [18] EN 515: 1993, Aluminium and Aluminiumlegierungen; Halbzeug Bezeichnungen der Werkstoffzustaende, European Comittee for Standardization, Brussels, 1993.
- [19] Specifications, Properties, Classifications and Classes, Aalco - Ferrous and Non - Ferrous Metals Stockist, 2005. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863> [08. prosinac 2018.]
- [20] D. Kopeliovich, Wrought Aluminium Alloys, SubsTech, 2012. [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=wrought\\_aluminum\\_alloys#non-heat-treatable\\_alloys](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=wrought_aluminum_alloys#non-heat-treatable_alloys) [02. veljače 2019.]
- [21] D. Kopeliovich, Effects of Alloying Elements on Properties of Aluminium Alloys, SubsTech, 2012.



- [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=effects\\_of\\_alloying\\_elements\\_on\\_properties\\_of\\_aluminum\\_alloys](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=effects_of_alloying_elements_on_properties_of_aluminum_alloys) [09. prosinac 2018.]
- [22] J. Medved, Tehnologija aluminija, Interna skripta, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana, 2017.
- [23] ASM Specialty Handbook<sup>®</sup>, Aluminium and Aluminium Alloys, ur. J. R. Davis, ASM International, Materials Park, Ohio, 2001.
- [24] EN 573-1: 1994, Aluminium and Aluminium Alloys - Chemical Composition and Form of Wrought Products - Part 1: Numerical Designation System, European Committee for Standardization, Brussels, 1994.
- [25] EN 573-2: 1994, Aluminium and Aluminium Alloys - Chemical Composition and Form of Wrought Products - Part 2: Chemical Symbol Based Designation System, European Committee for Standardization, Brussels, 1994.
- [26] A. Mishra, Friction Stir Welding of Dissimilar Metal: A Review, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, **6**(2018) 1, pp. 1551-1559.
- [27] R. Goswami, G. Spanos, P. S. Pao, R. L. Holty, Precipitation behaviour of the  $\beta$  phase in Al-5083, Materials Science and Engineering A, **527**(2017) 100, pp. 1089-1095.
- [28] D. Kopeliovich, Wrought Aluminium-Magnesium Alloys (5xxx), SubsTech, 2012.  
[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=wrought\\_aluminum-magnesium\\_alloys\\_5xxx](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=wrought_aluminum-magnesium_alloys_5xxx) [08. prosinac 2018.]
- [29] Wrought Aluminium-Magnesium Alloys 5083, SubsTech, 2012.  
[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=wrought\\_aluminum-magnesium\\_alloy\\_5083](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=wrought_aluminum-magnesium_alloy_5083) [10. prosinac 2018.]
- [30] EN 573-3: 2002, Aluminium and Aluminium Alloys - Chemical Composition and Form of Wrought Products - Part 3: Chemical Compositions, European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
- [31] Y. Liu, Y. Sun, L. Zhang, Y. Zhao, J. Wang, C. Liu, Microstructure and Mechanical Properties of Al-5Mg-0.8Mn Alloys with Various Contents of Fe and Si Cast under Near-Rapid Cooling, Metals, **7**(2017), pp. 428.
- [32] <https://www.nedal.com/wp-content/uploads/2017/11/Nedal-alloy-Datasheet-EN-AW-5083.pdf> [05. veljače 2019.]
- [33] <http://www.almet-marine.com/images/clients/EN/Aluminium-users-guide/Ch03-aluminium-alloys-in-marine-applications.pdf> [3. veljače 2019.]
- [34] C. Huang, Z. Wu, R. Huang, W. Wang, L. Li, Mechanical Properties of AA5083 in Different Tempers at Low Temperatures, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, (2017), pp. 279.
- [35] <http://www.calm-aluminium.com.au/Documents/Aluminium-Alloys.pdf> [5. veljače 2019.]
- [36] N. Dolić, Utjecaj uvjeta skrućivanja i hlađenja svojstva polukontinuirano lijevanih blokova Al-Mg slitine, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [37] D. Kopeliovich, Direct Chill (DC) casting, SubsTech, 2012.  
[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=direct\\_chill\\_dc\\_casting](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=direct_chill_dc_casting) [12. prosinac 2018.]
- [38] R. E. Ortega Pelayo, Direct Chill and Fusion<sup>™</sup> Casting of Aluminium Alloys, , Master Thesis, University of Waterloo, Waterloo, 2012.
- [39] J. F. Grandfield, D. G. Eskin, I. F. Bainbridge, Direct-Chill Casting of Light Alloys, Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2013.
- [40] KN. Lie, YH. Chen, MT. Tsai, A Control System Analysis of a Direct-Chill Cast Process of Aluminium Ingots by an Inverse Measured Method, International Journal of Applied Science and Engineering, **12**(2014) 4, pp. 257-274.



- [41] T. Matković, P. Matković, Fizikalna metalurgija I, Interna skripta, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2009.
- [42] D. G. Eskin, Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminium Alloys, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2008.
- [43] A. Larouche, C. Brochu, Solidification Conditions in Aluminium DC Sheet Ingot: Understanding and Control, 31<sup>st</sup> Annual Conference of Metallurgists on Light Metals (CIM), Montreal, Quebec, 1996., pp. 597-604.
- [44] R. Nadella, D. G. Eskin, Q. Du, L. Katgerman, Macro-segregation in Direct-Chill Casting of Aluminium Alloys, Progress in Materials Science, **53**(2008), pp. 421-480.
- [45] A. L. Greer, Grain Refinement of Aluminium Alloys, The Minerals, Metals & Materials Society, 2004., pp. 131-145.
- [46] R. G. Guan, D. Tie, A Review on Grain Refinement of Aluminium Alloys, Progresses, Challenges and Prospects, Acta Metallurgica-Sinica (English-Letters), **30**(2017) 5, pp. 409-432
- [47] K. Narasimhan, Master Thesis, Multiscale simulation of Aluminium casting: Cooling rate and grain size, Bochum: Interdisciplinary Centre for Advanced Materials Simulations (ICAMS), Ruhr-Universität Bochum, 2017.
- [48] Z. Zovko Brodarac, Lijevanje neželjeznih metala, Interna skripta, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2018.
- [49] V. Šuica, Ispitivanje svojstava AlSi7Mg legure, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2016.
- [50] D. Stefanescu, Science and Engineering of Casting Solidification, New York, 2002.
- [51] D. Eskin, Mechanism of Macro-Segregation in Direct-Chill Casting of Aluminium Alloys, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference of Aluminium Alloys, 2010, pp. 185-192.
- [52] N. Jamaly, N. Haghdadi, A. B. Phillion, Microstructure, Macro-segregation and Thermal Analysis of Direct Chill Cast AA5182 Aluminium Alloy, Journal of Materials Engineering and Performance, **24**(2015) 5, pp. 2067-2073.
- [53] S. Samaray, G. N. Haidemenopoulos, Modelling of microsegregation and homogenization of 6061 extrudable Al-alloy, Journal of Materials Processing Technology, **194**(2007) 1-3, pp. 63-73.
- [54] M. Ukrainczyk, Planiranje pokusa u industriji, Hrvatski časopis za prehrambenu tehnologiju, biotehnologiju i nutricionizam, **5**(2010) 3-4, str. 96-105
- [55] H. Cajner, Oblikovanje planova pokusa, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu Fakultet Strojarsstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [56] N. Šakić, Planiranje i analiza pokusa u istraživačkom radu, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [57] Đ. Vasilj, Biometrika i eksperimentiranje u bilnogojstvu, Hrvatsko agronomsko društvo, 2000.
- [58] [https://www.fmf.uni-lj.si/~skreko/Pouk/dm2/2006-7/Predavanja/Seminarske/Latinski\\_kvadrati.pdf](https://www.fmf.uni-lj.si/~skreko/Pouk/dm2/2006-7/Predavanja/Seminarske/Latinski_kvadrati.pdf) [16. siječanj 2019.]
- [59] ISO 6892-1:2016, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at Room temperature, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2016.
- [60] E 1382-97, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis, American National Standard Institute / ASTM, 1997.
- [61] N. Grubešić, Karakterizacija procesa uporabom metode regresijske analize i analize varijance, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.

- [62] D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiment, John Wiley & Sons, New Jersey, 2008.
- [63] <https://www.statisticssolutions.com/anova-analysis-of-variance> [22. siječanj 2019.]
- [64] S. Hadživuković, Statistički metodi, Radnički univerzitet: Radivoj Čiparov, Novi Sad, 1973.

## 7. ŽIVOTOPIS

### OSOBNI PODATCI:

Ime i prezime: Ivana Bunjan, univ. bacc. ing. met.  
Datum i mjesto rođenja: 9. ožujak 1994., Sisak  
Adresa: Zagrebačka ulica 37, 44000 Sisak  
Telefon: 091/439-5555  
e-mail: [ivana.bunjan@yahoo.com](mailto:ivana.bunjan@yahoo.com)

### OBRAZOVANJE:

2000. - 2008. Osnovna škola „Braća Ribar“, Sisak  
2008. - 2012. Gimnazija Sisak, jezična gimnazija  
2013. - 2019. Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet

### RADNO ISKUSTVO:

2016. Integral Group, Zagreb - Suradnik  
2016. - 2017. Euroherc osiguranje d.d., Sisak - Agent u Call Centru  
2018. Euroherc osiguranje d.d., Sisak - Prodajni predstavnik

### VJEŠTINE:

Rad na računalu Dobro poznavanje operativnog sustava Windows, korištenje paketnog programa MS Office, rad u nekoliko programa za 2D i 3D modeliranje  
Strani jezik Engleski (aktivno), Njemački (pasivno)

### NAGRADE I PRIZNANJA:

Dekanova nagrada za akademsku godinu 2014./2015., 2015./2016., 2017./2018., Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet  
Velika pohvala Magna Cum Laude Baccalaureus, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet 2016.  
Stipendija za izvrsnost Sveučilišta u Zagrebu za akademsku godinu 2015./2016., 2016./2017., 2017./2018., 2018./2019.

### ZNANSTVENA DJELATNOST:

N. Dolić, I. Bunjan, F. Kozina, Correlation of Mechanical and Microstructural Properties in As-Cast Condition of EN AW-5083 Aluminium Alloy Using Statistical Analysis, Proceedings Book of 18th International Foundrymen Conference - Coexistence of Material Science and Sustainable Technology in Economic Growth, ur. N. Dolić, Z. Zovko Brodarac, A. Begić Hadžipašić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, 15. - 17. 5May 15<sup>th</sup> - 17<sup>th</sup> 2019, Sisak  
I. Bunjan, V. Džomba, Z. Zovko Brodarac, 17IFC - Book of Abstracts - Students Section - Hi-tech Casting Solution and Knowledge Based Engineering, ur. Lj. Slokar, Z. Zovko Brodarac, N. Dolić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, 16. - 18. 5. 2018., Opatija - Osvojeno 1. mjesto  
Znanstveni rad „ Procjena kvalitete odljevka primjenom numeričke simulacije“ - XXI. Tehnologijada Umag 2017.  
Znanstveni rad „Određivanje deformacije metodom vizioplastičnosti“ - XIX. Tehnologijada Makarska 2015.

## 8. PRILOZI

### POPIS TABLICA PRILOGA

|              |   |   |
|--------------|---|---|
| Tablica P.1. | <b>Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije (<math>V_P</math>) za broj zrna, <math>N_A</math> - početak bloka</b>                      | 2 |
| Tablica P.2. | <b>Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije (<math>V_P</math>) za broj zrna, <math>N_A</math> - kraj bloka</b>                         | 2 |
| Tablica P.3. | <b>Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije (<math>V_P</math>) za vlačnu čvrstoću, <math>R_m</math> - početak bloka</b>                | 3 |
| Tablica P.4. | <b>Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije (<math>V_P</math>) za vlačnu čvrstoću, <math>R_m</math> - kraj bloka</b>                   | 3 |
| Tablica P.5. | <b>Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije (<math>V_P</math>) za granicu proporcionalnosti, <math>R_{p0.2}</math> - početak bloka</b> | 4 |
| Tablica P.6. | <b>Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije (<math>V_P</math>) za granicu proporcionalnosti, <math>R_{p0.2}</math> - kraj bloka</b>    | 4 |
| Tablica P.7. | <b>Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije (<math>V_P</math>) za izduženje, <math>A_{50}</math> - početak bloka</b>                   | 5 |
| Tablica P.8. | <b>Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije (<math>V_P</math>) za izduženje, <math>A_{50}</math> - kraj bloka</b>                      | 5 |

**Tablica P.1. Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije ( $V_P$ ) za broj zrna,  $N_A$  - početak bloka**

| <b>Broj zrna, <math>N_A</math> [No./mm<sup>2</sup>] – početak bloka</b> |             |                            |                           |                              |                                |
|---|-------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| <b>Utjecaji</b>   | <b>Nivo</b> | <b>Srednja vrijednosti</b> | <b>Procjena parametra</b> | <b>Standardna devijacija</b> | <b>Koeficijenti varijacije</b> |
| <b>Šarža</b>  | 3157        | 105,6283                   | 5,2942                    | 32,86080                     | 31,11                          |
|   | 3158        | 107,9917                   | 7,6575                    | 21,99246                     | 20,36                          |
|   | 3159        | 99,3950                    | -0,9392                   | 27,25960                     | 27,43                          |
|   | 3160        | 101,0183                   | 0,6842                    | 25,56044                     | 25,30                          |
|   | 3162        | 101,1283                   | 0,7942                    | 19,12539                     | 18,91                          |
|   | 3163        | 86,8433                    | -13,4908                  | 22,92606                     | 26,40                          |
| <b>Visina ploče</b>   | 1.          | 84,3550                    | -15,9792                  | 3,96562                      | 4,70                           |
|   | 2.          | 80,7817                    | -19,5525                  | 16,05324                     | 19,87                          |
|   | 3.          | 87,1567                    | -13,1775                  | 14,21130                     | 16,31                          |
|   | 4.          | 97,7400                    | -2,5942                   | 15,01030                     | 15,36                          |
|   | 5.          | 113,9300                   | 13,5958                   | 18,46700                     | 16,21                          |
|   | 6.          | 138,0417                   | 37,7075                   | 14,98993                     | 10,86                          |
| <b>Širina ploče</b>   | 1.          | 107,7300                   | 7,3958                    | 18,25407                     | 16,94                          |
|   | 2.          | 103,1450                   | 2,8108                    | 32,96542                     | 31,96                          |
|   | 3.          | 95,3650                    | -4,9692                   | 26,98350                     | 28,29                          |
|   | 4.          | 99,6317                    | -0,7025                   | 34,77328                     | 34,90                          |
|   | 5.          | 100,3467                   | 0,0125                    | 23,35017                     | 23,27                          |
|   | 6.          | 95,7867                    | -4,5475                   | 11,97817                     | 12,51                          |

**Tablica P.2. Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije ( $V_P$ ) za broj zrna,  $N_A$  - kraj bloka**

| <b>Broj zrna, <math>N_A</math> [No./mm<sup>2</sup>] - kraj bloka</b> |             |                            |                           |                              |                                |
|--|-------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| <b>Utjecaji</b>  | <b>Nivo</b> | <b>Srednja vrijednosti</b> | <b>Procjena parametra</b> | <b>Standardna devijacija</b> | <b>Koeficijenti varijacije</b> |
| <b>Šarža</b>   | 3157        | 98,2050                    | -3,2067                   | 30,19899                     | 30,75                          |
|  | 3158        | 101,6583                   | 0,2467                    | 33,88675                     | 33,33                          |
|  | 3159        | 120,2450                   | 18,8333                   | 29,51894                     | 24,55                          |
|  | 3160        | 112,6483                   | 11,2367                   | 24,82696                     | 22,04                          |
|  | 3162        | 97,1400                    | -4,2717                   | 29,13886                     | 30,00                          |
|  | 3163        | 78,5733                    | -22,8383                  | 30,28725                     | 38,55                          |
| <b>Visina ploče</b>  | 1.          | 76,7483                    | -24,6633                  | 25,54074                     | 33,28                          |
|  | 2.          | 85,9733                    | -15,4383                  | 28,71658                     | 33,40                          |
|  | 3.          | 91,8233                    | -9,5883                   | 20,20880                     | 22,01                          |
|  | 4.          | 89,2417                    | -12,1700                  | 11,77404                     | 13,19                          |
|  | 5.          | 117,5667                   | 16,1550                   | 10,56521                     | 8,99                           |
|  | 6.          | 147,1167                   | 45,7050                   | 17,09549                     | 11,62                          |
| <b>Širina ploče</b>  | 1.          | 117,6917                   | 16,2800                   | 26,18449                     | 22,25                          |
|  | 2.          | 94,8633                    | -6,5483                   | 42,59683                     | 44,90                          |
|  | 3.          | 99,7667                    | -1,6450                   | 41,70387                     | 41,80                          |
|  | 4.          | 94,3667                    | -7,0450                   | 27,84610                     | 29,51                          |
|  | 5.          | 93,6100                    | -7,8017                   | 21,70263                     | 23,18                          |
|  | 6.          | 108,1717                   | 6,7600                    | 22,49151                     | 20,79                          |

**Tablica P.3. Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije ( $V_P$ ) za vlačnu čvrstoću,  $R_m$  - početak bloka**

| <b>Vlačna čvrstoća, <math>R_m</math> [MPa] – početak bloka</b> |             |                            |                           |                              |                                |
|--|-------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| <b>Utjecaji</b>  | <b>Nivo</b> | <b>Srednja vrijednosti</b> | <b>Procjena parametra</b> | <b>Standardna devijacija</b> | <b>Koeficijenti varijacije</b> |
| <b>Šarža</b>   | 3157        | 248,8333                   | -8,86111                  | 11,32549                     | 4,55                           |
|  | 3158        | 261,8333                   | 4,13889                   | 6,49359                      | 2,48                           |
|  | 3159        | 261,7500                   | 4,05556                   | 2,80624                      | 1,07                           |
|  | 3160        | 260,9167                   | 3,22222                   | 3,59745                      | 1,38                           |
|  | 3162        | 255,6667                   | -2,02778                  | 6,94022                      | 2,71                           |
|  | 3163        | 257,1667                   | -0,52778                  | 7,48109                      | 2,91                           |
| <b>Visina ploče</b>  | 1.          | 249,9167                   | -7,77778                  | 11,84659                     | 4,74                           |
|  | 2.          | 252,6667                   | -5,02778                  | 8,60039                      | 3,40                           |
|  | 3.          | 256,9167                   | -0,77778                  | 4,35220                      | 1,69                           |
|  | 4.          | 261,0833                   | 3,38889                   | 4,22394                      | 1,62                           |
|  | 5.          | 262,5833                   | 4,88889                   | 3,76054                      | 1,43                           |
|  | 6.          | 263,0000                   | 5,30556                   | 1,58114                      | 0,60                           |
| <b>Širina ploče</b>  | 1.          | 259,7500                   | 2,05556                   | 4,82442                      | 1,86                           |
|  | 2.          | 255,4167                   | -2,27778                  | 9,61986                      | 3,77                           |
|  | 3.          | 255,0000                   | -2,69444                  | 12,58173                     | 4,93                           |
|  | 4.          | 257,4167                   | -0,27778                  | 9,23264                      | 3,59                           |
|  | 5.          | 257,4167                   | -0,27778                  | 6,08619                      | 2,36                           |
|  | 6.          | 261,1667                   | 3,47222                   | 4,07022                      | 1,56                           |

**Tablica P.4. Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije ( $V_P$ ) za vlačnu čvrstoću,  $R_m$  - kraj bloka**

| <b>Vlačna čvrstoća, <math>R_m</math> [MPa] – kraj bloka</b> |             |                            |                           |                              |                                |
|---|-------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| <b>Utjecaji</b>   | <b>Nivo</b> | <b>Srednja vrijednosti</b> | <b>Procjena parametra</b> | <b>Standardna devijacija</b> | <b>Koeficijenti varijacije</b> |
| <b>Šarža</b>  | 3157        | 255,1667                   | -3,3750                   | 14,71620                     | 5,77                           |
|   | 3158        | 259,0000                   | 0,4583                    | 10,20294                     | 3,94                           |
|   | 3159        | 261,5000                   | 2,9583                    | 3,14643                      | 1,20                           |
|   | 3160        | 259,5833                   | 1,0417                    | 12,88183                     | 4,96                           |
|   | 3162        | 257,7500                   | -0,7917                   | 9,93353                      | 3,85                           |
|   | 3163        | 258,2500                   | -0,2917                   | 13,02594                     | 5,04                           |
| <b>Visina ploče</b>   | 1.          | 240,5833                   | -17,9583                  | 10,60857                     | 4,41                           |
|   | 2.          | 255,3333                   | -3,2083                   | 5,72422                      | 2,24                           |
|   | 3.          | 260,4167                   | 1,8750                    | 4,68419                      | 1,80                           |
|   | 4.          | 263,3333                   | 4,7917                    | 1,36626                      | 0,52                           |
|   | 5.          | 265,4167                   | 6,8750                    | 6,23231                      | 2,35                           |
|   | 6.          | 266,1667                   | 7,6250                    | 5,08593                      | 1,91                           |
| <b>Širina ploče</b>   | 1.          | 263,4167                   | 4,8750                    | 4,59801                      | 1,75                           |
|   | 2.          | 256,3333                   | -2,2083                   | 10,64268                     | 4,15                           |
|   | 3.          | 255,0000                   | -3,5417                   | 13,69672                     | 5,37                           |
|   | 4.          | 255,3333                   | -3,2083                   | 10,91635                     | 4,28                           |
|   | 5.          | 258,8333                   | 0,2917                    | 9,27182                      | 3,58                           |
|   | 6.          | 262,3333                   | 3,7917                    | 13,60760                     | 5,19                           |

**Tablica P.5. Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije ( $V_P$ ) za granicu proporcionalnosti,  $R_{p0.2}$  - početak bloka**

| <b>Granica proporcionalnosti, <math>R_{p0.2}</math> [MPa] – početak bloka</b> |             |                            |                           |                              |                                |
|---|-------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| <b>Utjecaji</b>   | <b>Nivo</b> | <b>Srednja vrijednosti</b> | <b>Procjena parametra</b> | <b>Standardna devijacija</b> | <b>Koeficijenti varijacije</b> |
| <b>Šarža</b>  | 3157        | 186,9167                   | -4,93056                  | 9,76431                      | 5,22                           |
|   | 3158        | 189,3333                   | -2,51389                  | 14,71620                     | 7,77                           |
|   | 3159        | 200,3333                   | 8,48611                   | 12,15182                     | 6,07                           |
|   | 3160        | 190,5833                   | -1,26389                  | 12,14667                     | 6,37                           |
|   | 3162        | 193,2500                   | 1,40278                   | 10,11311                     | 5,23                           |
|   | 3163        | 190,6667                   | -1,18056                  | 9,23941                      | 4,85                           |
| <b>Visina ploče</b>   | 1.          | 188,1667                   | -3,68056                  | 6,13732                      | 3,26                           |
|   | 2.          | 189,8333                   | -2,01389                  | 13,84798                     | 7,29                           |
|   | 3.          | 194,4167                   | 2,56944                   | 14,20006                     | 7,30                           |
|   | 4.          | 197,1667                   | 5,31945                   | 14,04160                     | 7,12                           |
|   | 5.          | 192,3333                   | 0,48611                   | 13,45610                     | 7,00                           |
|   | 6.          | 189,1667                   | -2,68056                  | 6,53197                      | 3,45                           |
| <b>Širina ploče</b>   | 1.          | 189,4167                   | -2,43056                  | 13,39932                     | 7,07                           |
|   | 2.          | 189,8333                   | -2,01389                  | 7,04746                      | 3,71                           |
|   | 3.          | 182,8333                   | -9,01389                  | 6,77249                      | 3,70                           |
|   | 4.          | 189,6667                   | -2,18056                  | 13,10216                     | 6,91                           |
|   | 5.          | 204,4167                   | 12,56944                  | 5,97843                      | 2,92                           |
|   | 6.          | 194,9167                   | 3,06944                   | 11,19561                     | 5,74                           |

**Tablica P.6. Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije ( $V_P$ ) za granicu proporcionalnosti,  $R_{p0.2}$  - kraj bloka**

| <b>Granica proporcionalnosti, <math>R_{p0.2}</math> [MPa] – kraj bloka</b> |             |                            |                           |                              |                                |
|--|-------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| <b>Utjecaji</b>  | <b>Nivo</b> | <b>Srednja vrijednosti</b> | <b>Procjena parametra</b> | <b>Standardna devijacija</b> | <b>Koeficijenti varijacije</b> |
| <b>Šarža</b>   | 3157        | 191,4167                   | -3,02778                  | 13,55513                     | 7,08                           |
|  | 3158        | 193,3333                   | -1,11111                  | 20,50285                     | 10,60                          |
|  | 3159        | 194,6667                   | 0,22222                   | 12,64384                     | 6,50                           |
|  | 3160        | 194,5000                   | 0,05556                   | 11,97497                     | 6,16                           |
|  | 3162        | 196,3333                   | 1,88889                   | 11,78417                     | 6,00                           |
|  | 3163        | 196,4167                   | 1,97222                   | 13,36195                     | 6,80                           |
| <b>Visina ploče</b>  | 1.          | 194,0833                   | -0,36111                  | 15,93555                     | 8,21                           |
|  | 2.          | 188,0000                   | -6,44445                  | 10,52616                     | 5,60                           |
|  | 3.          | 193,3333                   | -1,11111                  | 14,26768                     | 7,38                           |
|  | 4.          | 197,0000                   | 2,55556                   | 8,28251                      | 4,20                           |
|  | 5.          | 196,0000                   | 1,55556                   | 16,03746                     | 8,18                           |
|  | 6.          | 198,2500                   | 3,80556                   | 16,50985                     | 8,33                           |
| <b>Širina ploče</b>  | 1.          | 189,0833                   | -5,36111                  | 14,64383                     | 7,74                           |
|  | 2.          | 186,0000                   | -8,44445                  | 11,54556                     | 6,21                           |
|  | 3.          | 185,5000                   | -8,94445                  | 9,39681                      | 5,07                           |
|  | 4.          | 198,8333                   | 4,38889                   | 15,40346                     | 7,75                           |
|  | 5.          | 201,4167                   | 6,97222                   | 9,33497                      | 4,63                           |
|  | 6.          | 205,8333                   | 11,38889                  | 5,71548                      | 2,78                           |

**Tablica P.7. Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije ( $V_P$ ) za izduženje,  $A_{50}$  - početak bloka**

| <b>Izduženje, <math>A_{50}</math> [%] – početak bloka</b> |             |                            |                           |                              |                                |
|---|-------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| <b>Utjecaji</b>   | <b>Nivo</b> | <b>Srednja vrijednosti</b> | <b>Procjena parametra</b> | <b>Standardna devijacija</b> | <b>Koeficijenti varijacije</b> |
| <b>Šarža</b>  | 3157        | 20,50000                   | -0,76389                  | 2,428992                     | 11,85                          |
|   | 3158        | 22,41667                   | 1,15278                   | 0,917424                     | 4,09                           |
|   | 3159        | 21,50000                   | 0,23611                   | 1,048809                     | 4,88                           |
|   | 3160        | 23,08333                   | 1,81944                   | 1,744038                     | 7,56                           |
|   | 3162        | 20,16667                   | -1,09722                  | 2,228602                     | 11,05                          |
|   | 3163        | 19,91667                   | -1,34722                  | 2,653614                     | 13,32                          |
| <b>Visina ploče</b>                                       | 1.          | 20,16667                   | -1,09722                  | 3,125167                     | 15,50                          |
|   | 2.          | 19,16667                   | -2,09722                  | 2,065591                     | 10,78                          |
|   | 3.          | 20,66667                   | -0,59722                  | 1,632993                     | 7,90                           |
|   | 4.          | 22,33333                   | 1,06944                   | 0,516398                     | 2,31                           |
|   | 5.          | 22,66667                   | 1,40278                   | 1,632993                     | 7,20                           |
|   | 6.          | 22,58333                   | 1,31944                   | 0,491596                     | 2,18                           |
| <b>Širina ploče</b>                                       | 1.          | 21,75000                   | 0,48611                   | 0,987421                     | 4,54                           |
|   | 2.          | 21,50000                   | 0,23611                   | 2,588436                     | 12,04                          |
|   | 3.          | 19,83333                   | -1,43056                  | 2,483277                     | 12,52                          |
|   | 4.          | 20,83333                   | -0,43056                  | 3,060501                     | 14,69                          |
|   | 5.          | 21,33333                   | 0,06944                   | 1,722401                     | 8,07                           |
|   | 6.          | 22,33333                   | 1,06944                   | 1,505545                     | 6,74                           |

**Tablica P.8. Srednje vrijednosti, procjene parametara, standardne devijacije i koeficijenti varijacije ( $V_P$ ) za izduženje,  $A_{50}$  - kraj bloka**

| <b>Izduženje, <math>A_{50}</math> [%] – kraj bloka</b> |             |                            |                           |                              |                                |
|--|-------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| <b>Utjecaji</b>  | <b>Nivo</b> | <b>Srednja vrijednosti</b> | <b>Procjena parametra</b> | <b>Standardna devijacija</b> | <b>Koeficijenti varijacije</b> |
| <b>Šarža</b>   | 3157        | 21,16667                   | 0,26389                   | 5,115336                     | 24,17                          |
|  | 3158        | 21,83333                   | 0,93056                   | 2,909754                     | 13,33                          |
|  | 3159        | 20,08333                   | -0,81944                  | 2,800297                     | 13,94                          |
|  | 3160        | 21,00000                   | 0,09722                   | 2,428992                     | 11,57                          |
|  | 3162        | 21,08333                   | 0,18056                   | 2,416954                     | 11,46                          |
|  | 3163        | 20,25000                   | -0,65278                  | 4,916808                     | 24,28                          |
| <b>Visina ploče</b>                                    | 1.          | 18,08333                   | -2,81944                  | 2,653614                     | 14,67                          |
|  | 2.          | 17,41667                   | -3,48611                  | 2,577143                     | 14,80                          |
|  | 3.          | 19,75000                   | -1,15278                  | 2,403123                     | 12,17                          |
|  | 4.          | 22,41667                   | 1,51389                   | 2,615658                     | 11,67                          |
|  | 5.          | 23,91667                   | 3,01389                   | 1,908315                     | 7,98                           |
|  | 6.          | 23,83333                   | 2,93056                   | 1,125463                     | 4,72                           |
| <b>Širina ploče</b>                                    | 1.          | 21,33333                   | 0,43056                   | 2,065591                     | 9,68                           |
|  | 2.          | 19,50000                   | -1,40278                  | 3,563706                     | 18,28                          |
|  | 3.          | 19,33333                   | -1,56944                  | 3,559026                     | 18,41                          |
|  | 4.          | 19,91667                   | -0,98611                  | 3,292669                     | 16,53                          |
|  | 5.          | 21,83333                   | 0,93056                   | 3,710346                     | 16,99                          |
|  | 6.          | 23,50000                   | 2,59722                   | 3,286335                     | 13,98                          |