

# Utjecaj temperature žarenja na mikrostrukturu i tvrdoću AlSi10Mg dijelovaproizvedenih SLM aditivnim postupkom

---

(Zagreb: Hrvatsko društvo za zaštitu materijala (HDZaMa)) Šolić, Sanja; Dolić, Natalija; Tropša, Vlado

Source / Izvornik: **Conference Proceedings International conference on materials - corrosion, heat treatment, testing and tribology, 2021, 2021, 369 - 375**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Submitted version / Rukopis poslan na recenzijski postupak (preprint)**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:369058>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-19**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

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



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ



## INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS corrosion, heat treatment, testing and tribology, 2021

### UTJECAJ TEMPERATURE ŽARENJA NA MIKROSTRUKTURU I TVRDOĆU ALSI10MG DIJELOVA PROIZVEDENIH SLM ADITIVNIM POSTUPKOM

#### *INFLUENCE OF THE ANNEALING TEMPERATURE ON THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF SLM ALSI10MG PARTS*

Sanja Šolić<sup>1\*</sup>, Natalija Dolić<sup>2</sup>, Vlado Tropša<sup>1</sup>

<sup>1</sup> University North, Department of Mechanical Engineering, Varaždin, Croatia

<sup>2</sup> Faculty of Metallurgy University of Zagreb, Sisak, Croatia

#### **Sažetak**

Postupak selektivnog laserskog taljenja praha u komori najprimjenjivaniji je aditivni postupak u proizvodnji metalnih strojnih dijelova. U tom postupku pomoću lasera tali se metalni prah te gradi trodimenzionalni gotov proizvod iz konstruiranog računalnog modela. Obzirom na način proizvodnje, tako izrađeni strojni dijelovi imaju značajno drugačiju mikrostrukturu i svojstva od dijelova istog materijala izrađenih konvencionalnim tehnologijama. U ovom radu ispitan je utjecaj nekoliko različitih temperatura žarenja AlSi10Mg uzoraka dobivenih SLM postupkom na mikrostrukturu i mikrotvrdoću. Uzorci su analizirani u smjeru i okomito na smjer građenja. Precipitacijsko žarenje provedeno je s i bez rastvornog žarenja uz variranje temperature starenja. Analiza je pokazala značajan utjecaj provedenih toplinskih obrada na mikrostrukturu i mikrotvrdoću uzoraka u odnosu na as-print dijelove.

***Ključne riječi:*** selektivno lasersko taljenje, mikrostruktura, žarenje, toplinska obrada

#### ***Abstract***

The process of powder bed selective laser melting is the most applied additive process in the production of metal machine parts. In this process, a laser is used to melt metal powder and build a three-dimensional finished product from a designed computer model. Due to the method of production, the parts made in this way have a significantly different microstructure and properties than parts of the same material made by conventional technologies. In this paper, the influence of several different annealing temperatures of AlSi10Mg samples obtained by the SLM process on the microstructure and microhardness was investigated. The samples were analyzed in the direction and perpendicular to the direction of printing. Precipitation annealing was performed with and without solution annealing with varying aging temperature. The analysis showed a significant influence of the performed heat treatments on the microstructure and microhardness of the samples in relation to the as-print parts.

**Keywords:** selective laser melting, microstructure, annealing, heat treatment

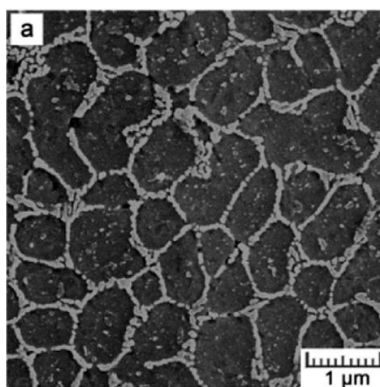
## 1. UVOD

Posljednjih godina u automobilske i zrakoplovne industriji sve je veća potražnja za dijelovima kompleksnih geometrija što manje mase radi postizanja što boljih svojstava uz što manju upotrebu materijala, minimiziranje postupaka obrade s ciljem smanjenja CO<sub>2</sub> otiska proizvoda, što manje upotrebe goriva te što manjih operativnih troškova. Upotreba metala niže gustoće koji zadovoljavaju tražena mehanička svojstva te konstrukcijski zahvati u geometriji proizvoda dva su načina kojima je moguće ostvariti tražene zahtjeve. Razvoj aditivnih tehnologija proizvodnje omogućuje jednostavnu izradu složenih ćelijastih struktura i konstrukcijskih rješenja uz značajno smanjenje broja operacija u proizvodnom procesu, manji utrošak materijala i manje troškove proizvodnje. Legure aluminijske svojom gustoćom i mehaničkim svojstvima vrlo su čest izbor za izradu takvih proizvoda, posebno u automobilske i zrakoplovne, ali i biomedicinske industriji pri čemu Al – Si legure čine gotovo 80 % svih ljevačkih legura na bazi aluminijske radi svoje dobre livljivosti, specifične čvrstoće te mogućnosti postizanja širokog spektra svojstava naknadnim toplinskim obradama.

U ovim legurama, legura AlSi10Mg podeutektička je legura približno eutektičkog sastava te se koristi uglavnom kao ljevačka legura radi niskog viskoziteta te malog toplinskog stezanja. Kod ovih legura prilikom lijevanja dolazi do izlučivanja grubog acikularnog eutektičkog silicija kao krte faze što značajno utječe na smanjenje duktilnosti i žilavosti lijevanih dijelova.

Postupak selektivnog laserskog taljenja (SLM), aditivni je postupak proizvodnje metalnih dijelova kod kojeg se laserom tali metalni prah u komori te se nanošenjem i taljenjem tankih slojeva praha generirani i vođeni 3D računalnim modelom grade gotovi proizvodi [1-4].

Legura aluminijske AlSi10Mg sve više se koristi za aditivne tehnologije proizvodnje i SLM postupak radi uskog raspona skrućivanja legure ( $\Delta T_{L-S} = \sim 40K$ ), a manji koeficijent toplinskog širenja u usporedbi s legurom Al 6061 omogućuje postizanje značajno bolje dimenzijske točnosti dijelova, bolja mehanička svojstva te manja zaostala naprezanja u samim proizvodima [3]. Mikrostruktura AlSi10Mg legura proizvedenih SLM postupkom značajno se razlikuje od ljevačke strukture istih legura. Radi brze izmjene ciklusa ugrijavanja (zagrijavanja) i hlađenja te brzog skrućivanja tijekom SLM postupka čije se brzine kreću  $10^6 - 10^8$  °C/s [5] za razliku od lijevanja kod kojeg su brzine hlađenja  $10^2$  °C/s ili manje [4], mikrostruktura SLM AlSi10Mg legura vrlo je fine metastabilne ćelularne (saćaste) strukture koju čine sitna izdužena zrna  $\alpha - Al$  s izlučenim eutektičkim silicijem po granicama zrna, slika 1, za razliku od grube dendritične strukture u lijevanim dijelovima.



**Slika 1: Mikrostruktura AlSi10Mg legure dobivene SLM postupkom u „as built“ stanju [1]**

Aluminijska matrica u SLM dijelovima je u prezasićenom stanju te pri naknadnim toplinskim obradama postaje nestabilna i dolazi do promjena koje ovise o visini temperature ugrijavanja i trajanju provedenih obrada. Najčešće korištene toplinske obrade legura aluminija te AlSi10Mg legura su različiti postupci žarenja te postupak precipitacijskog očvrnuća - precipitacijskog žarenja i umjetnog starenja (postupak T6). Ove toplinske obrade se i značajno istražuju u primjeni na dijelove AlSi10Mg legura dobivenih SLM postupkom s ciljem poboljšavanja i modificiranja mehaničkih svojstava. U okviru ovog rada prikazana su preliminarna istraživanja utjecaja različitih temperatura starenja sa i bez precipitacijskog žarenja na mikrostrukturu i mikrotvrdoću uzoraka legure AlSi10Mg dobivenih SLM postupkom. Rezultati istraživanja koristit će se za daljnje istraživanje modificiranih parametara toplinske obrade u kombinaciji s različitim debljinama taljenja s ciljem postizanja što boljih mehaničkih svojstava i otpornosti na trošenje.

## 2. MATERIJALI I POSTUPCI

Za potrebe preliminarnih ispitivanja prikazanih u ovom radu izrađeni su ispitni uzorci legure AlSi10Mg postupkom selektivnog laserskog taljenja (SLM). Izrađeni su uzorci oblika prizme, dimenzija 20 x 20 x 5 mm s debljinom taljenja sloja praha 30 μm. Uzorci su izrađeni na uređaju EOS M270 standardnim predefiniranim parametrima postupka uređaja za leguru AlSi10Mg: širina taljenog sloja 8 mm, debljina preklapanja slojeva 0,02 mm, snaga lasera 370 W, brzina taljenja 1210 mm/s, razmak između linija taljenja (hatch distance) 0,15 mm, unos energije 33,98 J/mm<sup>3</sup>.

Za izradu uzorka korišten je metalni prah legure proizvođača EOS, kemijskog sastava prikazanog u tablici 1.

**Tablica 1. Kemijski sastav praha AlSi10Mg legure**

Kem. el.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
<b>Maseni udio, %</b>	9,0 – 11,0	≤0,55	≤0,05	≤0,45	0,2 – 0,45	≤0,05	≤0,1	≤0,05	≤0,05	≤0,15	ostatak

Nakon izrade, tri skupine uzoraka su toplinski obrađene parametrima prikazanim u tablici 2. Prva skupina uzoraka je nakon selektivnog laserskog taljenja samo podvrgnuta žarenju za redukciju zaostalih naprezanja. Na druge dvije skupine uzoraka provedena je

toplinska obrada precipitacijskog očvršnuća koja se standardno provodi na legurama aluminija (varijacije obrade T6) s ciljem poboljšanja mehaničkih svojstava. Provedeno je precipitacijsko žarenje u trajanju od 4 sata nakon čega su uzorci gašeni u vodi te su stareni na dvije različite temperature starenja u trajanju od tri sata i hlađeni na zraku. Uz toplinski obrađene uzorke analizirani su uzorci i u stanju nakon izrade tzv. „as built“ stanje. Toplinska obrada je provedena u električnoj peći bez zaštitne atmosfere.

**Tablica 2. Oznake uzoraka i parametri toplinske obrade**

Oznaka uzorka	Parametri toplinske obrade
A	Stanje „as built“ – bez TO
1	250 °C / 3h / zrak
2	510 °C / 4h / voda + 180 °C / 3h / zrak
3	510 °C / 4h / voda + 250 °C / 3h / zrak

Toplinski obrađeni uzorci pripremljeni su standardnom metalografskom pripremom za analizu mikrostrukture i ispitivanje mikrotvrdoće. Uzorci su prerezani na pola te su pripremljeni za analizu mikrostrukture u poprečnom i uzdužnom smjeru na smjer građenja uzoraka. Polirani uzorci nagrizeni su otopinom Keller. Analiza mikrostrukture napravljena je na svjetlosnom mikroskopu LM ZEISS Imager.Z2m. Mikrotvrdoća uzoraka ispitana je Vickersovom metodom na mikrotvrdomjeru PMT3 koristeći uteg mase 200 g (HV 0,2). Na svakom uzorku napravljena su po tri mjerenja na poprečnom i uzdužnom smjeru gradnje uzorka, a navedeni rezultati prikazuju srednju vrijednost šest mjerenja na svakom uzorku.

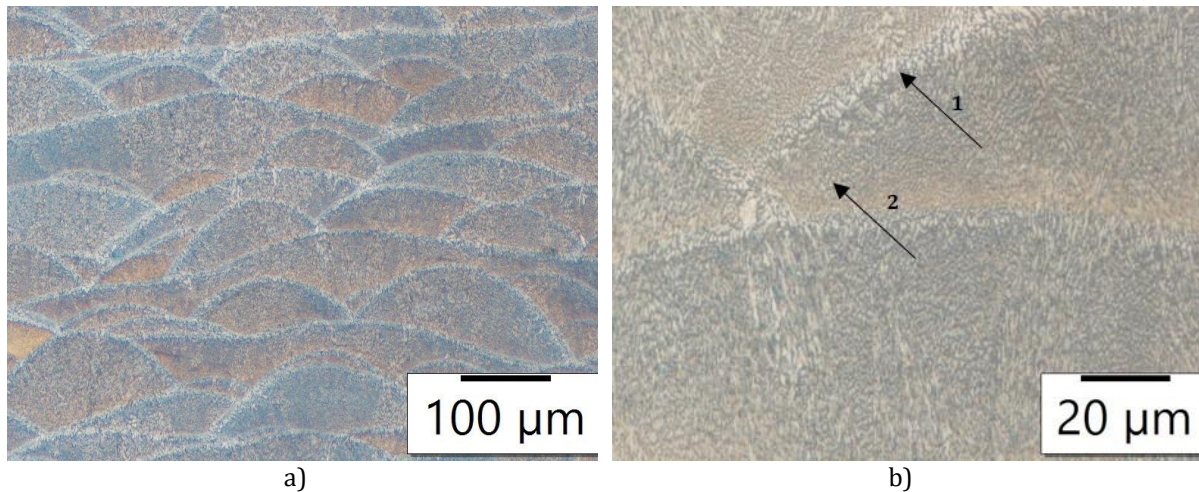
### 3. Rezultati i diskusija

U tablici 3. prikazane su srednje vrijednosti izmjerene mikrotvrdoće HV 0,2.

Oznaka uzorka	Mikrotvrdoća HV 0,2
A	95,2
1	85,4
2	46,3
3	46,8

Iz rezultata je vidljivo da uzorci u „as built“ stanju imaju najvišu vrijednost mikrotvrdoće dok uzorci koji su precipitacijski žareni i stareni iskazuju pad tvrdoće za gotovo 50 % iako se postupak precipitacijskog očvršnuća standardno koristi kod lijevanih AlSi10Mg legura s ciljem poboljšanja mehaničkih svojstava. Uzorci žareni za redukciju zaostalih naprezanja imaju 11 % manju tvrdoću u odnosu na građeno stanje.

Na slici 1. prikazana je mikrostruktura uzorka A (stanje "as built") pri manjem i većem povećanju. Na slikama je vidljiva mikrostruktura karakteristična za materijale dobivene SLM postupkom s jasno izraženim zonama taljenja, granicama staljivanja i vidljivim smjerom građenja uzorka. Vrlo brzo hlađenje rastaljenog materijala kod SLM postupka rezultira kod izradaka od AlSi10Mg nastajanjem vrlo fine saćaste – celularne strukture. Nastala zrna izduženog oblika sastoje se od prezasićene matrice  $\alpha$  – Al s mrežom eutektičkog Si izlučenog po granicama zrna. Po granicama zrna izlučuje se još i mala količina Mg<sub>2</sub>Si faze[4]. Ista morfologija vidljiva je i na većem povećanju uzorka A, na slici 1 b.

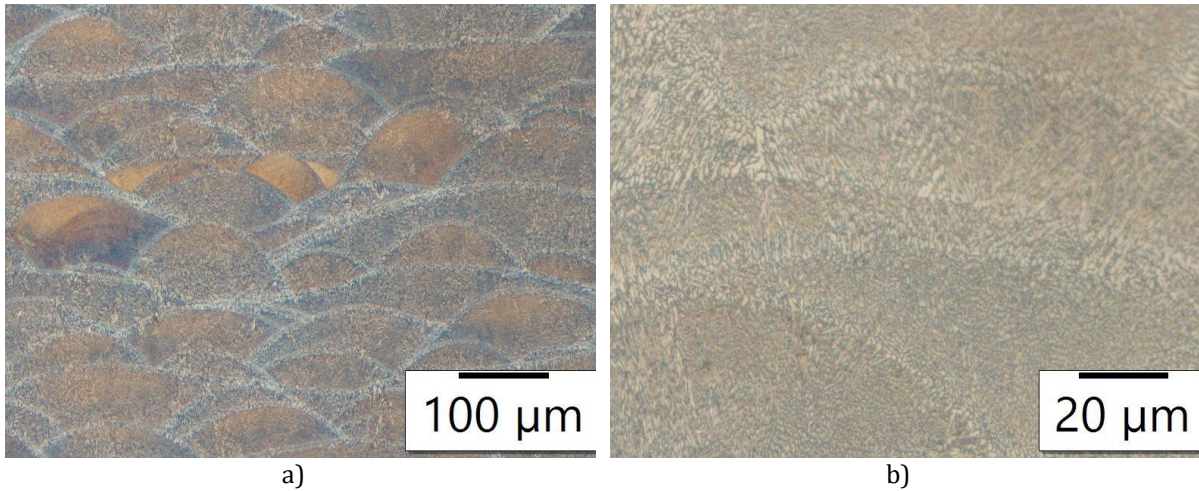


**Slika 1: Mikrostruktura uzorka A („as built“ stanje), a) manje povećanje, b) veće povećanje**

Na slici 1 b vidljive su mikrostrukturne transformacije unutar zona taljenja, nehomogena grubozrnata struktura na linijama staljivanja (strelica 1) te sitnozrnata mikrostruktura unutar zone taljenja (strelica 2). Grubozrnata struktura linija staljivanja ekvialsijalnog je oblika zrna  $\alpha$  – Al koja rastu prema sredini rastaljene zone (gledano okomito na smjer građenja), dok u poprečnom smjeru tj. u smjeru građenja, zrna  $\alpha$  – Al su uobičajeno izduženog oblika radi epitaksijalnog rasta u odnosu na liniju staljivanja.

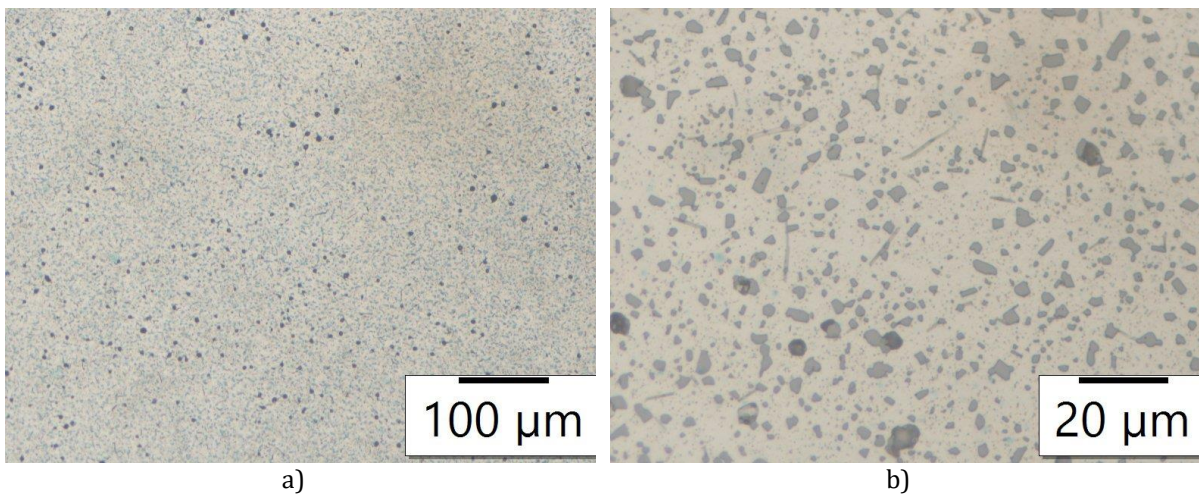
Na slici 2 prikazana je mikrostruktura uzorka 1 nakon provedenog žarenja za redukciju zaostalih naprezanja. Na slikama je vidljivo da nije došlo do značajne promjene u mikrostrukturi, i dalje je vidljiva izražena saćasta – celularna struktura s jasno izraženim zonama taljenja, granicama staljivanja i vidljivim smjerom građenja uzorka. Također, vidljiva je grubozrnata struktura na granicama staljivanja te sitnozrnata mikrostruktura unutar zona taljenja. Mjerenje mikrotvrdoće pokazalo je pad tvrdoće za 11 % u odnosu na „as built“ stanje.



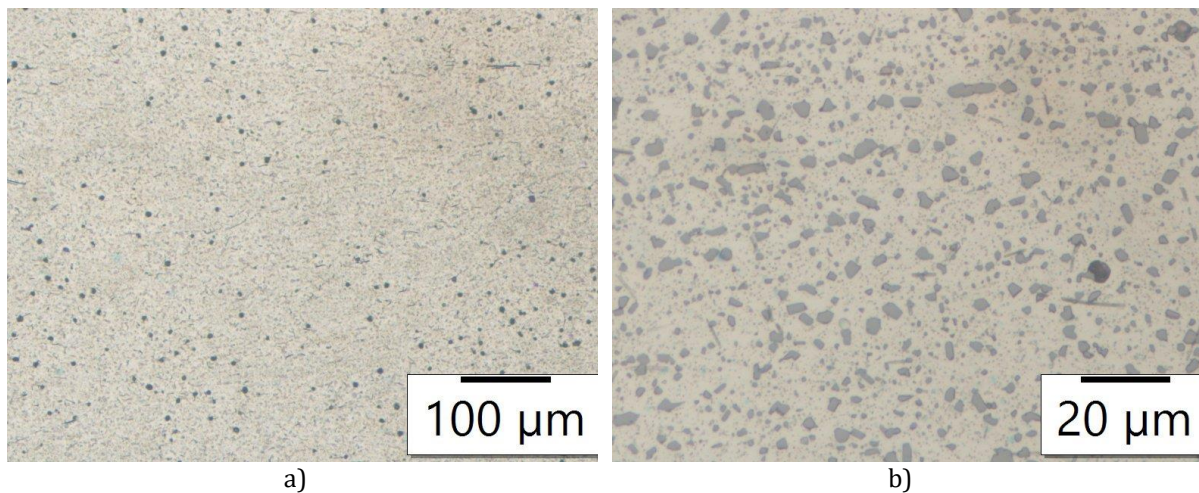


**Slika 2: Mikrostruktura uzorka 1, a) manje povećanje, b) veće povećanje**

Na slikama 3 i 4 prikazana je mikrostruktura uzoraka 2 i 3, uzoraka koji su podvrgnuti standardnoj toplinskoj obradi aluminijskih legura precipitacijskom očvršću. Na slikama je vidljivo da je pri precipitacijskom žarenju došlo do rastapanja mreže eutektičkog silicija izlučenog po granicama zrna  $\alpha$  - Al te da je došlo do formiranja sitnijih i grubljih čestica silicija ravnomjerno raspršenih po matrici aluminija[4]. Na slikama je vidljivo da je došlo i do nestanka izraženih zona taljenja i linija staljivanja karakterističnih za SLM postupak.



**Slika 3: Mikrostruktura uzorka 2, a) manje povećanje, b) veće povećanje**



**Slika 4: Mikrostruktura uzorka 3, a) manje povećanje, b) veće povećanje**

Izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće uzoraka 2 i 3 gotovo 50 % su niže od mikrotvrdoće uzorka u „as built“ stanju. Kod lijevanih legura izlučivanje sitnih precipitata silicija i magnezija sprečava gibanje dislokacija te na taj način utječe na poboljšanje mehaničkih svojstava. Variranjem parametara precipitacijskog žarenja i starenja moguće je optimirati veličinu izlučenih čestica čime je moguće utjecati na postizanje određenog raspona vrijednosti mehaničkih svojstava lijevanih AlSi10Mg legura. Iako kod lijevanih AlSi10Mg legura ova toplinska obrada poboljšava mehanička svojstva odljevaka, kod SLM AlSi10Mg legura primjena precipitacijskog žarenja i starenja degradira mehanička svojstva u odnosu na građeno („as built“) stanje [1, 6, 7].

Kod AlSi10Mg legura izgrađenih SLM postupkom tri mehanizma očvršnuća utječu na njihova mehanička svojstva, uključujući i tvrdoću: 1) očvršnuće granicama zrna, 2) očvršnuće legiranjem radi prisutnih legiranih elemenata i 3) očvršnuće dislokacijama kroz međusobnu interakciju dislokacija koje ometaju međusobno kretanje [7]. Nakon provođenja toplinske obrade T6 dolazi do slabljenja utjecaja sva tri mehanizma te do opadanja mehaničkih svojstava. Izlučivanjem manjih i većih precipitata silicija jača utjecaj precipitacijskog očvršnuća (Orowan-ov mehanizam sprječavanja gibanja dislokacija), ali taj mehanizam djeluje značajno slabije od gore navedena tri mehanizma zajedno [1].

#### **4. ZAKLJUČAK**

Legura aluminija AlSi10Mg sve više se koristi za aditivne tehnologije proizvodnje i SLM postupak jer je radi specifičnosti SLM postupka i kemijskog sastava same legure omogućeno postizanje značajno bolje dimenzijske točnosti dijelova, bolja mehanička svojstva te manja zaostala naprezanja u samim proizvodima. Mikrostruktura AlSi10Mg legura proizvedenih SLM postupkom značajno se razlikuje od lijevačke strukture istih legura, a različiti su i mehanizmi očvršnuća koji djeluju na mehanička svojstva, u usporedbi s istim legurama proizvedenim lijevanjem. Svrha ovog istraživanja bila je ispitati utjecaj različitih temperatura starenja sa i bez precipitacijskog žarenja na mikrostrukturu i mikrotvrdoću uzoraka legure AlSi10Mg dobivenih SLM postupkom. Rezultati su pokazali da AlSi10Mg legura dobivena SLM postupkom u građenom stanju ostvaruje najvišu vrijednost tvrdoće dok se primjenom standardne toplinske obrade T6 vrijednosti tvrdoće smanjuju za gotovo 50 %.



Rezultati istraživanja koristit će se za daljnje istraživanje modificiranih parametara toplinske obrade u kombinaciji s različitim debljinama taljenja s ciljem postizanja što boljih mehaničkih svojstava i otpornosti na trošenje AlSi10Mg legura.

**Zahvale:**

Autori zahvaljuju g. Zoranu Mareniću i tvrtki Tehnoprogres d.o.o., prof.dr.sc. Darku Landeku i Laboratoriju za toplinsku obradu FSB-a te Nataši Lipovšek dipl.ing. s Instituta za kovinske materijale in tehnologije u Ljubljani.

**REFERENCES**

- [1] Fousová M., Dvorský D., Michalcová A., Vojtěch D., Changes in the microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg alloy after exposure to elevated temperatures, *Materials Characterization* 137 (2018) 119–126.
- [2] Maamoun A., Elbestawi M., Dosbaeva G.K., Veldhuis S.C., Thermal post-processing of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting using recycled powder, *Additive Manufacturing* 21 (2018) 234–247.
- [3] T.S. Srivatsan, T.S. Sudarshan, *Additive Manufacturing Innovations, Advances, and Applications*, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, FL, 2016.
- [4] Alghamdi A., Song X., Hadadzadeh A., Shalchi – Amirkhiz B., Mohammadi M., Haghshenas M., Post heat treatment of additive manufactured AlSi10Mg: On silicon morphology, texture and small-scale properties, *Materials Science & Engineering A* 783 (2020) 139296.
- [5] W. Li, S. Li, J. Liu, A. Zhang, Y. Zhou, Q. Wei, C. Yan, Y. Shi, Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism, *Mater. Sci. Eng. A* 663 (2016) 116–125.
- [6] K. Ma, H. Wen, T. Hu, T.D. Topping, D. Isheim, D.N. Seidman, E.J. Lavernia, J.M. Schoenung, Mechanical behavior and strengthening mechanisms in ultrafine grain precipitation-strengthened aluminum alloy, *Acta Mater.* 62 (2014) 141–155.
- [7] N. T. Aboulkhair, C. Tuck, I. Ashcroft, I. Maskery, N. M. Everitt, On the Precipitation Hardening of Selective Laser Melted AlSi10Mg, *Metallurgical And Materials Transactions A*, Volume 46A (2015) 3337 – 3341.