

# Mikrostrukturne promjene AlSi10Mg u ovisnosti o parametrima aditivnog postupka selektivnog laserskog taljenja (SLM)

---

Sakač, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:640206>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI



**Sveučilište  
Sjever**

**Diplomski rad br. 088/STR/2023**

**Mikrostrukturne promjene AlSi10Mg legure u ovisnosti o  
parametrima aditivnog postupka selektivnog laserskog  
taljenja (SLM)**

**Iva Sakač, 2804/336**

Varaždin, rujan 2023. godine





# Sveučilište Sjever

Diplomski sveučilišni studij Strojtarstvo

Diplomski rad br. 088/STR/2023

## **Mikrostrukturne promjene AlSi10Mg legure u ovisnosti o parametrima aditivnog postupka selektivnog laserskog taljenja (SLM)**

### **Student**

Iva Sakač, 2804/336

### **Mentor**

Izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, dipl.ing.stroj.

Varaždin, rujun 2023. godine

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojstvo		
PRISTUPNIK	Iva Sakač	JMBAG	2804/336
DATUM	29.08.2023.	KOLEGIJ	Metode ispitivanja materijala i konstrukcija
NASLOV RADA	Mikrostrukturne promjene AISi10Mg u ovisnosti o parametrima aditivnog postupka selektivnog laserskog taljenja (SLM)		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Microstructural changes in AISi10Mg alloy depending on the parameters of selective laser melting additive manufacturing technology		
MENTOR	dr.sc. Sanja Šolić	ZVANJE	izvanredna profesorica
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc.dr.sc. Tanja Tomić, član, predsjednica 2. izv.prof.dr.sc. Sanja Šolić, mentor, član 3. doc.dr.sc. Matija Bušić, član 4. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, zamjenski član 5.		

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 088/STR/2023

OPIS

U diplomskom radu potrebno je obraditi nove tehnologije proizvodnje strojnih dijelova od aluminijskih legura s naglaskom na aditivni postupak selektivnog laserskog taljenja. U teorijskom dijelu diplomskog rada potrebno je dati prikaz novih aditivnih tehnologija koje imaju sve širu primjenu u proizvodnji strojnih dijelova. Detaljnije je potrebno opisati aditivni postupak selektivnog laserskog taljenja, parametre postupka te utjecaj parametara postupka na mikrostrukturu i svojstva izrađenih dijelova. Potrebno je detaljnije opisati pogreške koje se pojavljuju u mikrostrukтури uslijed varijacija parametara postupka te njihov utjecaj na eksploatacijska svojstva proizvoda. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je postupkom selektivnog laserskog taljenja izraditi ispitne uzorke iz aluminijske legure AISi10Mg varirajući parametre postupka i to brzinu lasera kod jedne debljine sloja uz konstantan razmak putanje lasera pri taljenju. Izrađene uzorke potrebno je pripremiti standardnom metalografskom pripremom te analizirati promjene mikrostrukture svjetlosnim mikroskopom kao i udio poroziteta. Na uzorcima je potrebno također ispitati mikrotvrdoću Vickersovom metodom s tri različita opterećenja. Dobivene rezultate je potrebno analizirati i opisati te je potrebno dati zaključak.

ZADATAK URUČEN

29.08.2023.



Sanja Šolić



**IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, IVA SAKAČ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom MIKROSTRUKTURNE PROMJENE ALSIOMOG LASERSKOG TALJENJA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Iva Sakac  
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, IVA SAKAČ (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom MIKROSTRUKTURNE PROMJENE ALSIOMOG LASERSKOG TALJENJA (upisati naslov) čiji sam autor/ica. LEGURE U OVISNOSTI O PARAMETRIMA ADITIVNOG POSTUPKA SELEKTIVNOG LASERSKOG TALJENJA

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Iva Sakac  
(vlastoručni potpis)

## **Predgovor**

*Želim se zahvaliti svojoj obitelji, posebno roditeljima i sestri koji su mi omogućili bezbrižno školovanje ispunjeno podrškom i ljubavi. Hvala Vam na svakom savjetu, pomoći te razumijevanju koji su me doveli do ovog uspjeha. Veliko hvala i mojoj baki koja je uvijek vjerovala i molila za mene.*

*Ogromno hvala mom zaručniku Mateju koji prolazi sa mnom kroz sve prepreke i pomaže mi u ostvarenju svih mojih želja i ciljeva. Ne postoje riječi kojima bih mu se zahvalila na pruženoj ljubavi i podršci od prvog do zadnjeg dana studija.*

*Zahvaljujem se i Metalskoj jezgri Čakovec koja mi je omogućila izradu uzoraka za praktičan dio mog Diplomskog rada, hvala gospodinu Mariu Šerceru koji mi je uz pristupačan i stručan način pripomogao kod izrade uzoraka.*

*Veliko hvala i svim prijateljima, kolegama, učiteljima, asistentima, profesorima koji su mi pomagali tijekom školovanja.*

*Od srca se zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Sanji Šolić od koje sam puno naučila i koja je strpljivo odgovarala na sva pitanja, hvala Vam na svakoj lijepoj poruci i bila mi je neizmjerena čast surađivati s Vama!*

*Ovaj rad posvećujem svima Vama, jer bez Vas ne bih uspjela!*

## Sažetak

Aditivne tehnologije su u današnje vrijeme široko rasprostranjene. Jedan od najznačajnijih postupaka aditivnih tehnologija je postupak selektivnog laserskog taljenja (eng. Selective Laser Melting, SLM). AlSi10Mg je legura koja se zbog svoje dobre kombinacije mehaničkih svojstava, metalurških svojstava i dobre cijene široko koristi za proizvodnju dijelova SLM postupkom za zrakoplovnu, svemirsku i automobilsku industriju. Ovim se postupkom izrađuju dijelovi vrlo kompliciranih geometrija koji bi se puno teže ili gotovo nemoguće proizveli konvencionalnim postupcima. Budući da izrada proizvoda SLM postupkom traje relativno dugo, nije namijenjena za serijsku proizvodnju već za pojedinačne komade. Ovaj rad nastoji utvrditi na koji način promjena parametara kod SLM postupka utječe na mikrostrukturu AlSi10Mg legure. Temelj istraživanja je promjene brzine i snage lasera za jednu debljinu taljenog sloja. Mikrostruktura je analizirana u poliranom te nagrzanom stanju. Ispitana je i mikrotvrdoća primjenom tri različite sile utiskivanja indentora. Na temelju provedenih istraživanja zaključeno je da povećanje poroziteta nastaje kombinacijom povećane brzine lasera uz manju snagu lasera, odnosno, manjim iznosom gustoće energije lasera raste udio poroziteta. Promjenom zadanih parametara mikrotvrdoća se nije značajnije promijenila.

***Ključne riječi:*** SLM, AlSi10Mg, mikrotvrdoća, brzina lasera, snaga lasera, mikrostruktura



## **Abstract**

Additive technologies are widely spread nowadays. One of the most significant processes in additive manufacturing is certainly the Selective Laser Melting (SLM) procedure. AlSi10Mg is an alloy used for the SLM process due to its mechanical properties, mainly in aerospace, space, and automotive industries. This process is utilized to produce parts with highly complex geometries that would be much more challenging or nearly impossible to manufacture using conventional methods. Since SLM fabrication takes a considerable amount of time, it's not intended for mass production but rather for individual components.

This study aims to determine how changes in parameters during the SLM process influence the microstructure of the AlSi10Mg alloy. The research was conducted by altering the laser speed and power for a consistent layer thickness. The microstructure was analyzed in both polished and etched states, with microhardness testing also performed. Based on the conducted research, it can be concluded that an increase in porosity occurs through a combination of higher laser speed and lower laser power, meaning that a lower energy density leads to higher porosity levels. Altering the specified parameters did not significantly affect the microhardness.

***Key words:*** *SLM, AlSi10Mg, microhardness, laser speed, laser power, microstructure*

## **Popis korištenih kratica**

<b>SLM</b>	selektivno lasersko taljenje
<b>U1</b>	uzorak 1
<b>U2</b>	uzorak 2
<b>U3</b>	uzorak 3
<b>U4</b>	uzorak 4
<b>U5</b>	uzorak 5
<b>U6</b>	uzorak 6
<b>U7</b>	uzorak 7
<b>U8</b>	uzorak 8
<b>3D</b>	trodimenzionalno
<b>Al</b>	Aluminij
<b>CAD</b>	Konstruiranje pomoću računala (eng. Computer Aided Design)
<b>CAM</b>	Računalna izrada (eng. Computer Aided Manufacturing)

# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	SLM postupak.....	3
2.1.	Interakcija metala i laserske zrake .....	8
2.2.	Prednosti i nedostaci SLM postupka.....	9
2.3.	Defekti nastali SLM postupkom .....	10
2.4.	Elementarni aluminij .....	13
2.5.	AlSi10Mg .....	13
2.6.	Utjecajni parametri kod SLM postupka .....	15
3.	Eksperimentalni dio .....	19
3.1.	3D pisac EOS M 290.....	19
3.2.	Metalni prah AlSi10Mg .....	20
3.3.	Izrada uzoraka SLM postupkom .....	21
4.	Priprema uzoraka .....	30
4.1.	Oblaganje .....	30
4.2.	Brušenje.....	32
4.3.	Poliranje .....	35
4.4.	Nagrizanje .....	41
5.	Ispitivanje mikrotvrdoće .....	45
5.1.	Vickersova metoda ispitivanja .....	45
5.2.	Postupak ispitivanja mikrotvrdoće .....	46
6.	Zaključak.....	50
7.	Literatura.....	52
	Popis slika .....	54
	Popis tablica .....	56
	Prilozi.....	57

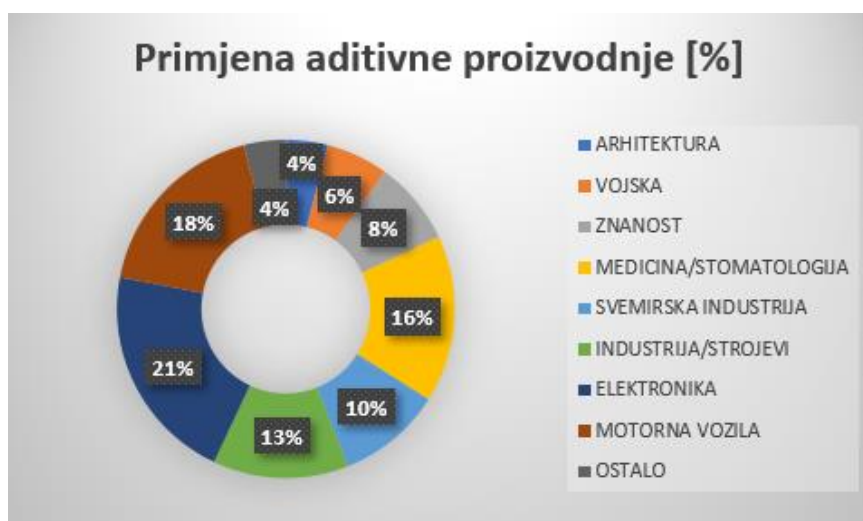


# 1. Uvod

Aditivne tehnologije su u današnje vrijeme u vrlo širokoj primjeni. Njihova popularnost rasla je razvojem drugih tehnologija i industrija. Cilj današnje proizvodnje je proizvesti proizvod uz što manje energije, optimalne kvalitete u što kraćem vremenu. Postupcima aditivnih tehnologija omogućena je brza izrada kompliciranih komada direktno iz 3D modela napravljenog u bilo kojem CAD programu. Ove se tehnologije ne koriste za serijsku proizvodnju jer je njihova cijena još uvijek vrlo visoka. Ukoliko je potrebna proizvodnja pojedinačnih komada komplicirane i složene geometrije aditivni postupci izrade su prvi izbor. Najšira primjena ovih tehnologija proizvodnje je u zrakoplovnoj, automobilskoj i svemirskoj industriji. Glavne prednosti aditivne proizvodnje su svakako kraća vremena izrade kompliciranih geometrija, visoka razlučivost, točnost dimenzija uz minimalne gubitke materijala. Ulazni materijali za ovu vrstu proizvodnje mogu biti metali, polimerni materijali, beton...

Proces proizvodnje ovom tehnologijom započinje izradom 3D modela. Nakon toga, taj model potrebno je učitati u program namijenjen na 3D ispis. U tom programu se 3D model podijeli na određen broj slojeva ovisno o odabranom postupku izrade. Postoje različite vrste aditivnih tehnologija, no svima su zajedničke prednosti koje ih određuju. Iako aditivni postupci zahtijevaju duga vremena izrade, za modele s kompliciranim geometrijama koji bi uključivali više različitih tehnologija obrade, ovo je najbrži i najkvalitetniji način izrade.

Sve veća primjena ovih tehnologija je u medicini, stomatologiji ali i kod proizvoda koji su široke primjene, slika 1. Ova tehnologija aditivne proizvodnje omogućuje topološku i konstrukcijsku optimizaciju proizvoda te se omogućuje izrada monolitnih kompleksnih geometrija optimalne krutosti uz smanjenje mase do 50%. [1]



Slika 1 - Područje primjene aditivne proizvodnje [1]

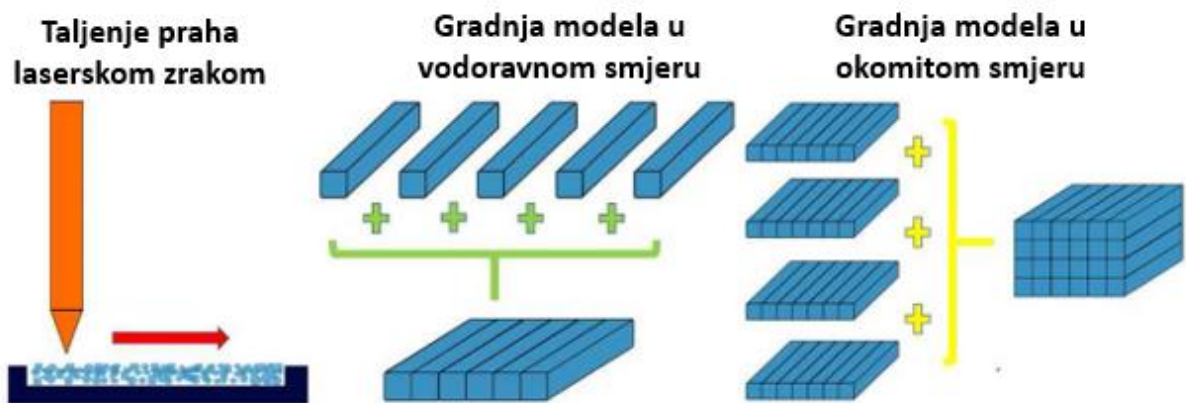
U ovom radu će se razmatrati utjecaj parametara selektivnog laserskog taljenja, SLM, na mikrostrukturu uzoraka iz aluminijske legure AlSi10Mg. Ovaj postupak uglavnom se koristi kod razvoja i dizajna proizvoda, te kod izrade malih serija posebno proizvoda komplicirane geometrije, a ne toliko u veliko serijskoj proizvodnji duljine trajanja postupka. Cilj ovog rada je utvrditi na koji način promjena sige i brzine lasera uz jednu debljinu taljenog sloja utječe na mikrostrukturu, pojavu poroziteta i mikrotvrdoću uzoraka napravljenih iz AlSi10Mg. [1]

## 2. SLM postupak

Selektivno lasersko taljenje (SLM) jedna je od tehnologija aditivne proizvodnje koja omogućuje izradu jednostavnih i kompliciranih komponenti direktno iz bilo kojeg CAD programa. Danas se rade manje serije SLM postupkom, pogotovo kompliciranih geometrija. [2]

Ovim je postupkom omogućena proizvodnja proizvoda gotovo bez poroznosti, odnosno proizvodi sa približno 100% teorijske gustoće. Omogućena je i proizvodnja proizvoda sa strukturiranom poroznošću kojom se omogućava proizvodnja proizvoda manje težine. [1, 2]

Selektivno lasersko taljenje (SLM) je u današnje vrijeme jedan od najviše korištenih postupaka aditivne tehnologije. To je postupak spajanja čestica praha kod kojeg se za izvor energije koristi laserska zraka vrlo visokog intenziteta. Laserskom zrakom selektivno se tali metalni prah na temelju modela iz CAD programa, slika 2. Prva faza izrade uzorka ovim postupkom sastoji se od taljenja praha laserskom zrakom, nakon toga slijedi druga faza u kojoj dolazi do preklapanja pojedinačnih tragova skeniranja u vodoravnom smjeru. Kroz slojeve dolazi do građenja modela u okomitom smjeru. [1, 2]



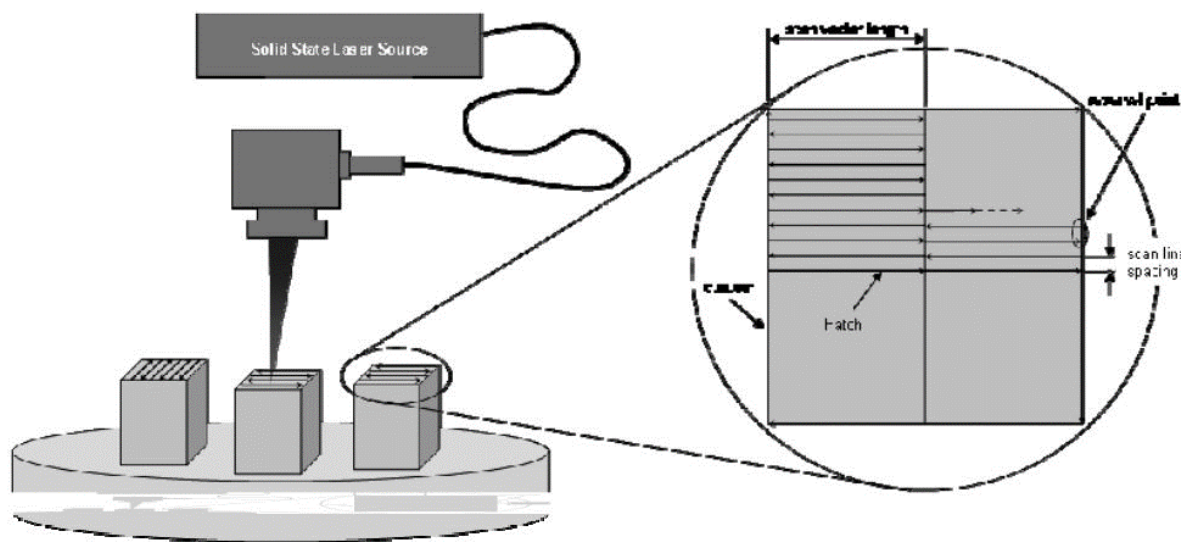
Slika 2 - Taljenje praha kod SLM postupka [1]

Široka primjena ovog postupka se očituje u brzom procesu skrućivanja uz vrlo visoke brzine hlađenja od  $10^5$  do  $10^6$  °C/s. Nakon skrućivanja dolazi do celularnog rasta kristalnih zrna i ravnomjerne kristalizacije kristala mješanaca te metastabilnih faza. [3]

SLM postupak patentiran je u Njemačkoj. Ovim se postupkom proizvode komponente na ploči od različitih materijala. Nakon završetka, gotovi proizvodi se otklanjaju s ploče. Između proizvoda i ploče je potrebno predvidjeti "potporne strukture", kako bi se proizvodi što jednostavnije odvojili s ploče. Potporne strukture su šuplje strukture između radne ploče i proizvedenog proizvoda. Potporne strukture služe kao dodatak na uzorak, kako se ne bi oštetio uzorak prilikom skidanja, kako bi se dobile tražene dimenzije uzorka nakon skidanja komada s radne ploče te kako bi se

smanjio utjecaj toplinskih naprezanja i kako ne bi došlo do deformacije proizvoda posebice kod proizvoda s tanjim stjenkama.[4]

Osim modeliranja modela u 3D CAD programu potrebno je odrediti i pripremiti stroj za realizaciju ovog procesa. Sam 3D pisac mora sadržavati i prikladan program za pripremu modela. Kada se model učita u pisac, program pisaca ga podijeli na određeni broj slojeva. To je zapravo broj slojeva praha i prolaza lasera, slika 3.

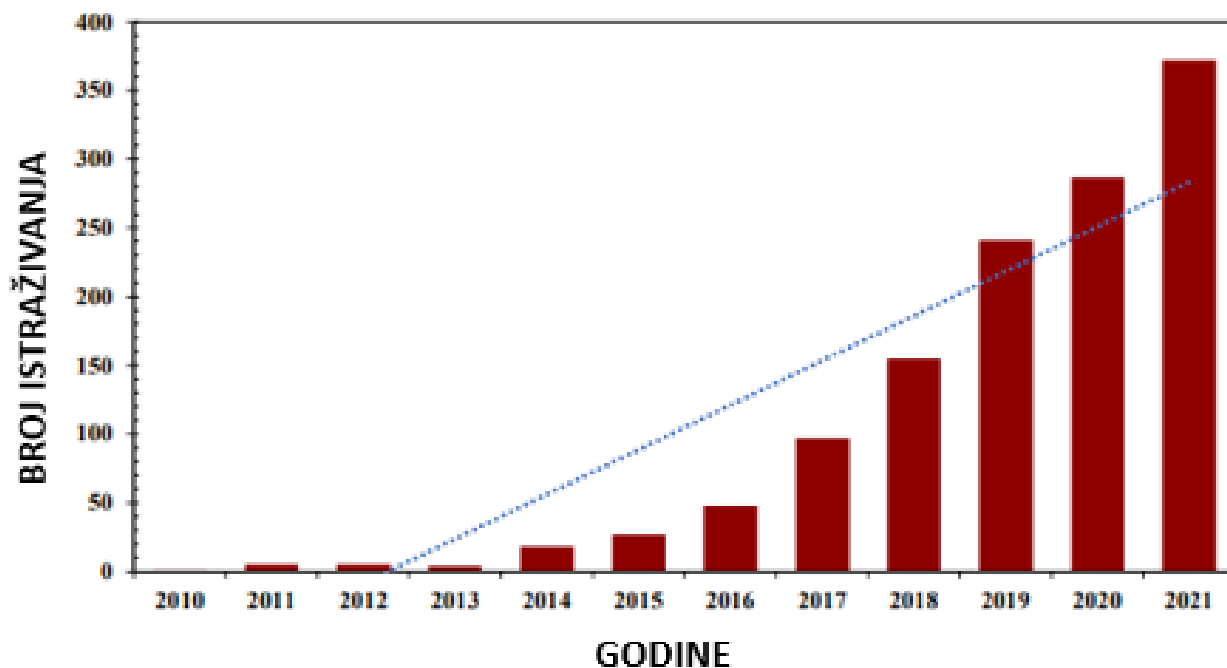


Slika 3 - Podjela na slojeve prilikom proizvodnje [2]

Materijali koji se najčešće danas koriste za SLM postupak su AlSi10Mg TiAl4V, AlSi316L, Inconel 625, Inconel 718... Vodeći materijal kod SLM aditivne tehnologije je aluminij i njegove legure. Istraživanjem je potvrđena mogućnost postizanja 100% gustoće proizvoda izrađenih od aluminijevih legura bez pukotina i pogrešaka. To se postiže kombinacijama brzine i snage lasera. Prva istraživanja su dokazala da se 100%- gustoća postiže kod aluminijevih legura AlMg3, AlMgSi0.5, AlSi12 i AlSi10Mg. Aluminijeve legure vrlo su zahtjevne za izradu proizvoda SLM postupkom zbog velike refleksije lasera na prahu aluminija koja direktno utječe na učinkovitost lasera. U ovom radu za izradu ispitnih uzoraka će se koristiti legura aluminija zbog brojnih poželjnih karakteristika poput dobre vodljivosti, male mase, otpornosti na trošenje i koroziju, dobre vlačne čvrstoće i tvrdoće. Aluminij je također i pristupačne cijene. Na slici 4 je prikazan eksponencijalan rast provedenih istraživanja na SLM postupku primjenom legure AlSi10Mg. Tijekom godina je zainteresiranost znanstvenika sve više rasla te je iz tog razloga u današnje vrijeme ova legura u širokoj primjeni posebice u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji. [1, 2]



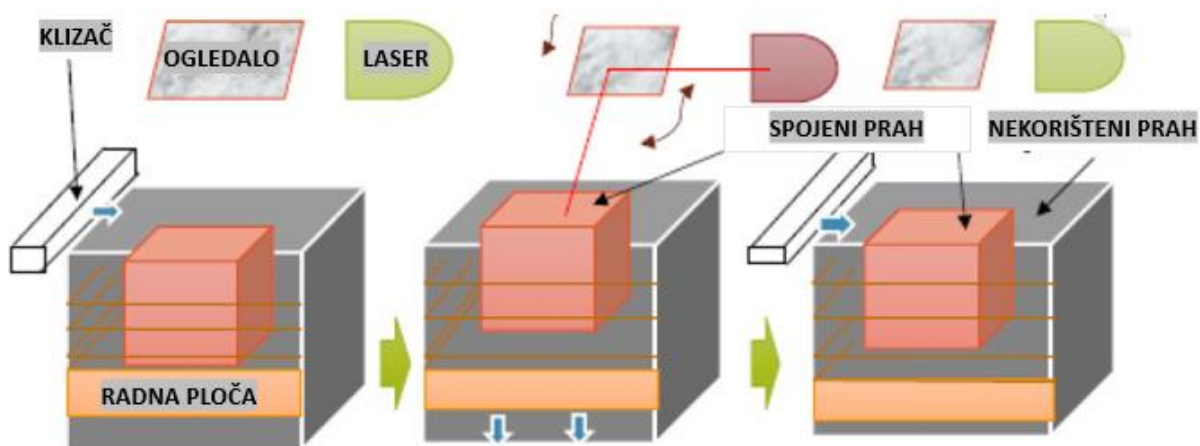
## SLM postupak sa AlSi10Mg



Slika 4 - Broj istraživanja tijekom godina [1]

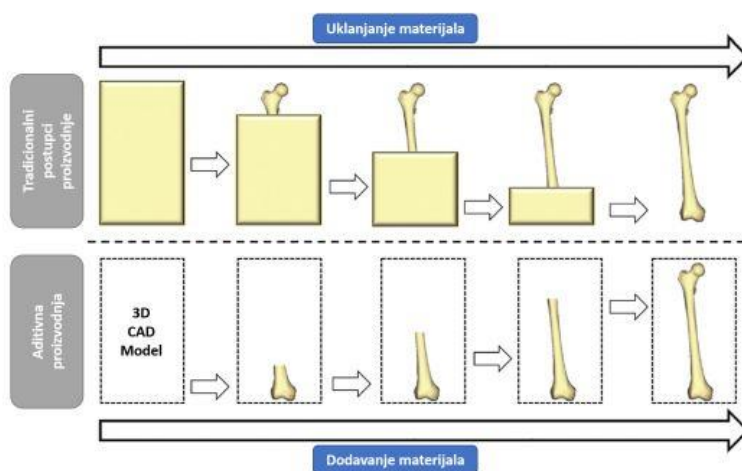
Kod SLM postupka moguće je utjecati na određene parametre. Toplinska vodljivost, apsorpcija, površinska napetost, samo su neki od utjecajnih parametara. Kao što je spomenuto, ovaj postupak izvodi se na 3D printeru. Radna ploča nalazi se unutar komore printera. Radna ploča se može kretati u smjeru osi z. Materijal u obliku praha se nalazi u spremniku do komore. Kretanjem ploča se upravlja preko računala. Nanošenje praškastog materijala na radnu ploču izvodi se pomoću klizača koji ravnomjerno nanosi određenu količinu materijala ovisno o prethodno propisanim parametrima. Ploča spremnika u kojem se nalazi prah se podigne za određenu dimenziju te klizač ravnomjerno raspoređuje prah po radnoj ploči, slika 5. [2, 5]

Potrebno je učitati CAD model napravljen u određenom 3D programu. Program namijenjen za 3D printer podijeli zadani model na određeni broj slojeva. Budući da su slojevi vrlo male debljine prah je potrebno nanositi u velikom broju slojeva. Nakon učitavanja modela, laser prolazi preko svakog sloja definiranog modelom te ga tali, nakon čega se odvođenjem topline u prah talina hladi i skrućuje. . Isti se postupak ponavlja na svakom sloju. To su dugotrajni postupci koji traju od nekoliko sati do nekoliko dana. Čestica praha apsorbira energiju dobivenu od lasera te se na taj način zagrijava i tali. Postupkom hlađenja nastaje očvrnuti komad. Ovaj se proces odvija u zaštitnoj atmosferi određenog inertnog plina. [1, 2, 5]



Slika 5 - SLM postupak [6]

Svojstva proizvoda proizvedenih SLM postupkom se uvelike razlikuju od svojstava proizvoda napravljenih konvencionalnim postupcima. Mikrostruktura proizvoda proizvedenih aditivnim tehnologijama je sitnozrnata za razliku od proizvoda dobivenih primjerice lijevanjem za koje je karakteristična grubozrnata struktura. Dobra svojstva uslijed sitnozrnate strukture postižu se žarenjem donjih slojeva prilikom nanosa novih slojeva materijala. Toplina se provodi kondukcijom do donjih slojeva, slojevi se ponovo zagrijavaju u nekom rasponu gdje ulaze u područje normalizacijskog žarenja te nastaje sitnozrnata struktura. Svojstva metalnih proizvoda proizvedenih SLM postupkom su viša tvrdoća te granica razvlačenja od proizvoda proizvedenih konvencionalnim postupcima. Proizvodnja izratka kod konvencionalnih postupaka se sastoji od odvajanja čestica materijala s polaznog poluproizvoda ili sirovog materijala dok se kod aditivnih tehnologija nanose slojevi materijala te se na taj način dobije gotov proizvod bez velikog gubitka materijala, slika 6. [6, 7]



Slika 6 - Usporedba konvencionalne i aditivne proizvodnje. [8]

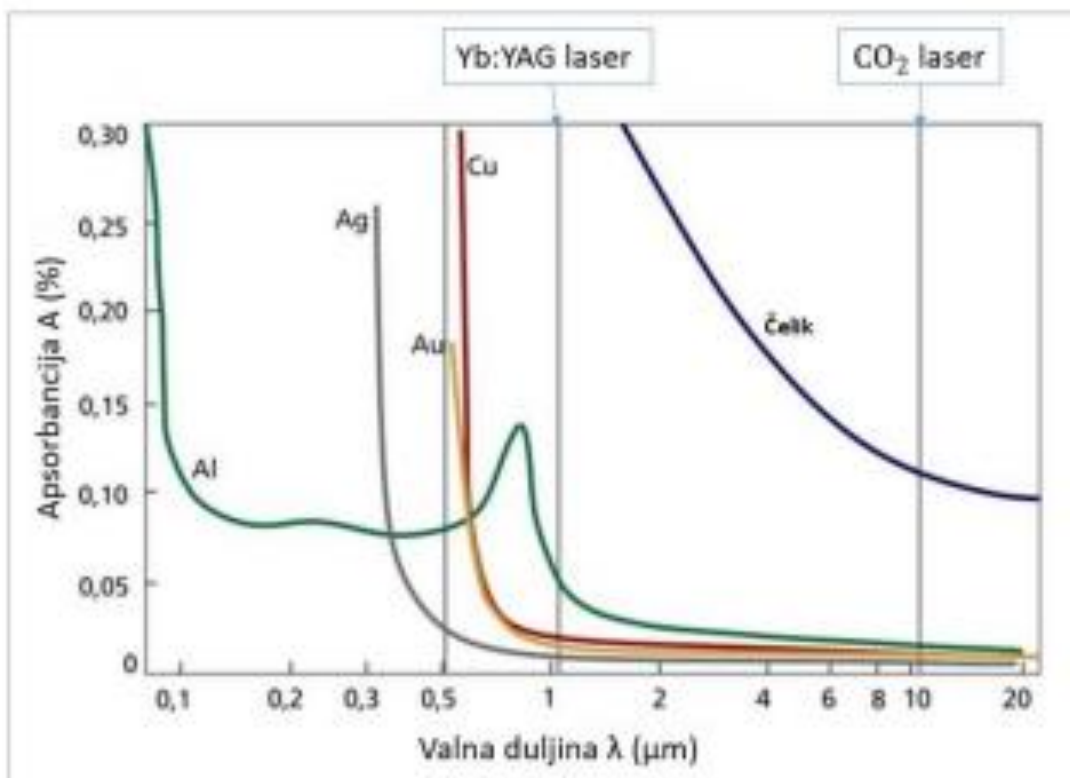
Raspon parametara za korištenje SLM postupka je prikazan u tablici 1.

Tablica 1 – Parametri SLM postupka [9]

Parametar	Vrijednost	Učinak
Snaga lasera	20 -400 W	12 - 16 J/mm <sup>2</sup>
Brzina skeniranja	20 - 1500 mm/s	Brzina procesa, balling
Strategija skeniranja	Razine strategije	Gustoća, kvaliteta površine
Pomak između staza taljenja	0,1 : 0,15 : 0,2 mm	Brzina procesa, stapanje rastaljenog materijala
Debljina sloja taljenja	20 - 150 μm	Veća debljina rezultira manjom adhezijom slojeva
Veličina čestice praha	20 - 75 μm	Veličina pora
Svojstva praha	Apsorpcija laserske zrake, kemijska svojstva, površinska napetost, viskoznost, toplinska vodljivost	Pore, mehanička svojstva
Atmosfera u komori	Argon, dušik	Oksidacija
Predgrijavanje radne podloge	Oko 400 °C	Smanjenje zaostalih naprezanja, bolja mehanička svojstva
Postprocesiranje	Toplinska obrada	Manja zaostala naprezanja, povećanje relativne gustoće, bolja mehanička svojstva

## 2.1. Interakcija metala i laserske zrake

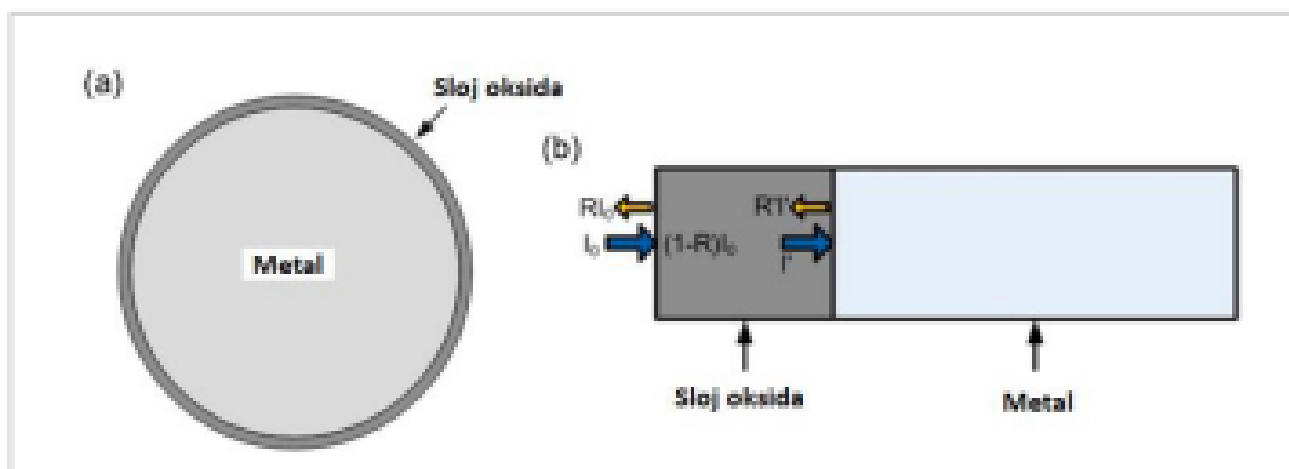
Postupak selektivnog laserskog taljenja se temelji na zagrijavanju i taljenju metalnih prahova. Za taljenje praha se koriste pulsirajuće ili kontinuirane laserske zrake. Na samom početku primjene SLM postupka u tehnici, koristio se CO<sub>2</sub> laser valne duljine  $\lambda \approx 10,6 \mu\text{m}$ , nakon toga e Nd: YAG laser valne duljine  $\lambda \approx 1,06 \mu\text{m}$ , a u današnje vrijeme se u najvećem broju slučajeva koriste Yb: YAG laseri valne duljine  $\lambda \approx 1,07 \mu\text{m}$ . Yb: YAG laser se koristi zbog dobre apsorpcije valnih duljina u infracrvenom području kod metalnih prahova. Laser ima koherentnu monokromatsku zraku, fotone koji omogućuju prijenos energije u metal. Apsorbancija tj. logaritam omjera intenziteta upadnog zračenja i propuštenog zračenja kroz materijal nekih metala je prikazana na slici 7. [9]



Slika 7 – Apsorbancija metala [9]

Čestice metalnog praha vrlo često oblaže oksidni sloj. Upadom laserske zrake na metalni prah, dolazi do djelomične refleksije laserske zrake. Jedan dio laserske zrake apsorbira oksidni sloj, dok se jedan dio reflektira ili apsorbira metalna matrica. Mogućnost apsorpcije metalnih prahova povećava sloj oksida, slika 8. [9]

Brzina skeniranja, snaga lasera te mogućnost apsorpcije zračenja metalnog praha direktno utječu na volumetrijsku gustoću energije koja je ključna kod zagrijavanja, a potom i taljenja metalnih prahova. [9]



Slika 8 – ApSORBANCija kod čestice metalnog praha [9]

## 2.2. Prednosti i nedostaci SLM postupka

Sve veća uporaba SLM postupka opravdana je brojnim prednostima u odnosu na konvencionalne načine proizvodnje poput visoke dimenzijske točnosti dijelova, minimalne naknadne obrade... Ovaj postupak od velike je pomoći kod topološke i konstrukcijske optimizacije različitih proizvoda jer omogućuje izradu monolitne kompleksne geometrije uz zadržavanje optimalne krutosti, a uz to dolazi do smanjenja mase proizvoda do 50 %. [7]

Jedna od prednosti SLM postupka je svakako mogućnost izrade kompliciranih oblika bez upotrebe specijalnih alata ili kalupa. To omogućuje uštedu vremena i novaca prilikom izrade željenih modela. Kod SLM postupka moguće je ponovo upotrijebiti već korišteni prah ukoliko ga se na adekvatan način spremi. Mogućnost recikliranja praha jedna je glavnih odlika i prednosti ovog postupka. Ponovnom upotrebom praha omogućena je maksimalna iskoristivost materijala uz minimalne otpade, a to je svakako ekološki prihvatljiv postupak. Prahovi se mogu koristiti od 12-14 puta nakon prosijavanja bez vidljivih promjena u njihovim svojstvima. [1, 2]

Europa, kao i ostatak svijeta nastoji smanjiti emisije stakleničkih plinova kako bi se ublažile potencijalne posljedice klimatskih promjena. Aditivne tehnologije poput selektivnog laserskog taljenja vodeći su predstavnik takve vrste proizvodnje. Ušteda resursa očitava se kod proizvodnje svih dijelova i komponenata za zrakoplovnu i automobilsku industriju. Lijevanje zahtjeva skupe kalupe dok aditivne tehnologije nemaju ograničenje dizajna bez potrebe za skupim i specijalnim

alatima. Ovom se tehnologijom smanjuje korištenje štetnih kemikalija poput maziva i rashladnih tekućina. [2]

Osim prednosti, SLM postupak isto tako ima i brojne nedostatke. Ovim postupkom dobiva se velika količina zaostalih naprezanja, anizotropnost, poroznosti, vrlo loša kvaliteta izrađene površine, vrijeme proizvodnje komada je prilično dugo, ponekad se ne mogu dobiti željena svojstva materijala kao ni tražena točnost dimenzija. [1, 2]

No i za ove nedostatke postoji rješenje, kako bi se riješili ovi nedostaci, provode se naknadni postupci obrade poput toplinske obrade, brušenja, poliranja...[10]

Osim navedenih nedostataka koji uključuju svojstva dobivenih proizvoda, velika prepreka je i cijena postupka. [1, 2]

Mehanička svojstva proizvoda kod SLM postupka uvelike ovise odabranim parametrima procesa te o materijalu. Potrebno je odabrati pravilu kombinaciju parametara jer se u protivnom dobije manja relativna gustoća, veća količina poroznosti. Ukoliko se pore nalaze u blizini površine proizvoda, one su posebno nepoželjne jer su koncentratori naprezanja, potencijalno dovode do pukotina i lomova. [9]

### **2.3. Defekti nastali SLM postupkom**

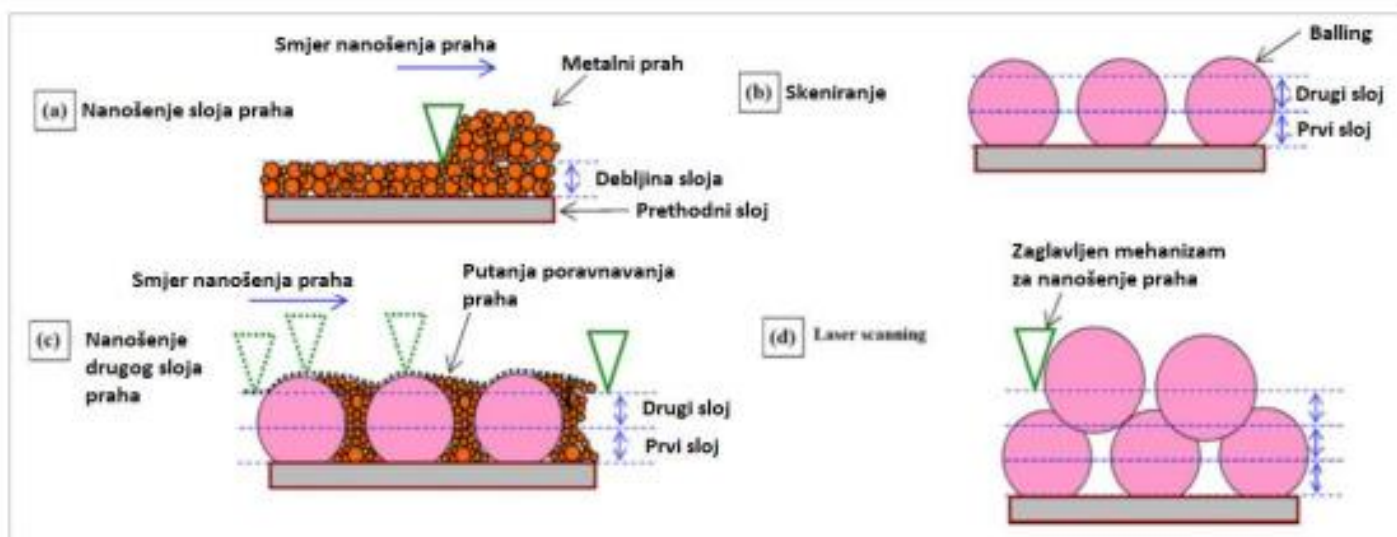
Defekti u proizvodima proizvedenim SLM postupkom koji imaju najveći utjecaj na mehanička svojstva proizvoda su pore, pukotine te zaostala naprezanja. Njihov utjecaj na mehanička svojstva posebno je vidljiv u uvjetima dinamičkog opterećenja. Osiguravanjem dobre gustoće proizvoda proizvedenih SLM postupkom smanjuje se porozitet. Nastale pore u proizvodima proizvedenim SLM postupkom mogu biti sferičnog i nepravilnog oblika. Pore sferičnog oblika nastaju zbog zarobljenih mjehurića plina. Nepravilan oblik pora nastaje uslijed sporog toka taline te nepravilnim stapanjem rastaljenih slojeva. Sferične pore su obično manje od nepravilnih. Proizvodi s manjim udjelom poroziteta otporniji su na umor i trošenje. [7, 11]

Uslijed velikih toplinskih gradijenata nastaju zaostala naprezanja. Laserskom zrakom dolazi do zagrijavanja i taljenja sloja praha. Brzim porastom temperature dolazi do pada čvrstoće, širenje nastale taline ograničavaju prethodni slojevi, tako dolazi do uvođenja tlačnih naprezanja u prethodne slojeve. Hlađenjem dolazi do skupljanja sloja taline. Skupljanje ograničavaju prethodni slojevi te time dolazi do uvođenja vlačnih naprezanja u slijedeći sloj. Iz tog razloga se na vrhu proizvedenih proizvoda nalaze vlačna naprezanja te veća količina zaostalih naprezanja. Zaostala naprezanja potencijalno mogu inicirati pukotinu te utječu na anizotropiju svojstava izradaka. Naknadnim obradama smanjuju se anizotropija i zaostala naprezanja. [7]

Smanjenje zaostalih naprezanja se ostvaruje predgrijavanjem radne površine, time se pridonosi zgušnjavanju materijala uzorka ukoliko se ne dobije dovoljna količina energije od lasera. Pritom

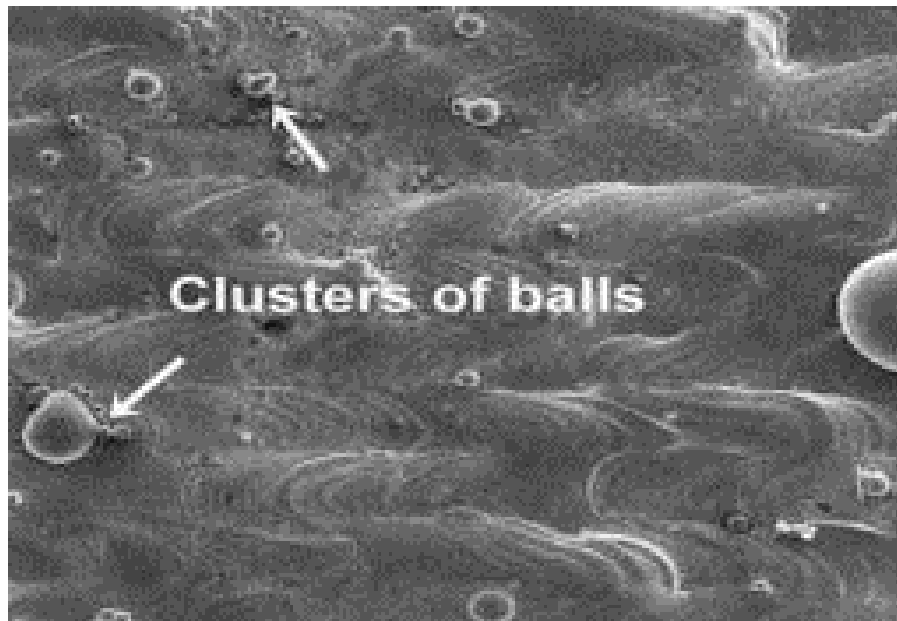
također treba biti oprezan, odabire se optimalno vrijeme i temperatura predgrijavanja jer ukoliko se komponente predugo ostave na zagrijanoj radnoj površini dolazi do pogrubljenja zrna što utječe na smanjenje čvrstoće. Temperature predgrijavanja radne površine kod SLM postupka najčešće su u rasponu od 200 do 400 °C. [7, 9]

Balling je jedna od najčešćih mikrostrukturnih grešaka koje se pojavljuju kod SLM postupka. Nastaje zbog svojstava taline koja se uslijed površinske napetosti metala u rastaljenom stanju oblikuje u sferoidne čestice. Uslijed površinske napetosti onemogućeno je ravnomjerno širenje taline te tako nastaju sferoidne čestice, odnosno balling. Sferoidine čestice se ponekad mogu akumulirati u gornjim slojevima što negativno utječe na nanošenje metalnog praha u sljedećem sloju. Ova pojava direktno utječe na gustoću komponente, kvalitetu površine i na mehanička svojstva, slika 9. [9]



Slika 9 - Proces nastanka ballinga [9]

Spuštanjem razine kisika u komori za 0,1% uz kombinaciju male brzine skeniranja i visoke snage lasera uspješno se može izbjeći pojava ballinga. Balling nastaje najčešće uslijed nastanka oksidnog sloja koji sprječava međusobno staljivanje slojeva. Pojava ballinga je povezana i sa svojstvima materijala od kojih najveći utjecaj imaju toplinska vodljivost i temperatura tališta. Prikaz formiranih kuglica uslijed ballinga u mikrostrukтури je na slici 10. [9]



*Slika 10 – Balling [7]*

Nastanak 'keyhole' pora, slika 11, uzrokuju veliki unosi topline u materijal pri čemu kod taljenja materijala dolazi i do isparavanja taline. Talina se oblikuje u bazenu oblika slova 'V'. Pore nepravilnog oblika određene su parametrima SLM postupka, a te promjene dovode do promjene geometrije bazena taline. Predviđanje poroznosti se može predvidjeti na temelju geometrije bazena taline. [7]



*Slika 11 – Greške u mikrostrukтури tipa „Keyhole“ [7]*



## 2.4. Elementarni aluminij

Metal koji je u širokoj upotrebi u inženjerskoj praksi je aluminij. Njegova izvrsna tehnička svojstva poput male gustoće, otpornosti na koroziju, visoke specifične čvrstoće daju mu prednost za primjenu u konstrukcijske svrhe. U današnje vrijeme aluminij se najviše koristi u automobilskoj, zrakoplovnoj, prehrambenoj te vojnoj industriji. Uobičajena je proizvodnja aluminijskih proizvoda konvencionalnim postupcima poput metalurgije praha ili lijevanjem. Proizvodnja aluminijskih proizvoda aditivnim postupcima proizvodnje poput SLM postupka vrlo je zahtjevna. Elementarni aluminij ima vrlo visoku toplinsku vodljivost jer ne sadrži legirne elemente koji utječu na smanjenje toplinske vodljivosti. Oksidacija te vrlo visoka refleksija laserske zrake negativne su pojave koje se javljaju prilikom primjene čistog Al kod SLM postupka. Rezultat toga su različite nepravilnosti na proizvodima poput poroznosti, pora, uključaka itd.. Vrlo bitan parametar je stoga kod SLM postupka gustoća ulazne energije. Preniska gustoća energije ne tali u potpunosti čestice praha već ostanu djelomično nerastaljene čestice koje uzrokuju nastanak pora nepravilnog oblika. S druge strane, previsokom gustoćom ulazne energije nastaju kuglaste plinske pore. U porama ostaju zarobljene mješavine inertnih plinova poput argona i dušika. Loša mehanička svojstva čistog aluminijskog razlog su ne korištenja ovog materijala za izradu SLM postupkom.[12]

## 2.5. AlSi10Mg

Aluminijske legure odlikuju se dobrim tehničkim svojstvima poput male gustoće, dobre toplinske i električne vodljivosti u odnosu na gustoću, otpornosti na koroziju, visoke tvrdoće i čvrstoće, male gustoće, duktilnosti... Sve ove karakteristike imaju pozitivan utjecaj na široku primjenu aluminijskih legura ali i njihovih legura. Iako je SLM postupak u današnje vrijeme široko rasprostranjen te se za ovaj postupak koriste različite legure, korištenje legure aluminijske predstavlja pravi izazov kod ovog postupka. Razlog tome je značajna refleksija laserske zrake na prahu aluminijske. Upravo ta pojava ima značajan utjecaj na pojavu oksidnog sloja po površini rastaljenog materijala, na vrlo širok raspon skrućivanja visokočvrstih legura Al, a najviše utječe na samu učinkovitost lasera. [13]

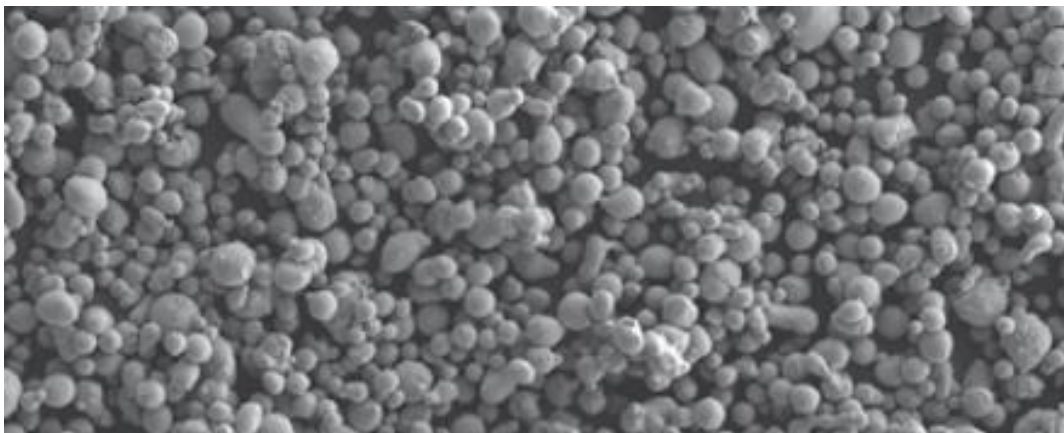
Legura AlSi10Mg po svom sastavu je podeutektska legura gotovo eutektskog sastava. Ta se legura zbog vrlo malog toplinskog stezanja te niskog viskoziteta uglavnom primjenjuje za lijevanje. Kod lijevanja izlučuje se grubo acirkularni eutektski silicij, to je krhka faza koja ima velik utjecaj na daljnja svojstva, dovodi do smanjenja žilavosti i duktilnosti kod odljevaka. [14]

Primarni razlog primjene ove legure za SLM postupak je svakako uzak raspon skrućivanja legure ( $\Delta T_{L-S} = \sim 40\text{K}$ ) te niži koeficijent toplinskog širenja od ostalih legura aluminija. Time se postiže dimenzijska točnost, poboljšanje mehaničkih svojstava uz smanjenje zaostalih naprezanja u proizvodima. [14]

Veća brzina skrućivanja kod SLM postupka naspram konvencionalnih postupaka kod kojih je brzina skrućivanja manja od  $10^2$  °C/s dovodi do formiranja sitnozrnate metastabilne sačaste strukture AlSi10Mg. Metastabilnu sačastu strukturu tvore malena izdužena  $\alpha$  - Al zrna. Na granicama zrna izlučen je eutektički silicij. S druge strane, lijevane legure imaju grubu dendritičnu strukturu. [14]

Slika 12 prikazuje prah legure AlSi10Mg. Printani komadi od AlSi10Mg legure su obično dobre čvrstoće i tvrdoće. Također su i dobrih toplinskih svojstava, a njihova odlika je i mala gustoća koja uz konstantni volumen osigurava malu masu, a to je najbitnija karakteristika materijala kod današnjih proizvoda. Primjena proizvoda iz ovog materijala je jako široka. U najvećoj mjeri se koriste u zrakoplovstvu te u automobilskoj industriji. Iz ovog materijala proizvode se i dijelovi koji su nepropusni za plin, različiti strojni visoko-opterećeni dijelovi, proizvodi jednostavnijeg dizajna te kao zamjena za lijevanu leguru AlSi10Mg. Vlačna čvrstoća ove legure iznosi 460 MPa, dok je granica razvlačenja 245 MPa. [13]

Ova legura široko je poznata zbog svoje odlične livljivosti i zavarljivosti. AlSi10Mg podnosi velika mehanička opterećenja. Ovu je leguru moguće naknadno obrađivati različitim obradama. Prednost ove legure je dobra livljivost taline uz malo skupljanje što je bitna karakteristika za lijevanje. Zbog dobre zavarljivosti i sposobnosti lijevanja ova legura se najvećoj mjeri primjenjuje za SLM postupak. [13, 14]



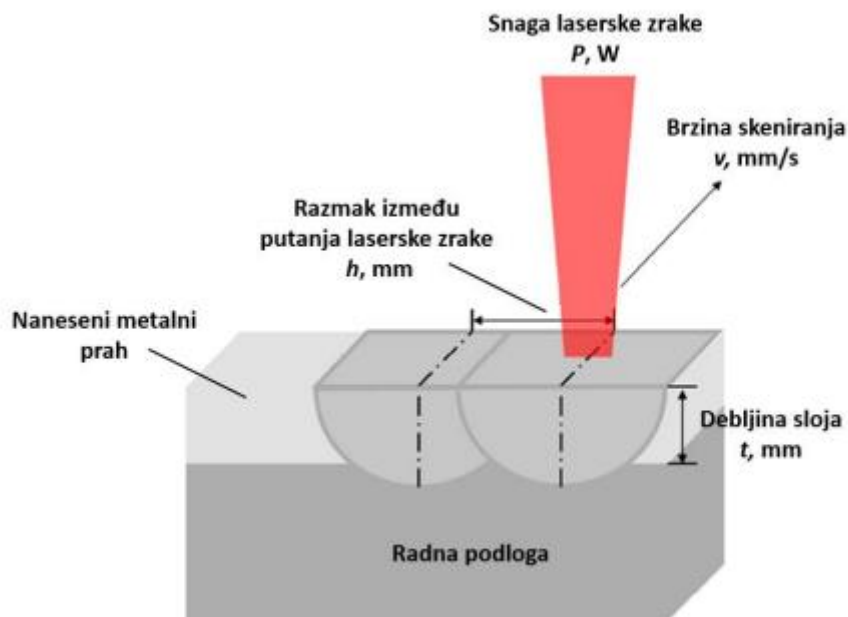
*Slika 12 – Prach AlSi10Mg na SEM-u [13]*

## 2.6. Utjecajni parametri kod SLM postupka

Na svojstva i mikrostrukturu proizvoda izrađenih SLM postupkom utječu parametri postupka. Parametri s najvećim utjecajem na mikrostrukturu i svojstva su brzina i snaga lasera, debljina sloja, strategija skeniranja te razmak putanje lasera pri taljenju (hatch distance), tablica 2. Shematski prikaz glavnih parametara kod SLM postupka je prikazan na slici 13. [1, 9]

Tablica 2 - Utjecajni parametri s oznakama [1]

PARAMETAR	OZNAKA
Snaga lasera	$P, W$
Brzina lasera	$v, \text{mm/s}$
Hatch distance	$h, \text{mm}$
Debljina sloja	$t, \text{mm}$
Strategija skeniranja	/
Gustoća energije lasera	$E, \text{J/mm}^3$



Slika 13 - Shematski prikaz glavnih parametara SLM postupka [9]

Ukoliko se pogrešno postave parametri, strategija procesa obrade ili ukoliko se ne osiguraju dovoljne količine praha, dolazi do nastanka pukotina, pora, uključaka, nerastopljenih čestica, zaostalih naprezanja, također nastaje i slaba površinska hrapavost. Upravo iz tih razloga je potrebno pomno odabrati odgovarajuću kombinaciju parametara. [1]

Snaga lasera ima utjecaj na količinu energije koja se dovodi u podlogu. Ovisno o vrsti materijala također utječe i na količinu rastaljenog praha u određenoj debljini sloja. Potrebna je dovoljna snaga lasera da potpuno otopi čestice praha. Ukoliko čestice nisu potpuno otopljene dolazi do problema prilikom skrućivanja zbog nemogućnosti popunjavanja cjelovitog volumena u prethodno određenoj debljini sloja. Brzinom lasera regulira se brzina taljenja kao i skrućivanja. [1, 14]

Malom brzinom skeniranja lasera nastaju metalurške pore koje imaju kuglasti oblik, postupnim povećavanjem brzine dolazi do pogrešaka 'keyhole' koje dominiraju kod većih brzina skeniranja. Kod većih brzina skeniranja talina je kapilarno nestabilna te dolazi do prskanja taline i pojavljuju se skupine skrutnutih kapljica koje se nazivaju prskotinama. [1]

Proces dvostrukog skeniranja pripomaže kod anuliranja pogrešaka 'keyhole', ali taj proces traje duže. Dovodjenje prevelike količine energije u sloj praha uzrokuje nastanak metalurških pora u AlSi10Mg. To nije jedini razlog nastanka pora, pore nastaju i uslijed vlage koja se nalazi u česticama praha. Potrebno je pažljivo skladištenje i sušenje praha prije upotrebe kako bi se uklonila vlaga. Ukoliko se koristi veća brzina skeniranja te neosušeni prah povećava se udio poroziteta u AlSi10Mg uzorcima. Povećanje poroznosti nastaje i uslijed smanjenja snage lasera i povećanja brzine skeniranja lasera. [1]

Bitan parametar je svakako i razmak između putanje laserske zrake pri taljenju. Veći razmaci omogućuju veću brzinu izrade uz korištenje manje debljine sloja. Optimalnim razmakom se smatra ona udaljenost kojom se ostvaruje preklapanje između susjednih staza kao i preklapanje unutar istog sloja. Suprotno tome, manjim razmakom između laserskih zraka produžuje se vrijeme trajanja čitavog procesa. [1]

Debljinom sloja smatra se debljina nanesenog praha prilikom jednog prolaska klizača. To je zapravo debljina praha koja će se taliti prilikom svakog prolaza laserske zrake. Ukoliko je debljina sloja prevelika, dolazi do nepotpunog taljenja praha te nastaju različite greške poput sferoidizacije taline. [1, 14]

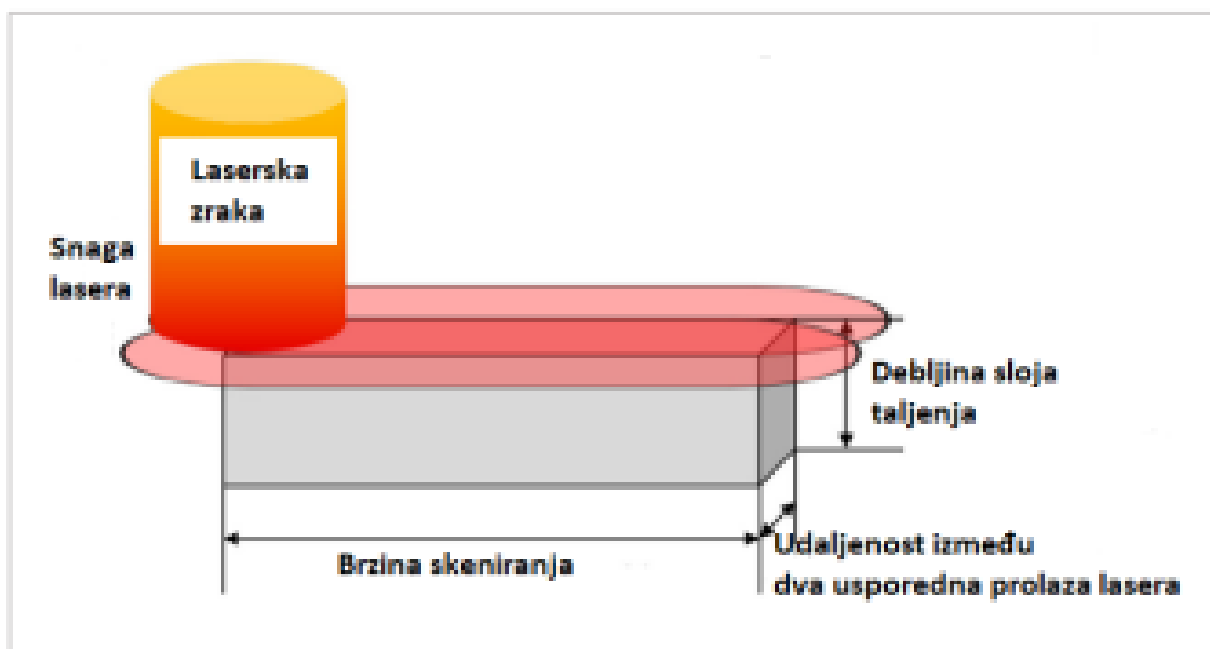
Hatch distance određuje i staze preklapanja prilikom taljenja u jednoj debljini sloja, time je omogućeno učinkovitije staljivanje sloja. Svaki parametar utječe na mehaničke karakteristike gotovih proizvoda.[1]

Količinom unesene topline ili gustoćom energije lasera moguće je izračunati utjecaj navedenih parametara. Oznaka je  $E$ , J/mm<sup>3</sup> te se opisuje formulom: [1]

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad [1]$$

gdje je  $P$ , W, snaga lasera,  $v$ , mm/s, brzina lasera,  $h$ , mm, razmak putanje lasera pri taljenju (hatch distance) te  $t$ , mm, debljina sloja taljenja. [1]

Ovom jednadžbom se povezuje dovedena toplina na lokalni volumen sa snagom lasera, brzinom skeniranja, debljinom taljenog sloja te razmak putanje lasera pri taljenju. Iz ove jednadžbe se može zaključiti da će gustoća energije lasera biti veća ukoliko se koristi veća snaga lasera uz manju brzinu skeniranja lasera. Pritom treba biti na oprezu kod biranja parametara kako ne bi došlo do pojave tzv. ballinga. Shematski prikaz utjecaja parametara na SLM postupak je prikazan na slici 14. [1, 9]



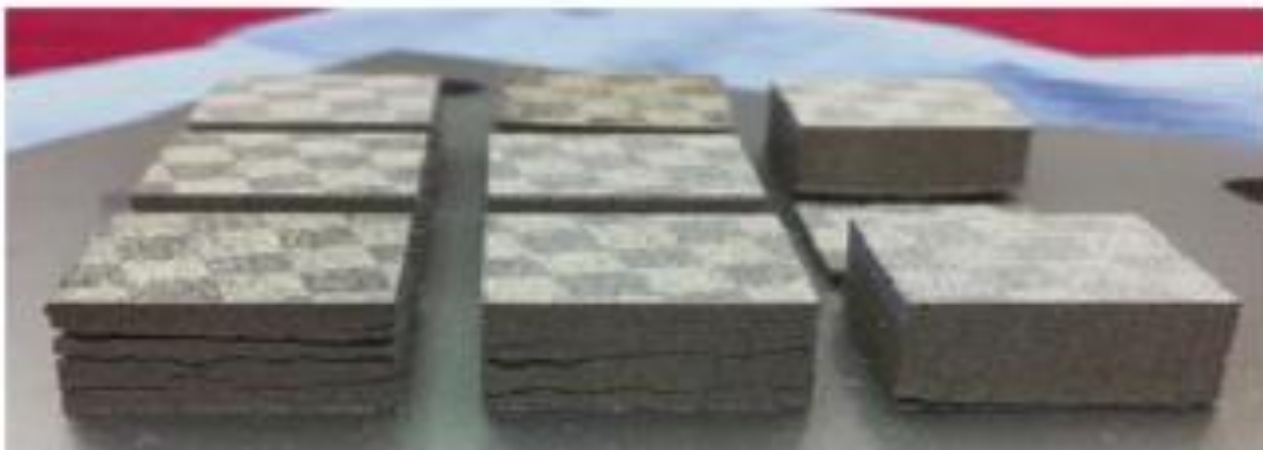
Slika 14 – Shematski prikaz SLM postupka [9]

Strategija skeniranja je raster kojim laserska zraka prolazi prilikom izrade proizvoda. Ovaj parametar je sklon izmjenama ovisno o geometrijskim i mikrostrukturnim zahtjevima u određenom sloju proizvoda. Mikrostruktura, vrsta i količina zaostalih naprezanja te mehanička svojstva proizvoda proizlaze iz strategije skeniranja. Može se reći da je strategija skeniranja jedan od najbitnijih parametara jer se njime određuju sva najbitnija svojstva proizvoda. [1, 9, 14]

Odnos relativne gustoće izratka u odnosu na teorijsku gustoću materijala - stupanj poroziteta najutjecajni je parametar na mehanička svojstva dobivenih proizvoda SLM postupkom. Legure koje imaju gotovo teorijsku gustoću, a izrađene su SLM postupkom uobičajeno imaju bolja svojstva kod vlačnog opterećenja, veći udarni rad loma te bolja dinamička svojstva. [1, 9, 12]

Zaostala naprezanja dovode do raslojavanja, slika 15, te stvaranja pukotina. Strategijom skeniranja utječe se na zaostala naprezanja. Strategija šahovnice je strategija sektorskog skeniranja gdje se jedan sloj praha podijeli na sektore te se susjedni sektori skeniraju okomito jedan na drugi. Postoje i strategije gdje se svaki sloj skenira u zakrenutoj ravnini za 45° ili 90° u odnosu na prethodni sloj. Anuliranje zaostalih naprezanja je moguće naknadnom toplinskom obradom te optimalnim zagrijavanjem komore. [7, 9]

Dimenzijska točnost i hrapavost površine proizvoda proizvedenih SLM postupkom su ekvivalentne proizvodima koji su proizvedeni preciznim lijevanjem. Može se postići hrapavost površine ( $R_a$ ) iznosa 10 – 15  $\mu\text{m}$ . Hrapavost tog iznosa se postiže optimiranjem udaljenosti između dva prolaza laserske zrake te manjom brzinom skeniranja. Površinska hrapavost se još smanjuje i postupkom pretaljivanja površine laserom unutar radne komore, pritom se hrapavost površine smanji na 1,5  $\mu\text{m}$ . Dimenzijska točnost proizvoda proizvedenih ovim postupkom određuje se promjerom točke laserske zrake te iznosi 50 – 100  $\mu\text{m}$ . na dimenzijsku točnost također utječu svojstva praha, kao i parametri postupka, a ona iznosi 0,1 mm. [9]



*Slika 15 – Raslojavanje [9]*

Može se zaključiti da je utjecaj parametara kod SLM postupka značajan, te je potrebno pomno odabrati kombinaciju parametara kako bi se anulirala ili smanjila pojava i količina poroznosti u proizvodima. [1, 14]

### 3. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu rada izrađeni su uzorci iz AlSi10Mg legure SLM postupkom na 3D pisaču EOS M 290. U ovom radu ispitan je utjecaj promjene snage i brzine lasera kod jedne debljine taljenog sloja uz konstantan razmak putanje lasera pri taljenju, na mikrostrukturu, udio poroziteta i mikrotvrdoću uzoraka iz AlSi10Mg legure. Cilj istraživanja bio je utvrditi hoće li povećanje brzine lasera značajnije utjecati na promjenu mikrostrukture te pojavu poroziteta u ispitnim uzorcima.

#### 3.1. 3D pisač EOS M 290

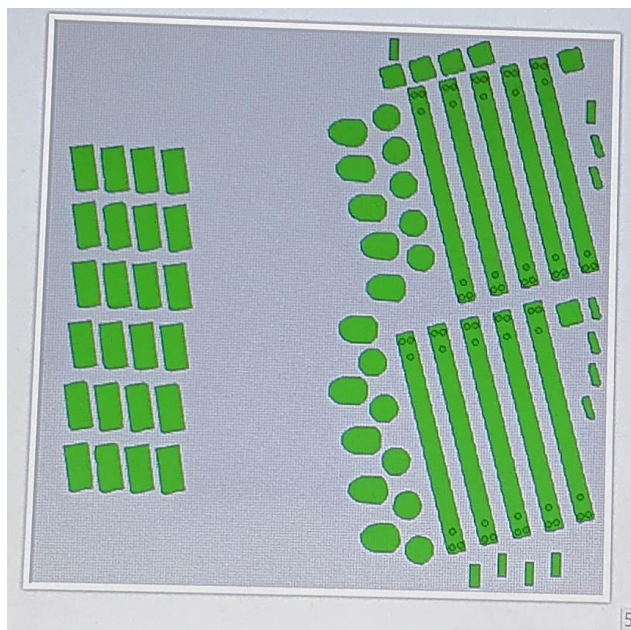
Jedan od najčešće korištenih 3D printera u praksi za SLM postupak je printer EOS M 290, slika 16. Volumen radne komore ovog uređaja je 250 x 250 x 325 mm. U radnoj komori su smješteni sustavi koji omogućuju ostvarivanje SLM postupka. Podizni sustav omogućava podizanje i spuštanje pregrada u komorama koje se pune prahom. Zagrijavanje komore se ostvaruje sustavom za grijanje. Usmjeravanje laserske zrake omogućeno je optičkim sustavom s laserom, dok je kontrola plinova upravljana preko sustava za upravljanje procesnim plinom. Čitav proces kontrolira se računalom. Također, postoje sustavi koji su namijenjeni za hlađenje, čišćenje te pokretanje. Ovim printerom izrađuju se proizvodi vrlo složene geometrije. Najčešće korišteni materijali su metalni prahovi legure Al i Ti, alatni čelik, Co-Cr legure, nehrđajući čelik i plemeniti metali. Iznos promjera laserske zrake je 0,1 mm, dok je maksimalna snaga 400 W. Inertni plinovi koje je moguće koristiti su Ar ili N. [15]



Slika 16 – Uređaj EOS M 290



Ovaj 3D pisač ima u sebi računalo u koje se učitava raspored komada na ploči kao i zadani parametri za SLM postupak. Učitavanjem u računalo dolazi do podijele komada na određen broj slojeva praha. Također je na ekranu računala slikovno vidljiv raspored komada na radnoj ploči, slika 17.



*Slika 17 - Prikaz rasporeda komada na radnoj ploči*

### **3.2. Metalni prah AlSi10Mg**

Metalni prah u većini slučajeva dobiva se atomizacijom, to je najvažnija metoda proizvodnje metalnih prahova. Široka primjena ovog postupka proizlazi iz mogućnosti dobivanja metalnih prahova visoke čvrstoće direktno iz taline. Ova metoda ne ovisi o fizikalnim i mehaničkim svojstvima čvrstog materijala. Atomizacija se sastoji od taljenja, atomizacije, odnosno dezintegracije taline u kapljice, skrućivanja i taljenja. [16]

Na postupak izrade proizvoda značajno utječu svojstva praha poput tališta, gustoće, toplinske vodljivosti, latentne topline taljenja i toplinskog kapaciteta. Tim je svojstvima određena entalpija taljenja proizvoda koji su proizvedeni SLM postupkom. Entalpija taljenja je zapravo potrebna količina energije kojom se potpuno rastali jedinica mase metalnog praha. Toplinska vodljivost je vrlo važan čimbenik koji određuje ravnotežu čitavog sustava. Ukoliko je materijal toplinski vodljiv, potrebna je veća količina energije za stabilniju talinu.



Kod izrade uzoraka korišten je metalni prah AlSi10Mg proizvođača EOS. Kemijski sastav praha je prikazan u tablici 3.

Tablica 3 - Kemijski sastav metalnog praha [13]

Kem. el.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
Maseni udio, %	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

Prah se skladišti u kutiji te se može koristiti više puta, slika 18. Budući da je SLM postupak specifičan po tome da se tali prah u vrlo tankim slojevima samo na mjestima koji odgovaraju zadanim CAD modelima, tako često ostane puno nekorištenog praha koji se nalazio u uređaju, no nije taljen. Takav prah se prosijava kroz sito te se može ponovno upotrebljavati.

Kutiju praha je potrebno čuvati na suhom mjestu te se u kutiju dodaje vrećica silica-gela koji upija vlagu iz praha. Potrebno je što više smanjiti vlagu kako bi se smanjila i oksidacija.

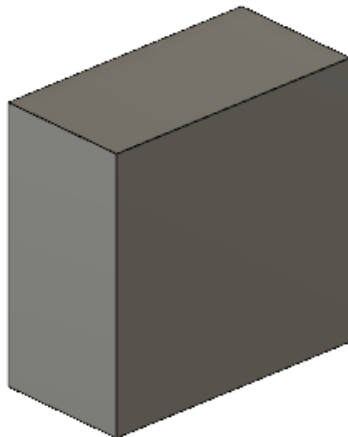


Slika 18-Metalni prah AlSi10Mg

### 3.3. Izrada uzoraka SLM postupkom

Selektivnim laserskim taljenjem izrađeni su uzorci za potrebna ispitivanja. Uzorci za eksperimentalni dio izrađeni su oblika prizme dimenzija 20 x10 x20 mm, **Slika 18**. Modelirani su u Fusion 360 3D CAD programu te su izrađeni na uređaju EOS M 290. Učitavanjem modela uzoraka u licencirani EOS program raspoređuju se po radnoj ploči te kako bi im se zadali

parametri. Ukupno je za potrebe ovog diplomskog rada izrađeno 8 uzoraka. U ovom slučaju mijenjala se brzina taljenja te snaga lasera, dok razmak između linija taljenja (hatch distance) od 0,2 mm i debljina taljenog sloja od 0,06 mm ostaju nepromijenjeni.



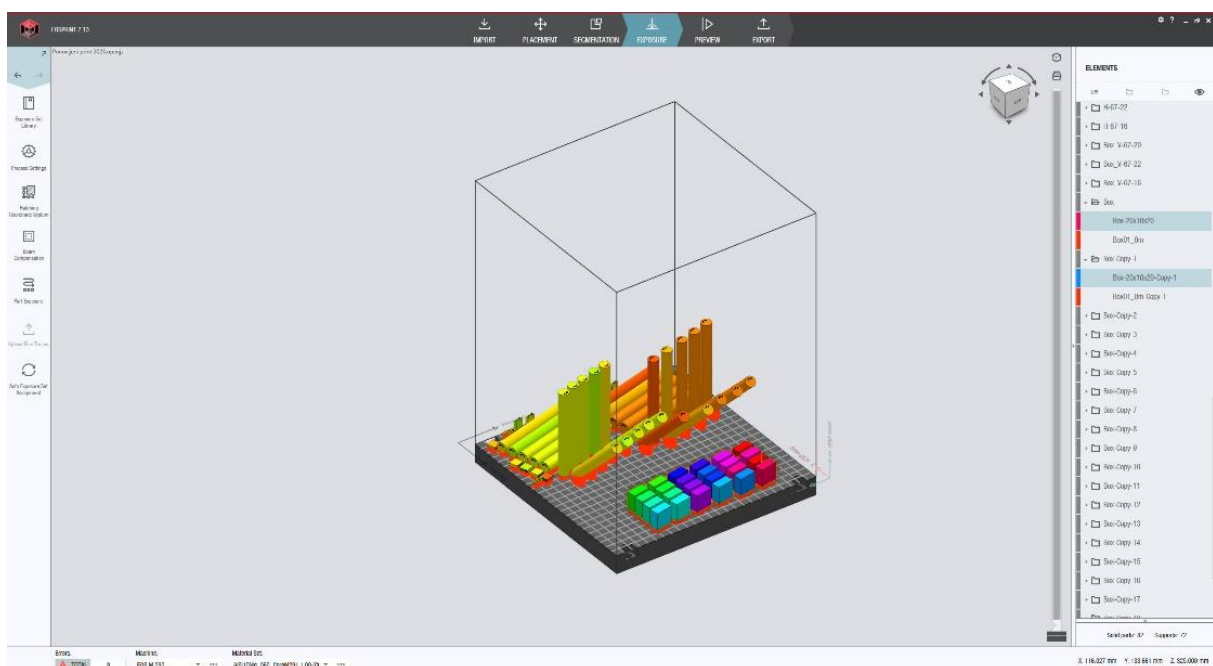
*Slika 19 - Oblik ispitnog uzorka*

Na 8 uzoraka korištena su 4 različita iznosa brzina te 4 različita iznosa snage lasera. Kad se ovi parametri uvrste u formulu za gustoću energije laser  $E$ , dobiveni rezultati navedeni u tablici 4.

*Tablica 4 - Parametri izrade uzoraka*

Oznaka	Brzina taljenja $v$ , mm/s	Snaga lasera $P$ , W	Gustoća energije lasera, $E$ , J/mm <sup>3</sup>
U1	1100	370	28,03
U2	1100	300	22,73
U3	1200	370	25,69
U4	1200	300	20,83
U5	1300	370	23,72
U6	1300	300	19,23
U7	1400	370	22,02
U8	1400	300	17,85

Licencirani EOS program – EOSPRINT, slika 20, omogućuje raspoređivanje komada po radnoj ploči, radna ploča nastoji se maksimalno iskoristiti. Komadi se mogu smjestiti u različitim položajima. Ukoliko je neki komad većih dimenzija, a potrebno ga je smjestiti u gabaritne mjere komore, taj se komad postavlja pod određenim kutom. Postavljanje komada pod kutom uvelike smanjuje vrijeme trajanja izrade jer se tim smanjuje broj prolaza klizača koji nanosi slojeve praha. Ovaj program omogućuje i zadavanje različitih parametara za svaki komad te dodavanje potporne strukture. Ukoliko su neke jednostavnije geometrije, nije ih potrebno modelirati u 3D CAD programu nego je moguće modelirati direktno u EOS programu. Nakon optimalnog smještanja komada po ploči, dodaje se i smjer putanje lasera. Putanja je zadana od smjera vrata prema stražnjoj strani, s lijeva na desno jer se na taj način postiže ravnomjerna putanja lasera.



Slika 20 - EOSPRINT program

Na slici 20, prikazana je maksimalna iskoristivost ploče, komadi su optimalno raspoređeni te im je dodan dodatak – potporna struktura. Nakon zadavanja svih parametara, putanje lasera te rasporeda komada po radnoj ploči, to se sve prebacuje u uređaj EOS M290. Nakon toga slijedi priprema printa uzoraka na samom uređaju.

Da bi uređaj mogao isprintati uzorke željenih dimenzija i oblika, kalibrira se radna ploča. Nakon što je ploča kalibrirana možemo imati određenu dozu sigurnosti da će dimenzije i oblik uzoraka biti zadovoljeni. Pošto je za SLM postupak nužna materija u obliku praha, spremnici se pune prahom, slika 21.



*Slika 21 - Punjenje spremnika prahom*

Spremnici se sastoje od kliznih ploča po z osi koje se pune s prahom, slika 22. Ovisno o veličini uzoraka izračuna se nužna količina praha. U komori je potrebno osigurati dovoljnu količinu praha jer naknadno dodavanje nije moguće. Ploče spremnika spuštaju se kako bi se dobio prostor za prah. Prah se puni pomoću lopatice iz kutije u kojoj se skladišti. Također se koristi maska za lice i rukavice od zaštitne opreme. Za ovaj se postupak koristio metalni prah proizvođača EOS.



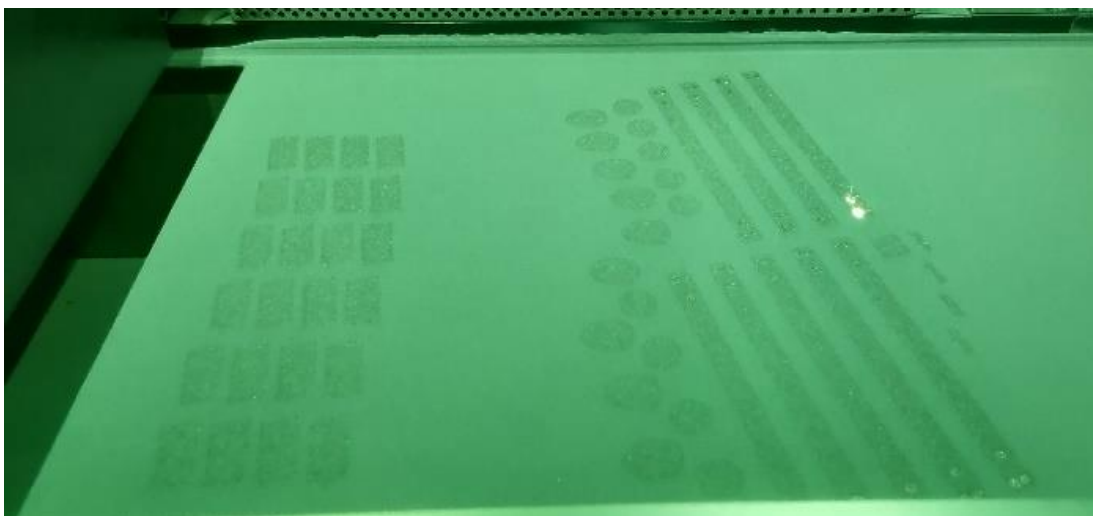
*Slika 22 - Prikaz spuštenih kliznih ploča*

Nakon što se spremnici napune prahom, komora printera puni se inertnim plinom. Kod izrade spomenutih uzoraka za ovo ispitivanje korišten je inertni plin argon, kako bi se u što većoj mjeri smanjila oksidacija korištenog metalnog praha i oksidacija rastaljenog sloja nakon skrućivanja. Nakon punjenja plinom, komora printera zagrijava se na propisanu temperaturu.

Nakon što se prođu svi koraci pripreme, pokreće se program za printanje zadanih modela. Program automatski raspodijeli komade na određen broj slojeva po zadanim parametrima. Prvim prolazom nanosi se vrlo tanki sloj praha na radnu ploču, slika 23. Nakon toga prolazi laserska zraka koja ga tali, pa se opet nanosi tanak sloj praha. Ovaj se postupak ponavlja sve do kraja printanja, slika 24.

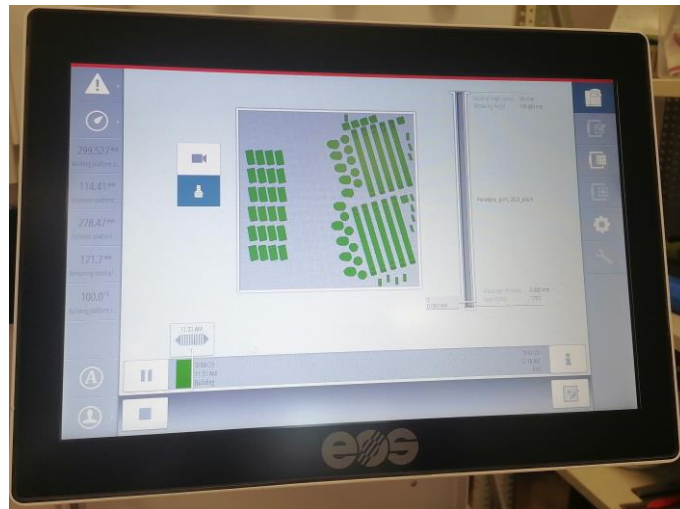


*Slika 23 - Prvi prolaz lasera*



*Slika 24 - Taljenje praha laserom*

Ispitni uzorci za ovaj diplomski rad su podijeljeni na 1753 sloja te je izrada uzoraka tj. print trajao približno 24 sata, slika 25. Osim uzoraka potrebnih za ovo istraživanje, na ploči su bili postavljeni i drugi uzorci tako da se ne zna točna informacija za print ispitnih uzoraka oblika prizme. Zbog dugog vremena pripreme te trajanja printa, cijena ovog postupka je također visoka. Neisplativo je printanje malih serija te je poželjno u potpunosti ispuniti radnu ploču prije početka postupka. Svi potrebni podaci se učitaju sa ekrana printera.



*Slika 25 - Prikaz podijele na slojeve*

Nakon završetka printanja, isprintani proizvodi su potpuno prekriveni metalnim prahom, slika 25. Ti se proizvodi hlade u komori prije vađenja. Vrlo je bitno da se proizvodi ravnomjerno ohlade prije izlaganja sobnoj temperaturi, u protivnom bi moglo doći do razgradnje praha zbog prisutnosti kisika ili pak do deformacije elemenata. Dugim hlađenjem u komori osigurava se i sitnozrnata mikrostruktura, bolja žilavost te minimalno unutarnje naprezanje. Nakon toga se proizvodi vade iz radne komore.





*Slika 26 - Proizvodi prekriveni prahom*

Vađenje komada se sastoji od čišćenja uzoraka od ostataka praha te od uklanjanja uzoraka s radne ploče. Sav prah koji nije taljen prosijava se te sprema ponovo u spremnike. Prah se prosijava kroz sito koje vibrira, slika 27. Prosijava se sav prah kako bi se on mogao ponovo koristiti. Prah se prosijava kako bi od njega odvojile sve one čestice i nečistoće koje su slučajno taljene te kako bi se osigurala kvaliteta ostalih proizvoda izrađenih iz ove materije. Postupak čišćenja proizvoda od praha također zahtijeva zaštitnu opremu te prisutnost usisavača kako bi se maksimalno smanjilo prašenje čestica praha.



*Slika 27 - Prosijavanje praha*

Nakon čišćenja uzoraka, slika 28 je potrebno odvojiti uzorke s ploče. Uzorci su s ploče odvojeni tračnom pilom za metal CY210A, Farrox, slika 29, na mjestu potporne strukture, slika 30. Ploča uzoraka se pričvršćuje na pilu te pila redom reže uzorke, ti se uzorci redom označavaju, slika 31.



*Slika 28 - Očišćeni uzorci*



*Slika 29 - Tračna pila za metal CY210A, Farrox*





*Slika 30 - Odvajanje komada pilom*



*Slika 31 - Označavanje uzoraka*

U ovom postupku isprintano je ukupno 24 uzorka, a za ovo istraživanje je korišteno 8.. Uzorci su dalje pripremljeni standardnim postupkom pripreme uzoraka za metalografsku analizu.

## 4. Priprema uzoraka

Nakon izrade uzoraka, pristupilo se pripremi uzoraka za ispitivanje mikrostrukture i mikrotvrdoće. Uzorci su pripremljeni standardnom metalografskom pripremom koja se sastoji od oblaganja u polimernu masu, brušenja, čišćenja, poliranja te razvijanja mikrostrukture. Priprema uzoraka mora biti provedena korektno kako bi se dobili točni rezultati ispitivanja. Na temelju rezultata ispitivanja i mjerenja će se utvrditi utjecaj zadanih parametara na mikrostrukturu uzoraka.

### 4.1. Oblaganje

Uzorke je potrebno obložiti kako bi se olakšala manipulacija, osigurao uniformni oblik te kako bi se uzorci zaštitili od vanjskih utjecaja ili mehaničkih oštećenja. Postupak oblaganja se sastoji od postavljanja uzorka u kalup te zalijevanja uzorka polimernom masom koju je potrebno prethodno pripremiti, slika 32. Uzorak se postavlja na sredinu kalupa te se zalijeva s masom za oblaganje, slika 33. To je postupak hladnog oblaganja te je potrebno što preciznije i brže uliti masu u kalup jer se polimerna masa brzo skrućuje. Zadani uzorci su obloženi polimernom masom. Nakon što se masa ulije u kalup, kalup se više ne premješta, sve dok se masa potpuno ne skrutne. Nakon skrućivanja, uzorci se jednostavno izvade iz kalupa te nastupa slijedeći korak pripreme.



*Slika 32 - Pripremanje polimerne mase*



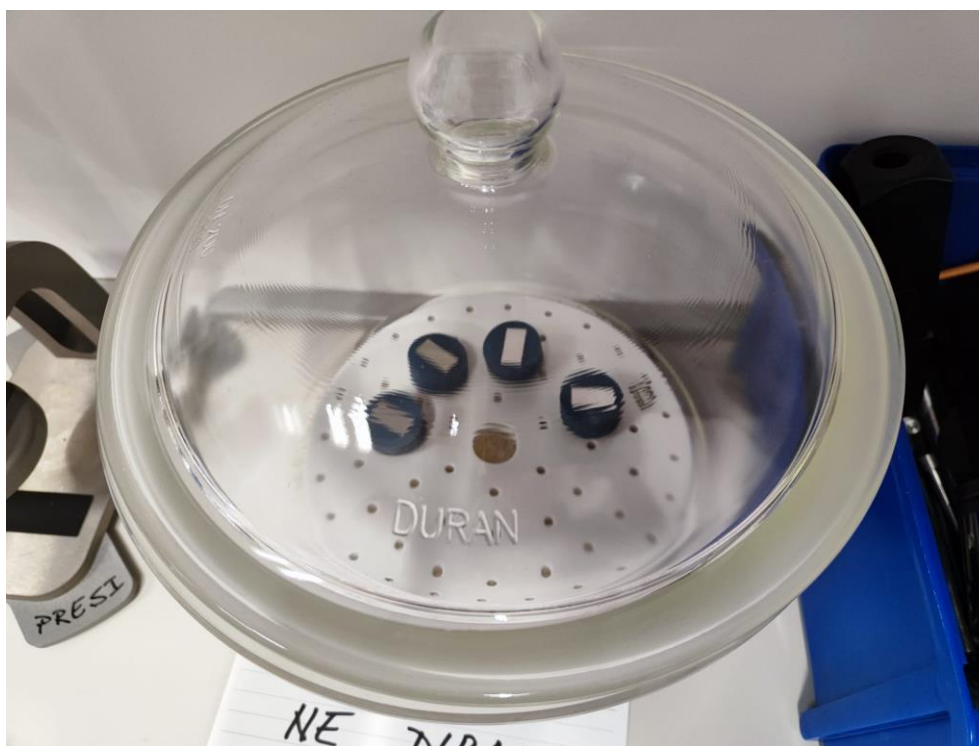
*Slika 33 - Zalijevanje uzoraka polimernom masom*

Nakon što su uzorci obloženi, potrebno ih je označiti na odgovarajući način kako bi se mogli razlikovati, slika 34. Ispitni uzorci nisu išli na nikakvu naknadnu obradu, već su se proučavali u poliranom i nagrzanom stanju, oznaka markerom je prihvatljiv način označavanja. Oznaka mora biti postojana od početka do kraja proučavanja kako se ne bi zamijenili uzorci te kako bismo dobili relevantne rezultate. Kako se priprema i cijelo istraživanje ne može provesti u jednom danu, uzorci se u međuvremenu čuvaju u laboratorijskom eksikatoru, slika 35, kako bi se spriječila oksidacija pripremljene površine.



*Slika 34 - Označavanje uzoraka markerom*





Slika 35 - Čuvanje uzoraka u laboratorijskom eksikatoru

## 4.2. Brušenje

Nakon oblaganja uzoraka slijedi brušenje površine. Uzorke je potrebno izbrusiti kako bi se otklonio sloj oksida, sloj adsorbiranih plinova te sloj prljavštine. Brušenje je provedeno na uređaju Presi, slika 36. Upali se na sklopku te se uključi ekran na kojem se podešavaju svi bitni parametri kako za brušenje tako i za poliranje. Brušenje aluminija zahtjevno je radi male tvrdoće materijala radi čega vrlo lako dolazi do utiskivanja zrna abraziva u površinu uzorka i nastanka brazdi koje mogu utjecati na točnost rezultata pri ispitivanju mikrotvrdoće stoga je potrebno optimalno podesiti parametre kako bi se priprema provela kvalitetno. Korišteni su brusni papiri granulacija P320, P600, P1200. Brusni papir se postavlja na nosač. Da bi papir prionuo na nosač, podloga papira, kao ni površina uređaja ne smiju biti mokre. Nakon što se postavi papir željene granulacije tada se na ekranu uređaja podešavaju parametri.

Brušenje uzoraka provedeno je brzinom 300 okretaja u minuti pri čemu se obavezno koristi ispiranje vodom kako ne bi došlo do zagrijavanja površine ali i radi ispiranja nečistoća i produkata brušenja. Uzorak se postavlja okomito na rotirajući papir uz lagani pritisak. Uzorke je potrebno pomicati lijevo-desno od ruba prema sredini rotirajućeg papira, slika 37. Na ekranu uređaja je moguće postaviti i vrijeme brušenja, te se nakon isteka vremena uređaj isključuje. Svaki je uzorak potrebno brusiti u dva smjera, u početnom smjeru brušenja te okomito na smjer brušenja. Prilikom brušenja potrebno je koristiti zaštitnu opremu koja se sastoji od rukavica te zaštitnih naočala.



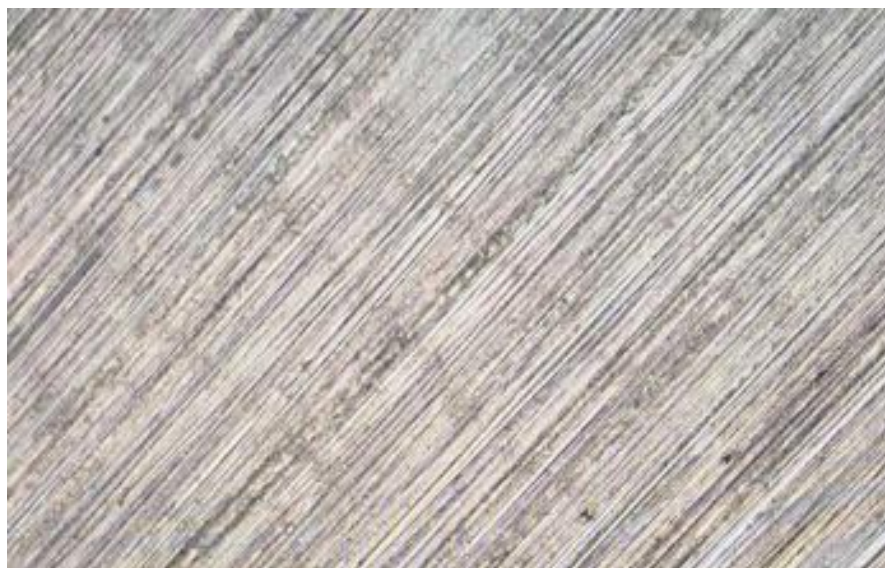
*Slika 36 - 'Presi' uređaj z a poliranje i brušenje*



*Slika 37 - Brušenje uzoraka*

Kod pripreme uzoraka vrlo je bitna čistoća stoga se, nakon brušenja u jednom smjeru, uzorak obavezno ispiru sapunicom te alkoholom, a nakon čega se uzorak suši. Potrebno je redovito ispirati i brusne ploče kako bi se ispirale odvojene čestice. Ploče se špricaju alkoholom te se ispiru pod mlazom vode.

Uzorci se najprije bruse brusnim papirom P320. Prvo se brusi u jednom smjeru 60 sekundi, odnosno dok se ne postigne površina na kojoj su sve brazde u istom smjeru, slika 38. Ukoliko je površina prošarana, slika 39, brušenje je potrebno ponoviti, nakon toga ide brušenje u smjeru okomitom na prethodni smjer. Brusi se 60 sekundi, odnosno dok se ne postigne površina gdje su sve brazde jednako usmjerene. Najbolje bi bilo taj postupak ponoviti 3 puta te se nakon toga prelazi na slijedeću granulaciju.



*Slika 38 - Prihvatljiva površina nakon brušenja*



*Slika 39 - Neprihvatljiva površina nakon brušenja*

Slijedi brušenje s P600 te P1200 brusnim papirom. Postupak brušenja je jednak kao i vrijeme te serije ponavljanja. Ponavljanjem koraka brušenja te smanjenjem granulacije abraziva brusnih papira, površina uzorka postaje zaglađena uz sve manje brazdi, slika 40. Do izražaja sve više dolaze nečistoće, poroznosti te usahline. I dalje je potrebno paziti na čistoću postupka.



*Slika 40 – Površina uzorka nakon brušenja s granulacijom P1200*

### **4.3. Poliranje**

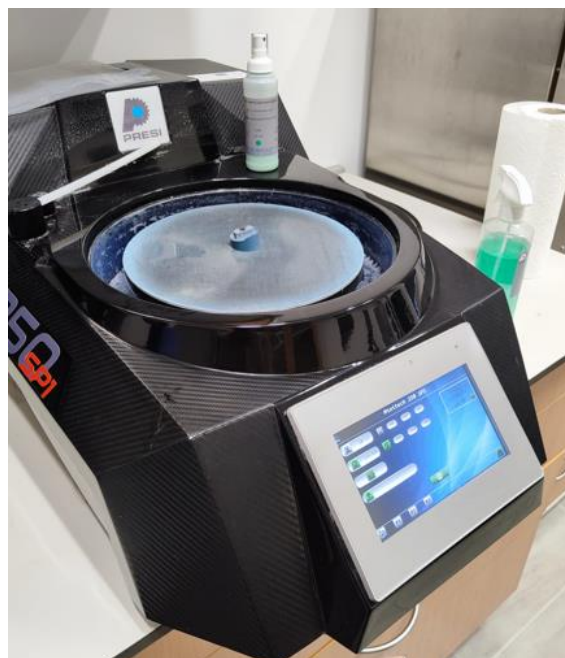
Nakon postupka brušenja slijedi postupak poliranja. Postupak poliranja se provodi na gotovo jednak način kao i brušenje. Kod poliranja se ne koristi voda te se smanjuje brzina okretanja ploče na 150 okretaja po minuti. Korištene su tkanine za poliranje na koje se nanosi dijamantna suspenzija različitih granulacija. Grubo poliranje odrađeno je s pločom granulacije 9  $\mu\text{m}$ , slika 41. Ploča se na jednak način postavlja na uređaj kao i kod brušenja samo se isključuje voda jer se ovdje koristi sprej za podmazivanje te dijamantni sprej granulacije uparene s pločom. Kod poliranja su provedena 2 seta od 60 sekundi sa svake strane, nakon toga se prelazilo na ploču manje granulacije. Poliranje se nastavlja s pločom granulacije 3  $\mu\text{m}$ , slika 42, nakon toga slijedi manja granulacija od 1  $\mu\text{m}$ , slika 43, te na kraju ploča granulacije 0,3  $\mu\text{m}$ , slika 44. Uzorke je potrebno ispirati vodom i sapunicom kako bi se isprala pasta za poliranje te ih je potrebno osušiti prije stavljanja na mikroskop. Ploče se tijekom poliranja ne ispiru, nego se špricaju sa dijamantnim sprejom određene granulacije.



Kako se prelazi na manju granulaciju tako nestaju brazde nastale brušenjem te se površina ujednačuje, na kraju se postiže zrcalna površina uzorka. Na dobro pripremljenoj površini će se jasno vidjeti mikrostruktura uzorka te svi njezini nedostaci. Nakon poliranja slijedi postupak razvijanja mikrostrukture nagrizanjem otopinom Keller.

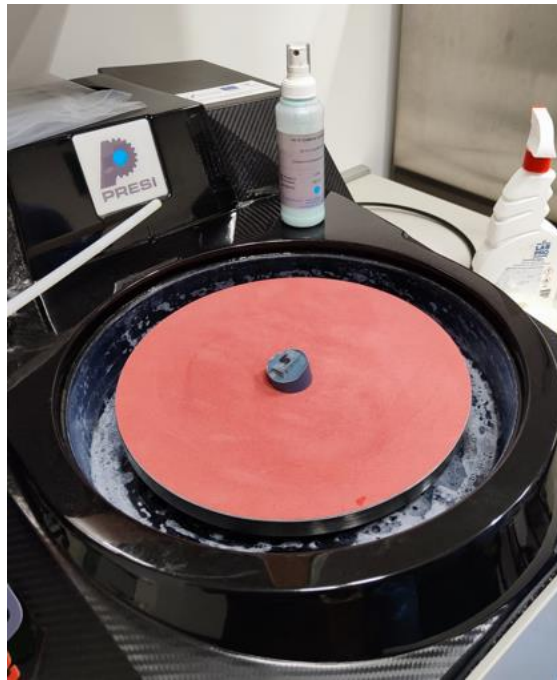


*Slika 41 - Poliranje s 9  $\mu\text{m}$*



*Slika 42 - Poliranje s 3  $\mu\text{m}$*



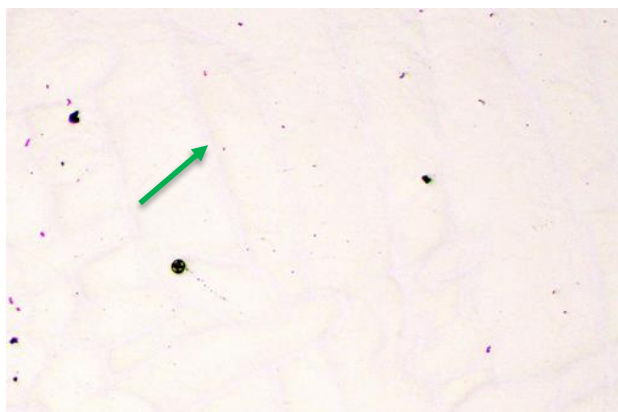


*Slika 43 - Poliranje s 1  $\mu$ m*

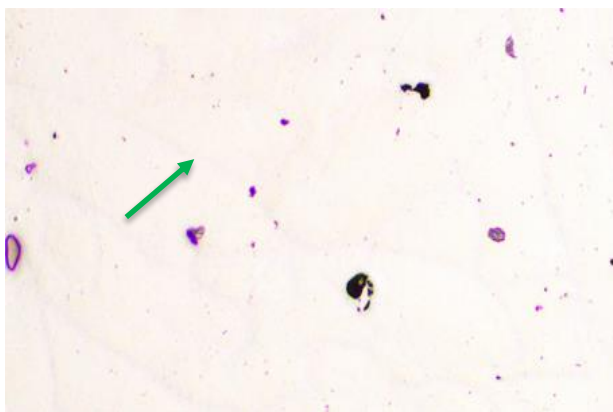


*Slika 44 - Poliranje s 0,3  $\mu$ m*

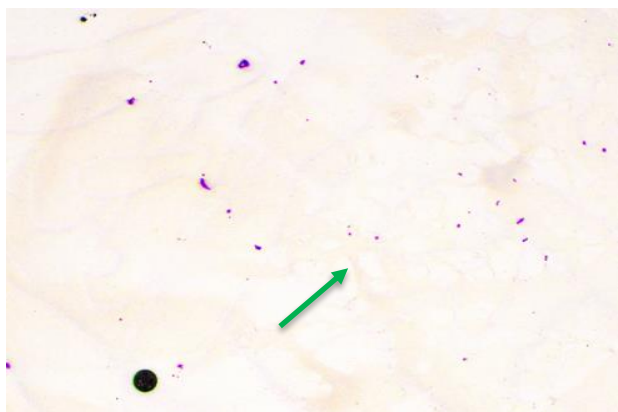
Na slici 45 prikazane su polirane površine 8 uzoraka.



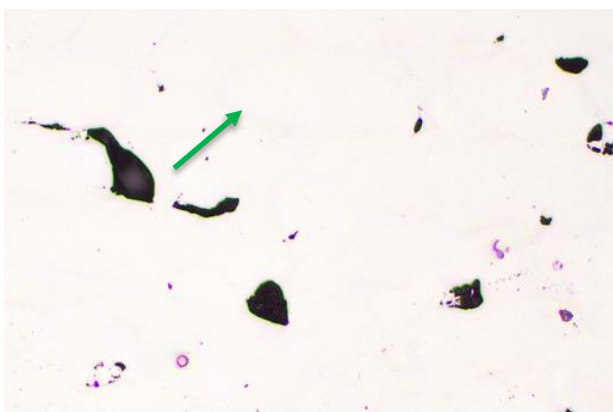
U1



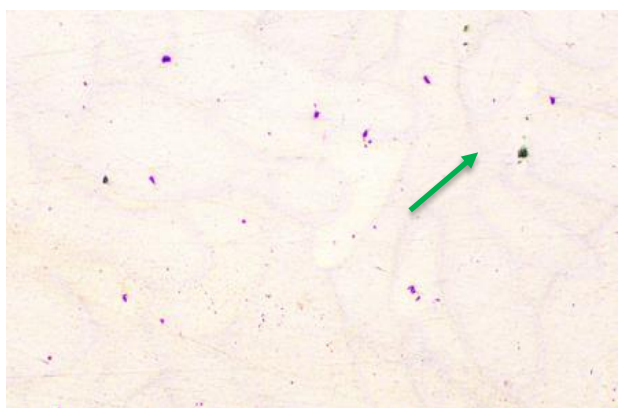
U2



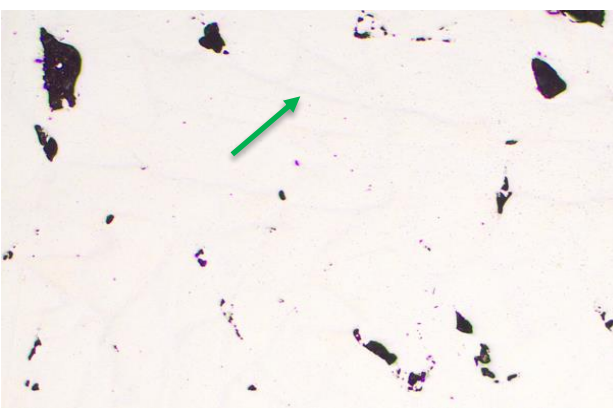
U3



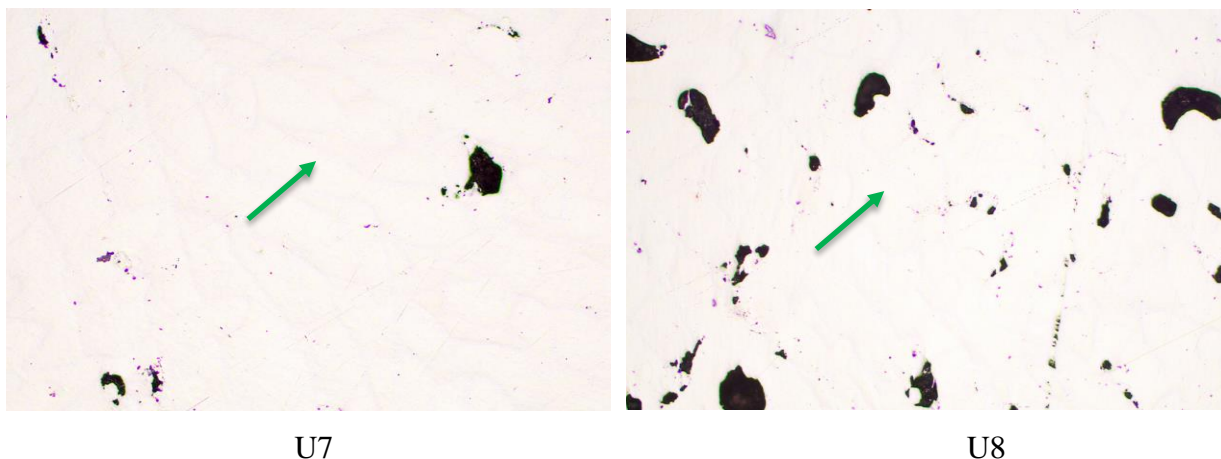
U4



U5



U6



*Slika 45-Prikaz poliranih površina na uzorcima*

Na površinama ispitnih uzoraka u poliranom stanju jasno su vidljive linije staljivanja označene zelenim strelicama. Kod svih uzoraka uočena je prisutnost poroziteta. Udio poroziteta se povećava kod uzoraka koji su građeni s manjom snagom lasera, porozitet u najvećoj mjeri raste kod uzoraka građeni s najmanjom gustoćom energije lasera pri čemu je najveći udio poroziteta uočen na uzorku 8. Izračun udjela poroziteta kod ispitanih uzoraka je proveden pomoću programa za analizu slike *Image J*. Da bi se ta analiza bila valjana, potrebno je najmanje 3 slike istog uzorka, na istom povećanju u poliranom stanju.

*Tablica 5 - Udio poroziteta kod ispitivanih uzoraka*

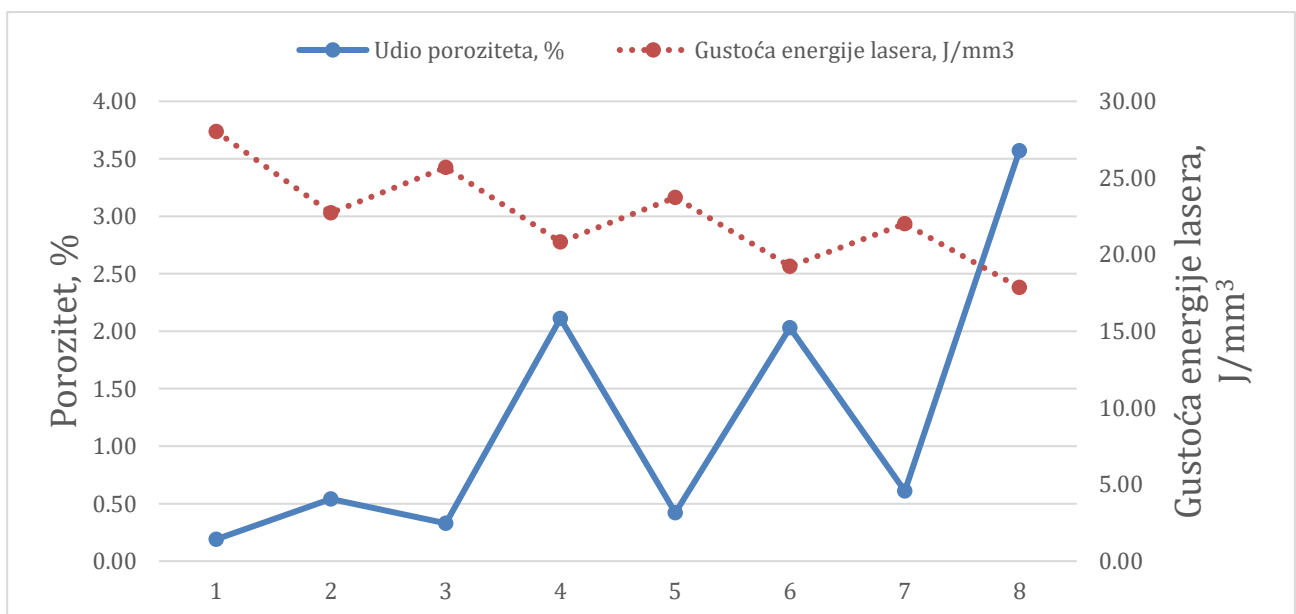
Oznaka uzorka	Udio poroziteta, %
U1	0.19
U2	0.54
U3	0.33
U4	2.11
U5	0.42
U6	2.03
U7	0.61
U8	3.57

Iz rezultata prikazanih u tablici 5 vidljivo je da je najmanji udio poroziteta postignut kod uzorka U1, a najveći kod uzorka U8. Da bi se dobile poveznice među parametrima i udjelom poroznosti, potrebno je napraviti usporednu tablicu koja podrobnije prikazuje ovisnost zadanih parametara

kod SLM postupka te rezultate dobivene istim, tablica 6. Pregledani prikaz rezultata je prikazan na slika 46.

Tablica 6 - Udio poroziteta u ovisnosti o parametrima SLM postupka

Oznaka	Brzina taljenja $v$ , mm/s	Snaga lasera $P$ , W	Gustoća energije lasera, $E$ , J/mm <sup>3</sup>	Udio poroziteta, %
U1	1100	370	28,03	0.19
U2	1100	300	22,73	0.54
U3	1200	370	25,69	0.33
U4	1200	300	20,83	2.11
U5	1300	370	23,72	0.42
U6	1300	300	19,23	2.03
U7	1400	370	22,02	0.61
U8	1400	300	17,85	3.57



Slika 46 - Grafički prikaz ovisnosti poroziteta o gustoći energije lasera

Dobiveni rezultati pokazali su da manja brzina i veća snaga lasera daju veću gustoću energije lasera, a time i manji udio poroznosti. Ukoliko brzina taljenja ostaje ista, a snaga lasera se smanjuje, gustoća energije lasera se smanjuje, a time raste udio poroznosti u uzorku. Budući da su korištena samo dva različita iznosa snage lasera, a četiri različita iznosa brzina, iznosi odabranih snaga lasera bolje odgovaraju manjim brzinama taljenja, jer te brzine daju veći iznos gustoće energije lasera, a time i manji udio poroznosti. Iz tablice je vidljivo da je najmanji udio poroziteta kod uzorka 1, a najveći kod uzorka 8 koji je građen velikom brzinom lasera uz manju snagu, pa je gustoća energije lasera mala, a udio poroznosti najveći.

Iz formule za izračun gustoće energije lasera se može vidjeti ovisnost snage lasera, brzine skeniranja te debljine sloja koji se tali. Uporabom niske snage lasera, visoke brzine skeniranja uz veće brzine taljenog sloja dolazi do nedovoljne gustoće energije lasera kod odabranog područja taljenja. Kod sve većih brzina te niskih snaga lasera nastaje nepovoljna količina taline koja dovodi do ograničenog kontakta površine taline te skrućenog sloja. Time nastaju preduvjeti za sferoidizaciju taline.

Ukoliko se koriste više snage lasera uz veće brzine skeniranja raste učinkovitost SLM postupka. Većim brzinama lasera se sve više smanjuju gubitci topline, dolazi do apsorpiranja energije laserskog zračenja u metalnom prahu, a to dovodi do boljeg procesa taljenja.

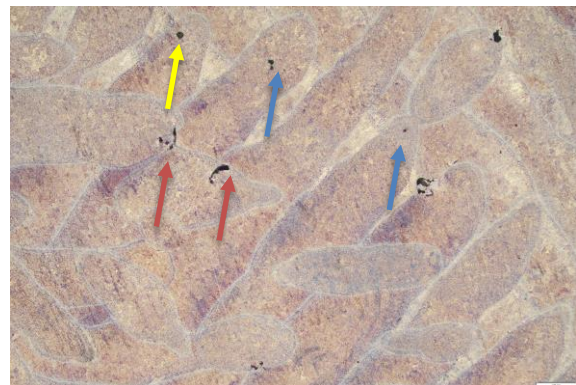
#### 4.4. Nagrizanje

Nakon poliranja slijedi postupak nagrizanja. Uzorci su nagrizani otopinom Keller koja se sastoji od 2,5 mL HNO<sub>3</sub>; 1,5 mL HCl; 1,0 mL HF i 95 mL deionizirane vode. Postupak nagrizanja se provodi radi razvijanja mikrostrukture.

Površina uzoraka nakon nagrizanja je prikazana na slika 47.

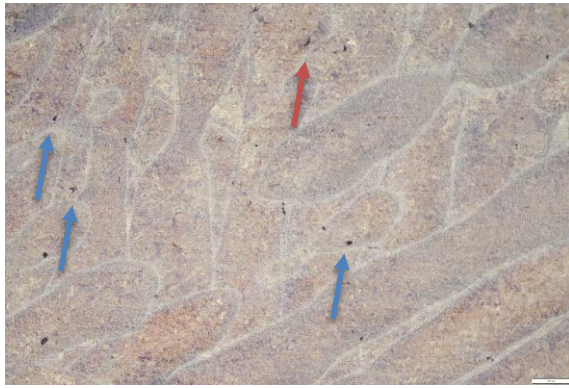


U1

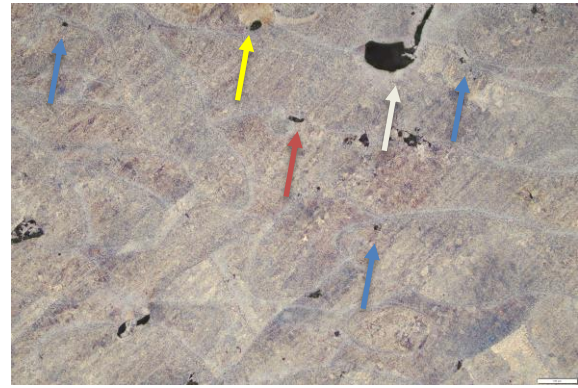


U2





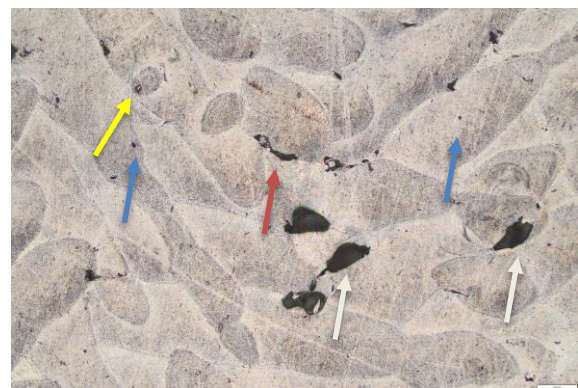
U3



U4



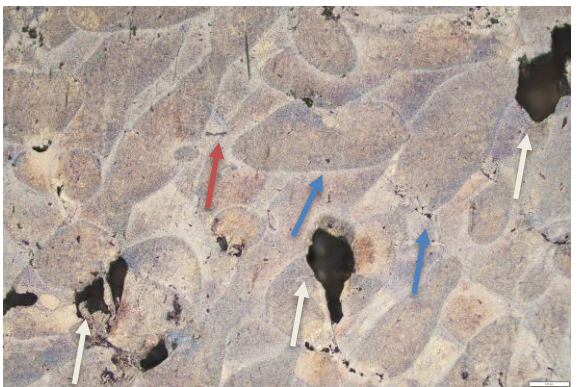
U5



U6



U7



U8

*Slika 47 - Prikaz površina nakon nagrizanja otopinom Keller*

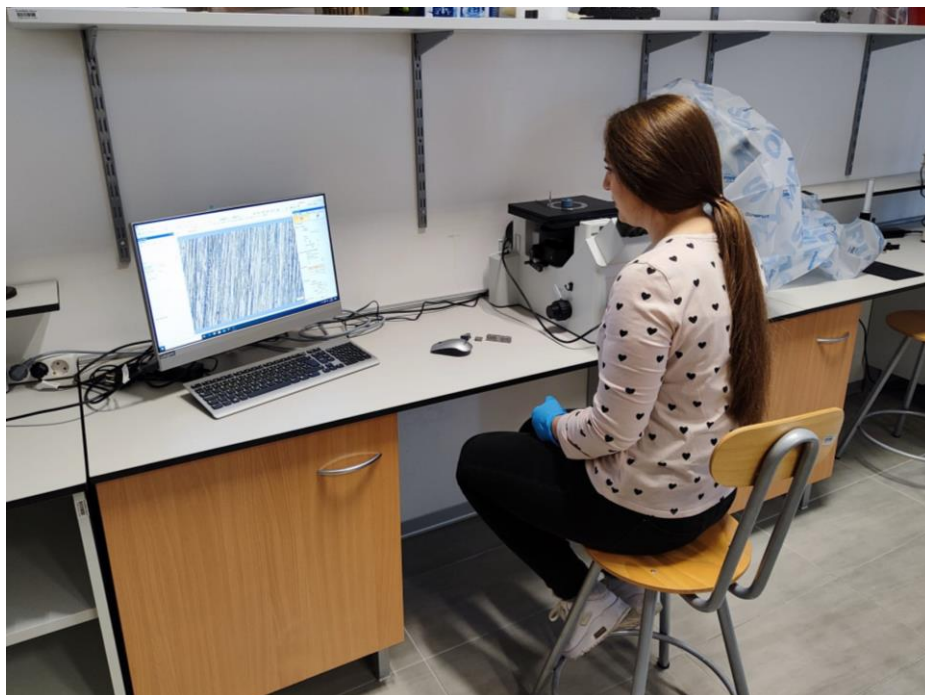
Mikrostruktura uzoraka je analizirana u smjeru osi z, odnosno u poprečnom smjeru s obzirom na smjer građenja uzoraka. Uzorci imaju trakastu morfologiju uz izražene linije staljivanja, lako se uočava i područje taljenja lasera u X i Y smjeru.

Analiza mikrostrukture se provodi na svjetlosnom mikroskopu marke Olympus GX53F-5, slika 48. koji sadrži DP23-CU mikro digitalnu kameru. Mikroskop je spojen na računalo. Za

analizu uzoraka potrebno je upaliti mikroskop te pokrenuti pripadajući program na računalu te uzorak postaviti na mikroskop. Na mikroskopu se na jednostavan način mijenjaju povećanja. Kada se površina uzorka postavi na svjetlosni mikroskop, na računalu se pojavi primjerena slika, slika 49. Uzorci moraju biti suhi, jer se inače ne dobije adekvatan rezultat uzorka. Mikrostruktura je analizirana u smjeru osi z, odnosno u poprečnom smjeru s obzirom na smjer građenja uzorka.



*Slika 48 - Svjetlosni mikroskop Olympus GX53F-5*



*Slika 49 - Analiza mikrostrukture na mikroskopu*

Kod svakog od ispitanih uzoraka je nađen porozitet u mikrostrukturi. Porozitet je nastao uslijed neadekvatno postavljenih parametara. Kod ovog istraživanja su korišteni parametri koji nisu preporučeni od strane EOS-a, nego su odabrani u svrhu ovog ispitivanja. Kao što je već rečeno, najveći udio poroziteta je prisutan kod U8, a nakon toga kod U4, a to je vidljivo na slikama nakon nagrizanja, a najmanji udio poroziteta je kod U1. Poroznosti su na slikama označivane plavim strelicama.

Osim poroznosti, na uzorcima je prisutno i nepotpuno staljivanje koje je na slikama označeno crvenim strelicama. Ukoliko nije unesena dovoljna količina energije u podlogu, ne postoji dovoljna količina energije koja bi otopila prah, pa se tako prah ne otopi ravnomjerno, pa ni prilikom skrućivanja nema popunjavanja cjelovitog volumena te zato nastaju područja nepotpunog staljivanja.

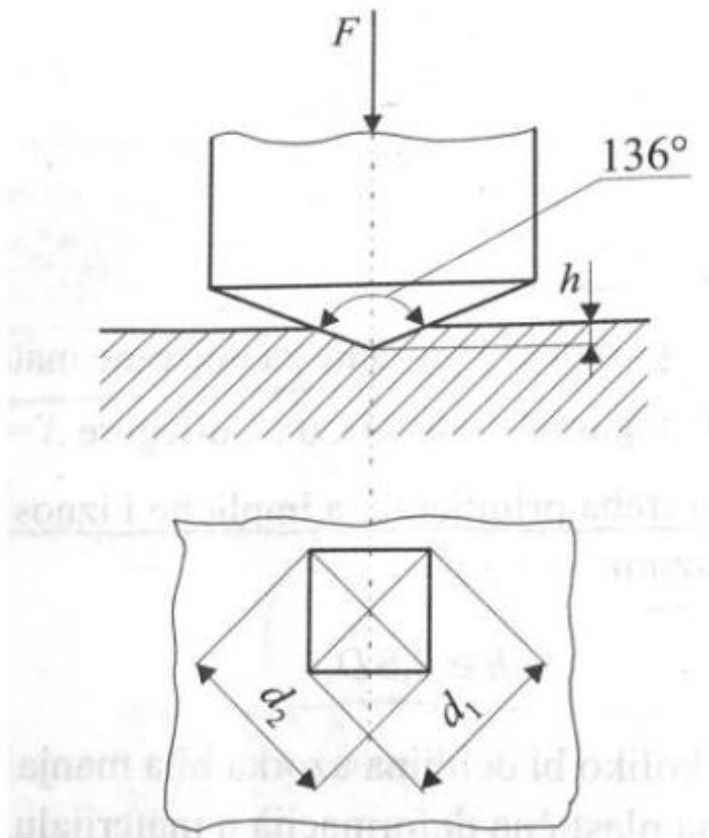
Bijelim strelicama su prikazane nepravilnosti, šupljine veće dimenzije koje nastaju zbog nedovoljne količine taline koja bi trebala popuniti prostor između slojeva taljenja. Sve te nepravilnosti nastaju uslijed nepravilno podešenih parametara. Što je manja gustoća energije lasera to je slabije taljenje praha, a ukoliko nema dovoljne količine energije koja bi otopila prah, ne može doći ni do formiranja slojeva bez poroznosti i ostalih nedostataka u mikrostrukturi. Najviše šupljina većih dimenzija je prisutno na U4, U6 i U8. Sferoidizacija je također prisutna te je označena žutim strelicama.



## 5. Ispitivanje mikrotvrdoće

### 5.1. Vickersova metoda ispitivanja

Vickers metoda je najčešće korištena metoda ispitivanja tvrdoće na uzorcima. Indentor kod ove metode je četverostrana dijamantna piramida s vršnim kutom od  $136^\circ$ , slika 50. Odabran je kut od  $136^\circ$  jer se utiskivanjem indentora s vršnim kutom ovog iznosa dobivaju vrijednosti tvrdoće neovisno o primijenjenoj sili. Nakon ispitivanja u materijalu ostaje otisak indentora – oblik prazne piramide. Za ovu metodu je potreban mjerni mikroskop kojim se mjere dijagonale  $d_1$  i  $d_2$ . Dijagonale su baza otiska piramide. Glavna prednost ove metode je svakako mjerenje tvrdoće vrlo tankih materijala s malim opterećenjima. [17]



Slika 50 - Vickersova metoda [19]

Tvrdoća po Vickersu je prikazana izrazom:

$$HV = \frac{F}{S}$$

$HV$  – izmjerena tvrdoća Vickers metodom

$F$  – primijenjena sila, N

$S$  – površina otiska, mm<sup>2</sup>

Potrebno je izmjeriti vrijednosti dijagonala  $d_1$  i  $d_2$ , odnosno bazu šuplje piramide otiska, nakon izmjerenih vrijednosti dijagonala, računa se njihova srednja vrijednost  $d$ :

$$d = \frac{(d_1 + d_2)}{2}$$

Ova jednadžba je potrebna slijedećoj jednadžbi:

$$HV = \frac{F \cdot 0,189}{S}$$

$F$  – primijenjena sila, N

$d$  – srednja vrijednost dijagonala baze otisnute piramide, mm

Iako je ova metoda otklonila gotovo sve nedostatke Brinell-ove metode, nedostatak Vickers-ove metode u odnosu na Brinell-ovu je to što je nužna fino brušena i polirana površina za mjerenje tvrdoće.

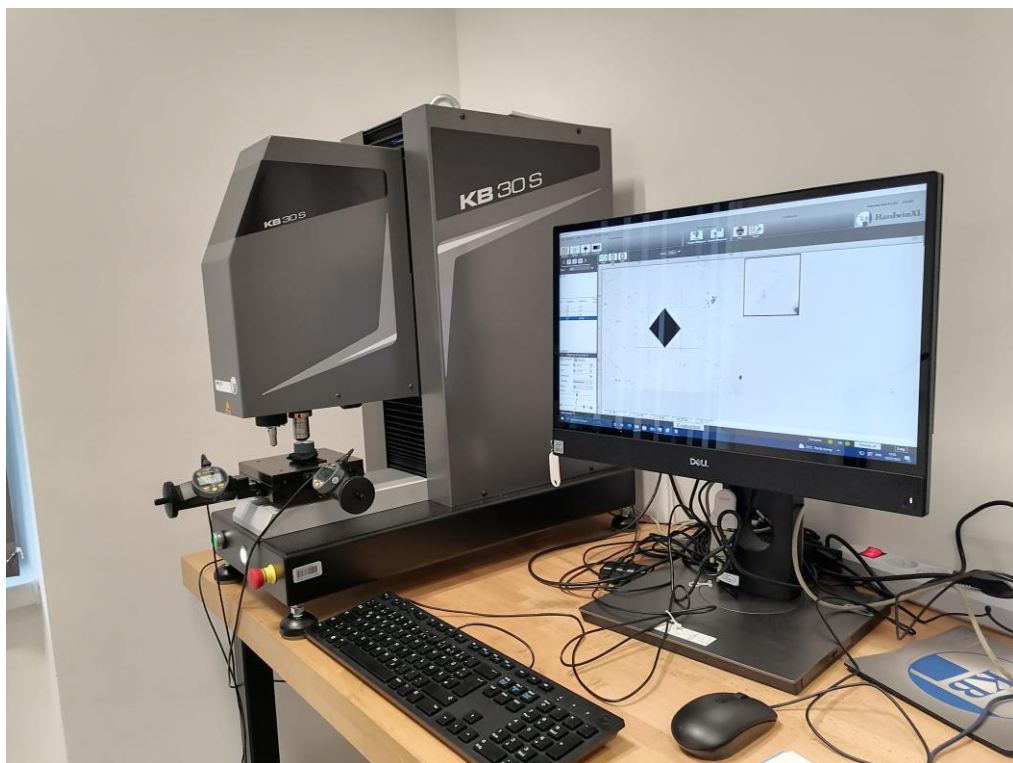
## 5.2. Postupak ispitivanja mikrotvrdoće

Postupak ispitivanja mikrotvrdoće kreće sa utiskivanjem uzorka u masu za niveliranje ispitnih uzoraka pomoću malene preše, slika 51. Uzorci su nepravilnog oblika jer masa za oblaganje nije potpuno ravna s uzorkom, a uz to, nakon brušenja uzorak može biti pod kutom zbog ručnog brušenja. Da bi se mogla mjeriti mikrotvrdoća na mikrotvrdmjeru te kako bi se dobio pouzdan rezultat, osigurava se ravna površinu uzorka na koju dolazi indentor. To se ostvaruje utiskivanjem uzorka u određenu debljinu mase za niveliranje. Nužno je paziti na čistoću polirane površine uzorka.



*Slika 51 - Preša za niveliranje uzorka*

Nakon osiguravanja ravne dodirne plohe uzorka, uzorak se stavlja na mikrotvrdomjer. Ispitivanje mikrotvrdoće je mjereno Vickersovom metodom na mikrotvrdomjeru KB 30 S, slika 52. Uzorci su ispitani opterećenjem utiskivanja mase od 100 g, 200 g i 1 kg.

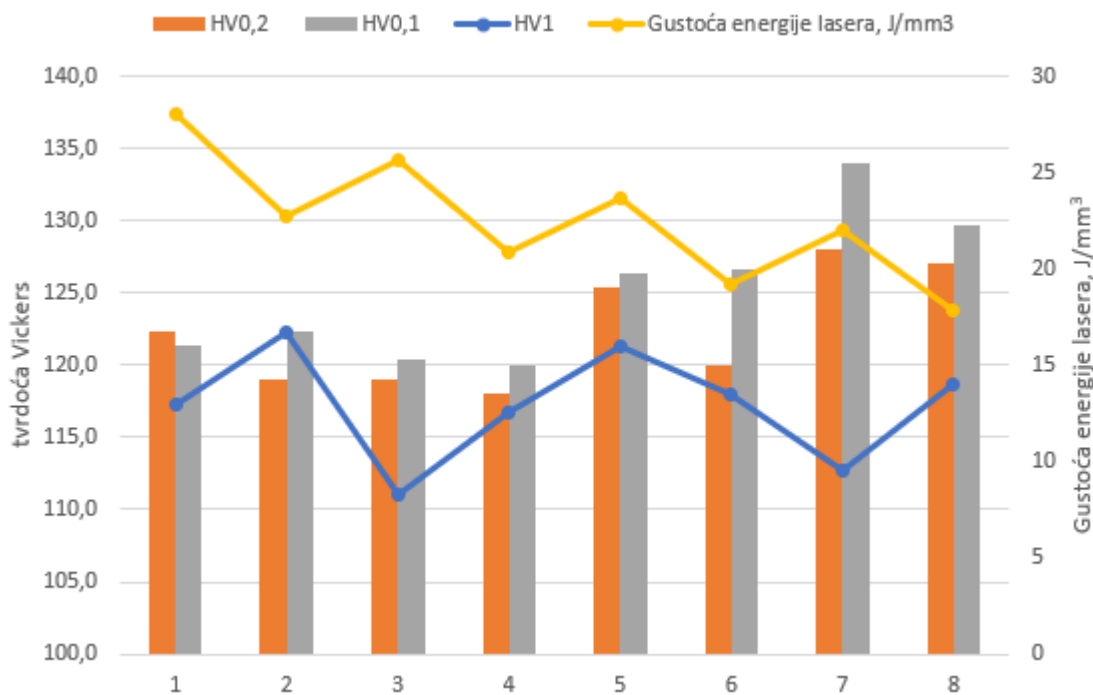


*Slika 52 - Mikrotvrdomjer*

Na svakom uzorku za svako opterećenje provedena su 3 ispitivanja. Iz dobivenih rezultata računa se prosječna vrijednost tvrdoće za svaki uzorak na svakom opterećenju. Prosječne vrijednosti rezultata dobivenih ispitivanjem mikrotvrdoće kod ispitnih uzoraka su prikazani u tablici 7 a grafički prikaz rezultata je na slici 53.

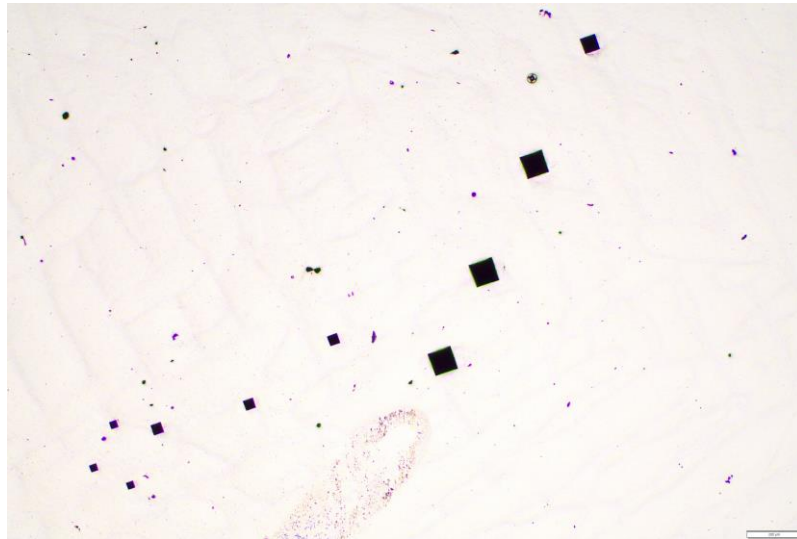
Tablica 7 – Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće

Oznaka	HV1	HV0,2	HV0,1	Gustoća energije lasera, J/mm <sup>3</sup>
U1	117,3	122,3	121,3	28,03
U2	122,3	119,0	122,3	22,73
U3	111,0	119,0	120,3	25,69
U4	116,7	118,0	120,0	20,83
U5	121,3	125,3	126,3	23,72
U6	118,0	120,0	126,7	19,23
U7	112,7	128,0	134,0	22,02
U8	118,7	127,0	129,7	17,85



Slika 53 - Mikrotvrdoća ispitanih uzoraka

Na temelju dobivenih rezultata se može zaključiti da smanjenjem gustoće lasera koja za posljedicu ima povećanje poroziteta u mikrostrukturi značajno se ne mijenja mikrotvrdoća uzoraka jer su izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće približno jednake te nisu vidljiva nikakva posebna odstupanja. Promjena promatranih parametara ne utječe na mikrotvrdoću kod uzoraka.



*Slika 54 - Otisak indentora na uzorku*

Na **Slika 53** je prikazan set otisaka indentora s obzirom na zadana opterećenja.

## 6. Zaključak

Aluminij se odlikuje izvrsnim svojstvima te se nalazi u širokoj primjeni u strojarскоj branši. Karakterizira ga mala gustoća, visoka specifična gustoća te otpornost na koroziju. Najviše se primjenjuje u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji za široki spektar komponenata. Iako je proizvodnja aluminija postupcima aditivne tehnologije izrazito zahtjevna zbog vrlo visoke toplinske vodljivosti, u današnje vrijeme proizvodnja aluminija aditivnim postupcima sve više dolazi do izražaja.

Legura aluminija koja se najviše koristi kod SLM postupka je AlSi10Mg legura. Ta se legura odlikuje dobrom električkom i toplinskom vodljivošću u odnosu na gustoću, otpornošću na koroziju, malom gustoćom... Ova legura se primjenjuje kod SLM postupka radi uskog raspona skrućivanja te nižeg koeficijenta toplinskog rastezanja naspram ostalih Al legura. Upravo iz tog razloga dolazi do smanjenja zaostalih naprezanja te poboljšanja dimenzijske točnosti kao i mehaničkih svojstava.

Selektivno lasersko taljenje jedna je od najviše primjenjivanih aditivnih tehnologija u današnje vrijeme. Omogućena je izrada uzoraka direktno iz CAD modela. Laserska zraka tali sloj praha prema modelu iz programa. Osim za izradu komada kompliciranih geometrija, ovaj se postupak primjenjuje za jednostavnije oblike kod reparaturnih procesa. Ukoliko se izrađuje kompliciran pojedinačan proizvod, ovaj postupak je unatoč dugim vremenima izrade isplativ jer konvencionalni postupci izrade u većini slučajeva zahtijevaju više koraka obrade. Postoje i proizvodi koje je gotovo nemoguće izraditi konvencionalnim postupcima te se oni izrađuju nekim od postupaka aditivne proizvodnje.

Na kraju ovog rada se može zaključiti da se promjena parametara kod SLM postupka ima značajan utjecaj na mikrostrukturu, odnosno na pojavu grešaka i poroziteta u mikrostrukturi. Ovaj rad se temelji na utvrđivanju promjene mikrostrukture i mikrotvrdoće kod promjene snage i brzine lasera uz jednaku debljinu sloja te uz jednak razmak putanje lasera prilikom taljenja. Dobiveni rezultati u sklopu ovog diplomskog rada pokazali su da smanjenjem iznosa gustoće energije lasera raste udio poroziteta u mikrostrukturi uzoraka. Kombinacija parametara se najbolje može uskladiti preko formule za gustoću energije lasera iz koje je vidljivo da ukoliko se poveća snaga, a smanji brzina lasera uz konstantnu debljinu sloja praha i razmak između putanje laserske zrake pri taljenju dolazi do većeg iznosa gustoće energije lasera, a time se smanjuje udio poroznosti u mikrostrukturi. Najveći udio poroznosti je uočen kod uzoraka U4 i U8 zbog povećanja brzine taljenja uz najmanji iznos zadane snage, te se po formuli dobije najmanji iznos gustoće energije lasera pa je i udio poroznosti prema tome najveći. Ukoliko je jednako povećanje brzine i snage lasera, održava se dovoljna količina gustoće energije lasera te nastaje manje poroznosti. Potrebno

je optimirati parametre ukoliko želimo postići optimalne uvjete ispisa. Promjena parametara nije značajnije utjecala na iznos mikrotvrdoće kod promatranih uzoraka.

Široku primjenu SLM postupka opravdavaju pozitivna svojstva dobivenih uzoraka te brzina izrade kompliciranih komada. Postupcima aditivnih tehnologija je omogućena brza i jednostavna izrada složenih geometrija. Ukoliko se postave optimalni parametri, dobit će se uzorci odličnih svojstava koja zadovoljavaju primjenu u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji. Kombinacije parametara je moguće provjeriti preko formule za gustoću energije lasera jer ona direktno povezuje snagu lasera, brzinu lasera, razmak između putanje laserske zrake pri taljenju te debljinu sloja taljenja.

## 7. Literatura

- [1] Limbasiya N., Jain A., Soni H., Wankhede V., Krolczyk G., Sahlot P. (2022.): A comprehensive review on the effect of process parameters and post-process treatments on microstructure and mechanical properties of selective laser melting of AlSi10Mg, Journal of materials research and technology 2022.
- [2] Buchbinder D., Schleifenbaum H., Heidrich S., Meiners W. Bültmann J.(2011): High Power Selective Laser Melting of Aluminum Parts, Science Direct
- [3] Šolić S., Dolić N., Tropša V. (2021): Utjecaj temperature žarenja na mikrostrukturu i tvrdoću AlSi10Mg dijelova proizvedenih SLM aditivnim postupkom, International conference on materials
- [4]<https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=0CDgQw7AJahcKEwi4nMmNityAAxUAAAAAHQAAAAAQAw&url=https%3A%2F%2Fzir.nsk.hr%2Fislandora%2Fobject%2Fpolitehnikapu%3A138%2Fdatastream%2FPDF%2Fdownload&psig=AOvVaw087ggEpNmgv7ueRB-Rfx2M&ust=1692100061803291&opi=89978449> (14.05.2023.)
- [5] Lachmayer, R., Zghair, Y., Klose, C., Nürnberger, F. (2016) INTRODUCING SELECTIVE LASER MELTING TO MANUFACTURE MACHINE ELEMENTS. INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE - DESIGN 2016. Dubrovnik.
- [6]<https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A8733/datastream/PDF/view> (14.04.2023.)
- [7] Sabzi HE, Rivera-Dí'az-del-Castillo PEJ. Defect prevention in selective laser melting components: compositional and process effects. Materials (Basel) 2019;12.  
<https://doi.org/10.3390/ma12223791>.
- [8] <https://repositorij.unin.hr/islandora/object/unin%3A4601/datastream/PDF/view> (25.08.2023.)
- [9] <https://dr.nsk.hr/en/islandora/object/fsb%3A9493/datastream/PDF/view> (25.08.2023.)
- [10] Alghamdi F., 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
- [11][https://www.researchgate.net/publication/279252555\\_The\\_role\\_of\\_powder\\_properties\\_on\\_the\\_processability\\_of\\_Aluminium\\_alloys\\_in\\_selective\\_laser\\_melting](https://www.researchgate.net/publication/279252555_The_role_of_powder_properties_on_the_processability_of_Aluminium_alloys_in_selective_laser_melting) (17.05.2023.)
- [12] <http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-67-2015-11-3-1395.pdf> (24.08.2023.)
- [13][https://www.eos.info/03\\_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/material\\_datasheet\\_eos\\_aluminium-alsi10mg\\_en\\_web.pdf](https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/material_datasheet_eos_aluminium-alsi10mg_en_web.pdf) (15.04.2023.)



- [15] Sakač I., Šolić S., Šercer M., Tropša V. (2023): Mikrostrukturne promjene AlSi10Mg u ovisnosti o parametrima LPBF postupka, Matrib konferencija 2023.
- [16] Slokar Lj. (2015.): Metalurgija praha i sinter materijali, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet
- [17] <https://na.eos.info/pdf/m290.pdf> (15.04.2023)
- [18] <https://repozitorij.unin.hr/islandora/object/unin%3A3316/datastream/PDF/view> (18.06.2023.)
- [19] <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb:7846> (18.06.2023.)

## Popis slika

Slika 1 - Područje primjene aditivne proizvodnje [1].....	1
Slika 2 - Taljenje praha kod SLM postupka [1] .....	3
Slika 3 - Podjela na slojeve prilikom proizvodnje [2] .....	4
Slika 4 - Broj istraživanja tijekom godina [1] .....	5
Slika 5 - SLM postupak [6] .....	6
Slika 6 - Usporedba konvencionalne i aditivne proizvodnje. [8] .....	6
Slika 7 – Apsorbancija metala [9] .....	8
Slika 8 – Apsorbancija kod čestice metalnog praha [9] .....	9
Slika 9 - Proces nastanka ballinga [9] .....	11
Slika 10 – Balling [7].....	12
Slika 11 – Greške u mikrostrukturi tipa „Keyhole“ [7].....	12
Slika 12 – Prah AlSi10Mg na SEM-u [13].....	14
Slika 13 - Shematski prikaz glavnih parametara SLM postupka [9].....	15
Slika 14 – Shematski prikaz SLM postupka [9] .....	17
Slika 15 – Raslojavanje [9].....	18
Slika 16 – Uređaj EOS M 290 .....	19
Slika 17 - Prikaz rasporeda komada na radnoj ploči .....	20
Slika 18-Metalni prah AlSi10Mg .....	21
Slika 19 - Oblik ispitnog uzorka.....	22
Slika 20 - EOSPRINT program .....	23
Slika 21 - Punjenje spremnika prahom .....	24
Slika 22 - Prikaz spuštenih kliznih ploča.....	24
Slika 23 - Prvi prolaz lasera.....	25
<i>Slika 24 - Taljenje praha laserom .....</i>	<i>25</i>
Slika 25 - Prikaz podijele na slojeve .....	26
Slika 26 - Proizvodi prekriveni prahom .....	27
Slika 27 - Prosijavanje praha .....	27
Slika 28 - Očišćeni uzorci.....	28
Slika 29 - Tračna pila za metal CY210A, Farrox .....	28
Slika 30 - Odvajanje komada pilom .....	29
Slika 31 - Označavanje uzoraka .....	29
Slika 32 - Pripremanje polimerne mase.....	30
Slika 33 - Zalijevanje uzoraka polimernom masom .....	31

Slika 34 - Označavanje uzoraka markerom .....	31
Slika 35 - Čuvanje uzoraka u laboratorijskom eksikatoru.....	32
Slika 36 - 'Presi' uređaj z a poliranje i brušenje .....	33
Slika 37 - Brušenje uzoraka.....	33
Slika 38 - Prihvatljiva površina nakon brušenja .....	34
Slika 39 - Neprihvatljiva površina nakon brušenja .....	34
Slika 40 - Brušenje s P1200.....	35
Slika 41 - Poliranje s 9 $\mu\text{m}$ .....	36
Slika 42 - Poliranje s 3 $\mu\text{m}$ .....	36
Slika 43 - Poliranje s 1 $\mu\text{m}$ .....	37
Slika 44 - Poliranje s 0,3 $\mu\text{m}$ .....	37
Slika 45-Prikaz poliranih površina na uzorcima.....	39
Slika 46 - Grafički prikaz ovisnosti poroziteta o gustoći energije lasera .....	40
Slika 47 - Prikaz površina nakon nagrizanja otopinom Keller .....	42
Slika 48 - Svjetlosni mikroskop Olympus GX53F-5.....	43
Slika 49 - Analiza mikrostrukture na mikroskopu.....	43
Slika 50 - Vickersova metoda [18] .....	45
Slika 51 - Preša za niveliranje uzorka .....	47
Slika 52 - Mikrotvrdomjer .....	47
Slika 53 - Mikrotvrdoća ispitanih uzoraka .....	48
Slika 54 - Otisak indentora na uzorku .....	49

## Popis tablica

Tablica 1 – Parametri SLM postupka [9] .....	7
Tablica 2 - Utjecajni parametri s oznakama [1] .....	15
Tablica 3 - Kemijski sastav metalnog praha [13] .....	21
Tablica 4 - Parametri izrade uzoraka .....	22
Tablica 5 - Udio poroziteta kod ispitivanih uzoraka .....	39
Tablica 6 - Udio poroziteta u ovisnosti o parametrima SLM postupka.....	40
Tablica 7 – Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće.....	48

## Prilozi

- Karakteristike stroja – EOS M 290



- radni volumen ( ŠxDxV ): 250 mm x 250 mm x 325 mm
- vrsta lasera: Yb fibre laser 400 W
- brzina laserske zrake u prolazu: 7 m/s
- promjer fokusa: 100  $\mu\text{m}$
- **debljina sloja gradnje** u smjeru Z osi:
  - za aluminij AlSi10Mg 30  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$
  - za alatni čelik MS1 20  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$
  - za nehrđajući čelik 316L 40  $\mu\text{m}$

- Upute za pokretanje ispisa

#### UPUTE ZA POKRETANJE ISPISA

1	Upaliti kompresor	
2	Otvoriti ventil komprimiranog zraka	
3	Uključiti EOS M290	
4	Pritisnuti plavi gumb (kad počne treperiti)	
5	Ulogirati se (Supervisor)	
6	Uključiti grijanje radne ploče	
7	Uključiti pripremu atmosfere u komori filtera	
8	Montirati radnu ploču (Pritegnuti moment ključem)	
9	Montirati odgovarajući nož/četkice za nanošenje materijala	
10	Provjeriti temperaturu radne ploče (40C)	
11	Grubo nivelirati radnu ploču pomoću mjerača s brojčanikom	
12	Fino nivelirati radnu ploču pomoću etalona	
13	Napuniti okno za doziranje materijalom i poravnati	
14	Obrisati radnu ploču	
15	Ručno nanijeti početni sloj materijala	
16	Postaviti prelijevnu platformu na odgovarajuću visinu	
17	Montirati usisnu mlaznicu	
18	Usisati prašinu sa senzora u gornjem desnom kutu	
19	Obrisati leću lasera	
20	Zatvoriti vrata stroja	
21	Pokrenuti radni proces	

- Rezultati dobiveni mjerenjem mikrotvrdoće

Ispitivanje mikrotvrdoće			Prosjek	Gustoća energije lasera, J/mm <sup>3</sup>
U1	HV1	121	117,3	28,03
		113		
		118		
	HV0,2	124	122,3	
		125		
		118		
	HV0,1	124	121,3	
		121		
		119		
U2	HV1	125	122,3	22,73
		120		
		122		
	HV0,2	122	119,0	
		129		
		106		
	HV0,1	126	122,3	
		128		
		113		
U3	HV1	109	111,0	25,69
		113		
		111		
	HV0,2	121	119,0	
		116		
		120		
	HV0,1	118	120,3	
		118		
		125		
U4	HV1	112	116,7	20,83
		122		
		116		
	HV0,2	117	118,0	
		122		
		115		
	HV0,1	120	120,0	
		119		
		121		

U5	HV1	121	121,3	23,73
		122		
		121		
	HV0,2	119	125,3	
		132		
		125		
	HV0,1	131	126,3	
		125		
		123		
U6	HV1	115	118,0	19,23
		120		
		119		
	HV0,2	123	120,0	
		115		
		122		
	HV0,1	125	126,7	
		130		
		125		
U7	HV1	112	112,7	22,02
		123		
		103		
	HV0,2	129	128,0	
		131		
		124		
	HV0,1	131	134,0	
		135		
		136		
U8	HV1	126	118,7	17,05
		105		
		125		
	HV0,2	124	127,0	
		129		
		128		
	HV0,1	128	129,7	
		130		
		131		