

Selektivno lasersko srašćivanje i taljenje metala

Fraj-Sladoljev, Roman

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:541719>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Roman Fraj-Sladoljev

Zagreb, 2022. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Roman Fraj-Sladoljev

Zagreb, 2022. godina.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović što je bila uvijek dostupna i pristupačna te utrošila vrijeme, trud i strpljenje prilikom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem se asistentu Mislavu Tujmeru na izradi CAD modela te upoznavanju sa softverom.

Zahvaljujem se Metalskoj jezgri Čakovec na suradnji te posebno Dr. Marini Grabar Branilović na ukazanoj pomoći.

Zahvaljujem se ADR Test sistemima i vlasniku Siniši Mirkoviću što su omogućili eksperimentalno ispitivanje ovog rada.

Zahvaljujem se Dori što me bezuvjetno podržava u svemu što naumim.

Za kraj se posebno zahvaljujem obitelji na podršci tijekom studiranja, te im napokon mogu i dokazati da ne idem na filozofski.

Roman Fraj-Sladoljev



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
 materijala i mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Roman Fraj-Sladoljev** JMBAG: **0035217158**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Selektivno lasersko srašćivanje i taljenje metala**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Selective laser sintering and melting of metals**

Opis zadatka:

Selektivno lasersko srašćivanje i selektivno lasersko taljenje metala spadaju u aditivnu proizvodnju u skupinu postupaka poznatih pod nazivom spajanje praha u komori (eng. *powder bed fusion*). Ti postupci služe za dobivanje komplicirane geometrije u kratkom vremenu koju je često vrlo teško ili nemoguće izraditi klasičnim postupcima prerade i obrade metala.

U radu je potrebno opisati oba dva postupka, materijale koji se primjenjuju, primjenu, te sve parametre prerade koji mogu utjecati na geometrijsku stabilnost i mehanička svojstva gotove tvorevine.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
 2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
 3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
 2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
 3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	II
POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	II
POPIS OZNAKA	III
POPIS KRATICA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
2. POSTUPCI 3D TISKANJA METALA	2
2.1. Postupak spajanjem praha u komori (eng. Powder Bed Fusion - PBF)	2
2.1.1. Primjena	3
2.1.2. Selektivno lasersko srašćivanje (eng. Selective Laser Sintering - SLS)	6
2.1.3. Selektivno lasersko taljenje (eng. Selective Laser Melting - SLM)	6
2.1.4. Taljenje elektronskim snopom (eng. Electron Beam Melting - EBM)	7
2.2. Spajanje metalnog praha vezivom (eng. Metal Binder Jetting - MBJ)	7
2.3. Izravno taloženje (eng. Direct Energy Deposition - DED)	11
2.4. Ekstrudiranje metalnih materijala (eng. Metal Material Extrusion - MME)	13
2.5. Ostali postupci	15
2.5.1. Joule tiskanje	15
2.5.2. Aditivna proizvodnja kapljevitim metalom (eng. Liquid Metal Additive Manufacturing)	15
2.5.3. Elektrokemijska aditivna proizvodnja (eng. Electrochemical Additive Manufacturing - ECAM)	15
2.5.4. DLP tiskanje metala (eng. Digital Light Processing metal printing)	15
2.5.5. Tiskanje metala hladnim štrcanjem (eng. Cold Spray Metal Printing)	16
2.5.6. Ultrazvučna konsolidacija	16
2.5.7. LENS	16
2.5.8. Slobodno oblikovanje elektronskim snopom (eng. Electron Beam Freeform Fabrication – EBF3)	16
3. SELEKTIVNO LASERSKO SRAŠĆIVANJE I TALJENJE METALA	17
3.1. Materijali	17
3.1.1. Proizvodnja metalnog praha	18
3.1.1.1. Plinska atomizacija	18
3.1.1.2. Atomizacija plazmom	19
3.2. Primjena postupaka SLS i SLM	20
3.3. Parametri prerade kod postupaka SLS i SLM	20
3.3.1. Snaga i vrsta lasera	21
3.3.2. Brzina skeniranja	21
3.3.3. Razmak između putanje laserske zrake (eng. hatch distance)	22
3.3.4. Visina sloja	23
3.3.5. Strategija skeniranja	24
3.3.6. Temperatura komore	27

3.3.7. Gustoća energije	27
3.4. Pojave pri preradi.....	28
3.4.1. Oksidacija	28
3.4.1.1. Kuglanje (eng. Balling)	28
3.5. Svojstva tvorevina.....	31
3.5.1. Kvaliteta površine.....	31
3.5.2. Čvrstoća	31
3.5.3. Gustoća	33
3.5.4. Zaostala naprezanja	35
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	37
4.1. Parametri izrade te svojstva materijala	37
4.2. Ispitivanje	42
5. ZAKLJUČAK	45
LITERATURA	46
PRILOZI	55

POPIS SLIKA

Slika 2.1.	Faze postupka spajanjem praha u komori [2]	2
Slika 2.2.	Implantat za lubanju izrađen od titanijeve legure postupkom EBM [4]	4
Slika 2.3.	Mlaznica za gorivo na motoru <i>GE9X Boeinga 777X</i> [6]	5
Slika 2.4.	3D turbopunjač super-automobila One:1 tvrtke Koenigsegg [7]	5
Slika 2.5.	Usporedba strukture tvorevine: a) postupak SLS, b) postupak SLM [9]	6
Slika 2.6.	Glava MBJ stroja s mlaznicama [14]	8
Slika 2.7.	Faze postupka MBJ [14]	9
Slika 2.8.	<i>Digital Metal</i> MBJ stroj s visokom rezolucijom [15]	9
Slika 2.9.	Industrijska podtlačna peć za srašćivanje [15]	10
Slika 2.10.	Pozicioniranje pomoću višeosnog okretnog stola [18]	11
Slika 2.11.	Struktura i svojstva običnih kompozitnih materijala u usporedbi s funkcionalno gradiranim materijalima [19]	12
Slika 2.12.	Postupak MME [20]	13
Slika 3.1.	Plinska atomizacija [30]	19
Slika 3.2.	Atomizacija plazmom [33]	20
Slika 3.3.	Utjecaj brzine skeniranja na kvalitetu površine: a) manja brzina skeniranja, b) veća brzina skeniranja [42]	22
Slika 3.4.	Raspodjela temperature u laserskoj zruci [36]	23
Slika 3.5.	Preklapanje pri prolazima [36]	23
Slika 3.6.	Shema različitih strategija skeniranja: a) jednosmjerno skeniranje, b) dvosmjerno skeniranje/cik-cak skeniranje, c) otočno skeniranje, d) varijacija sekvencijalnog skeniranja temeljenog na jednosmjernom skeniranju, e) varijacija sekvencijalnog skeniranja temeljenog na dvosmjernom skeniranju, f) heliks skeniranje, g) konturno skeniranje, h) dvosmjerno skeniranje s duplim prolazom, i) dvosmjerno skeniranje s duplim prolazom i zakretanjem vektora prolaza za 90° između slojeva, j) križno skeniranje, k) dvosmjerno skeniranje s jednim prolazom i zakretanjem vektora prolaza za 90° između slojeva, l) jednosmjerno skeniranje sa zakretanjem vektora prolaza za 90° između slojeva, m) dvosmjerno skeniranje sa zakretanjem vektora prolaza za 45° između slojeva, n) točkasto skeniranje [54]	25
Slika 3.7.	Vlaženje prethodnog sloja: a) adekvatno i b) neadekvatno [68]	29
Slika 3.8.	Blokiranje ponovnog nanosa praha kao posljedica kuglanja [69]	30
Slika 3.9.	Formiranje zaostalih naprezanja zbog zagrijavanja i širenja te posljedičnog hlađenja i skupljanja [69]	35
Slika 3.10.	Raspodjela naprezanja po presjeku [35]	36
Slika 3.11.	Pukotine i delaminacija nastali uslijed zaostalih naprezanja [69]	36
Slika 4.1.	3D CAD model	37
Slika 4.2.	“NoPattern“ strategija skeniranja [101]	38
Slika 4.3.	“Stripes“ strategija skeniranja [101]	38
Slika 4.4.	Izrađena tvorevina	39
Slika 4.5.	Tijek ispitivanja	43
Slika 4.6.	Dijagram pritiska – pomak: a) krivulje srednjih vrijednosti pojedine skupine; b) sva ispitna tijela	44

POPIS TABLICA

Tablica 3.3.1.	Čvrstoće najrasprostranjenijih metala u postupku SLM te njihove legure [31, 37, 70, 72-83].....	32
Tablica 4.1.	Parametri prerade	40
Tablica 4.2.	Svojstva AlSi10Mg prema proizvođaču metalnog praha Heraeus [100]	40
Tablica 4.3.	Kemijski sastav AlSi10Mg prema proizvođaču metalnog praha Heraeus [100]	41
Tablica 4.4.	Srednja vrijednost izmjerenih dimenzija tvorevina.....	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ED	J/mm^3	gustoća energije
h	mm	visina sloja
l	mm	razmak između prolaza
L_0	mm	početna visina
P	W	snaga lasera
v	mm/s	brzina skeniranja
v_t	s^{-1}	brzina ispitivanja
v_d	mm/s	brzina deformacije
\bar{x}		aritmetička sredina

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
DMLS	izravno srašćivanje metala s pomoću lasera (eng. <i>Direct Metal Laser Sintering</i>)
DED	izravno taloženje (eng. <i>Direct Energy Deposition</i>)
DLP	3D tisak digitalnim procesuiranjem svjetla (eng. <i>Digital Light Processing metal printing</i>)
EBM	taljenje elektronskim snopom (eng. <i>Electron Beam Melting</i>)
ECAM	elektrokemijska aditivna proizvodnja (eng. <i>Electrochemical Additive Manufacturing</i>)
EBF3	slobodno oblikovanje elektronskim snopom (eng. <i>Electron Beam Freeform Fabrication</i>)
FDM	taložno očvršćivanje (eng. <i>Fused Deposition Modeling</i>)
MBJ	spajanje metalnog praha vezivom (eng. <i>Metal Binder Jetting</i>)
MME	ekstrudiranje metalnih materijala (eng. <i>Metal Material Extrusion</i>)
NASA	Nacionalna aeronautička i svemirska administracija (eng. <i>National Aeronautics and Space Administration</i>)
PBF	postupak spajanjem praha u komori (eng. <i>Powder Bed Fusion</i>)
SLS	selektivno lasersko srašćivanje (eng. <i>Selective Laser Sintering</i>)
SLM	selektivno lasersko taljenje (eng. <i>Selective Laser Melting</i>)

SAŽETAK

U okviru ovog završnog rada, uz osnove najraširenijih postupaka 3D tiskanja metala, pobliže su obrađeni postupci selektivnog laserskog srašćivanja te selektivnog laserskog taljenja. Zbog širokog opsega koji parametri prerade navedenih postupaka obuhvaćaju, rad je usredotočen na utjecaj odabira strategije skeniranja na mehanička svojstva tvorevine, odnosno konkretno pritisna svojstva. Napravljena je usporedba dviju strategija skeniranja: "NoPattern" i "Stripes". S ciljem otvaranja dodatnog područja ispitivanja ispitna tijela nisu izrađena s potpunom gustoćom već je ispitana ćelijasta žiroidna struktura bez vanjske opne. Rezultati su pokazali da odabrane strategije skeniranja 3D tiska nemaju različiti utjecaj na pritisna svojstva ćelijastih tvorevina. Ovim istraživanjem otvoren je put daljnjem ispitivanju parametara oblikovanja ćelijaste strukture: veličini ćelija i debljini stijenke te utjecaju vanjske opne na svojstva tvorevine.

Ključne riječi: 3D tisak metala, selektivno lasersko srašćivanje, selektivno lasersko taljenje, strategija skeniranja, pritisna sila, ćelijasta struktura

SUMMARY

In the scope of this thesis, in addition to the basics of the most widespread metal 3D printing technologies in use, selective laser sintering and selective laser melting are covered in closer detail. Due to the wide scope of the process parameters of the aforementioned metal 3D printing technologies, this final work has been focused on the effect of different scanning strategies on mechanical properties, or more precisely compressive properties of 3D printed parts. A comparison has been made between two scanning strategies: NoPattern and Stripes. To examine an additional field of metal 3D printing, a complex gyroid structure without an outer skin has been chosen as the structure of the parts. Comparing the results of both scanning strategies, a conclusion has been made that the scanning strategy did not affect the compressive properties of the chosen cellular structure. With this research, a gate has been opened to further examine the effects of the different design parameters of cellular structure design: cell size and wall thickness as well as the effect on the outer skin.

Key words: metal 3D printing, selective laser sintering, selective laser melting, scanning strategie, compressive stress, cellular structure

1. UVOD

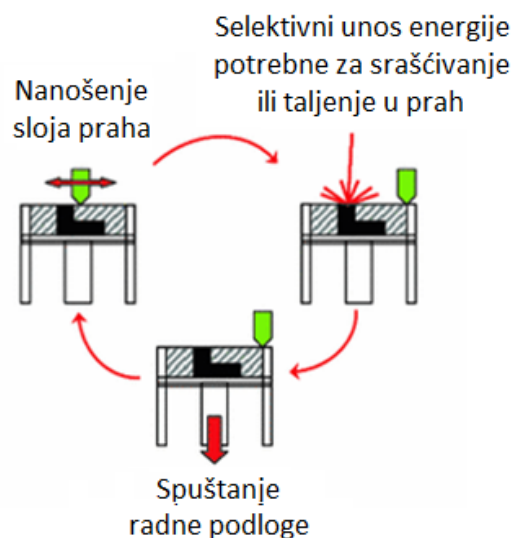
U usporedbi s tradicionalnim postupcima izrade tvorevina od metala kao što su obrada odvajanjem čestica, kovanje i lijevanje, aditivni postupci proizvodnji metala relativna su novost na tržištu. Iako svoje korijene vuku s početka 1980-tih godina kada je Chuck Hull usavršio i patentirao tehnologiju stereolitografije, tek 1995. godine lansiran je prvi stroj za 3D tisak metala. 3D pisac *EOSINT M 250* temelji se na tehnologiji selektivnog laserskog srašćivanja, odnosno DMLS (eng. *Direct Laser Metal Sintering*) tehnologija kako ju je tvrtka *EOS* tada patentirala. Iste godine predan je i zahtjev za patentiranje selektivnog laserskog taljenja (eng. *Selective Laser Melting - SLM*). Veliki problem prvih tehnologija bio je nedostatak kvalitetnog metalnog praha što je izrazito ograničilo izbor metala za ispis te time i upotrebu navedenih tehnologija. Razvoj tehnologije proizvodnje praha odvijao se paralelno s tehnologijom tiskanja. Danas su dostupni gotovo svi glavni metali i legure, no 2004. godine u upotrebi ih je bilo samo 9. Mogućnost izrade složene geometrije, koju je tradicionalnim metodama vrlo teško ili nemoguće izraditi potaknulo je ulaganje u razvoj ovih tehnologija. Tako ih danas gotovo sve velike industrije primjenjuju što u proizvodnji, što u svojim odjelima za istraživanje i razvoj. Unatoč razvoju novih tehnologija, SLS i SLM tehnologije i danas su najrasprostranjenije u industriji 3D tiskanja metala. [1]

2. POSTUPCI 3D TISKANJA METALA

Postupci 3D tiskanja metala služe za dobivanje složene i komplicirane geometrije koju je često klasičnim postupcima obrade i prerade metala teško dobiti. Također, u usporedbi s klasičnim postupcima, vrijeme od konstruiranja do gotovog proizvoda znatno je kraće.

2.1. Postupak spajanjem praha u komori (eng. *Powder Bed Fusion - PBF*)

Strojevi koji izrađuju proizvode ovim postupcima kao temeljni materijal upotrebljavaju metalni prah. Čestice praha selektivno se zagrijavaju te pod utjecajem visoke temperature se ili tale ili međusobno sraščuju. Izrada teče u vertikalnim slojevima gdje se u svakom sloju ponavlja isti postupak (slika 2.1). Debljina sloja ovisi o materijalu i metodi, a najčešće je između 25 i 100 μm . [2]



Slika 2.1. Faze postupka spajanjem praha u komori [2]

Ovim postupcima moguća je izrada gotovo bilo kakve geometrije s izrazito velikom točnošću. Dostupan je široki spektar materijala koji uključuje i čiste metale i njihove legure. Mogućnosti naknadne obrade se ni po čemu ne razlikuje od obrade klasično izrađenih proizvoda dok je naknadna toplinska obrada preporučena kako bi se oslobodila unutarnja naprezanja te postigla mehanička svojstva koja su usporediva onima kovanih tvorevina. Otpadni materijal kod PBF-a je unatoč potrebi za potpornim strukturama minimalan. Većina preostalog praha se u određenom omjeru miješa s novim prahom te tako omogućuje gotovo neograničeno

recikliranje. Veličina dijelova ograničena je dimenzijama komore koje se novim generacijama strojeva povećavaju čime raste i područje primjene tehnologije ali i cijena. [2, 3]

Prednosti [2, 3]:

- gotovo sva geometrija moguća
- visoka preciznost
- široki raspon materijala
- dobra mehanička svojstva
- bez ograničenja u naknadnoj obradi
- recikliranje praha

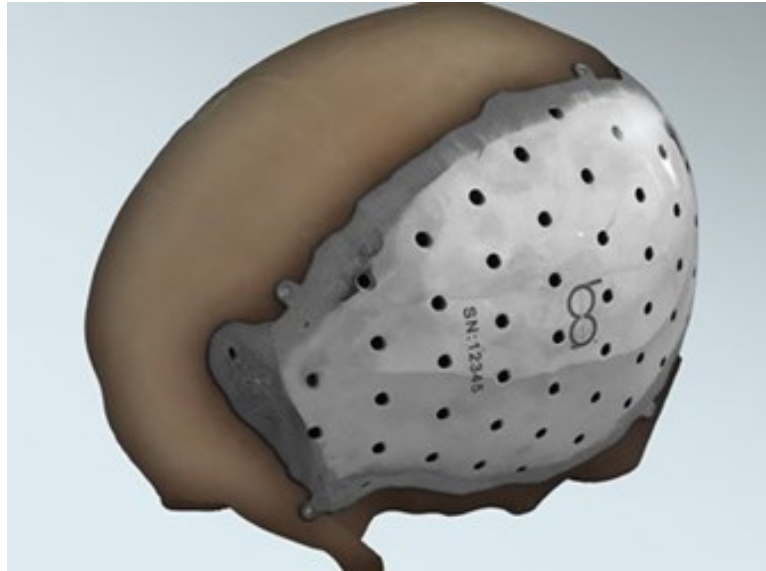
Nedostatci [2, 3]:

- visoka cijena materijala, stroja i pogona
- veličina tvorevine ograničena komorom
- potrebna potporna struktura koja stvara otpad
- materijal opasan za rukovanje
- deformiranje velikih dijelova zbog prerade pri visokim temperaturama

U ovu kategoriju postupaka spadaju selektivno lasersko srašćivanje, selektivno lasersko taljenje te taljenje elektronskim snopom (eng. *Electron Beam Melting - EBM*). [3]

2.1.1. Primjena

Prednosti koje postupci PBF pružaju privukli su pozornost brojnih industrija. Medicina je samo jedna od njih. Zbog kompleksnosti ljudskog tijela implantati moraju biti personalizirani za svakog pojedinca što znači i da postupak za njihovu izradu mora biti fleksibilan. S titanij legurom izrađuju se implantati za lubanju (slika 2.2) i kuk. [2, 4]



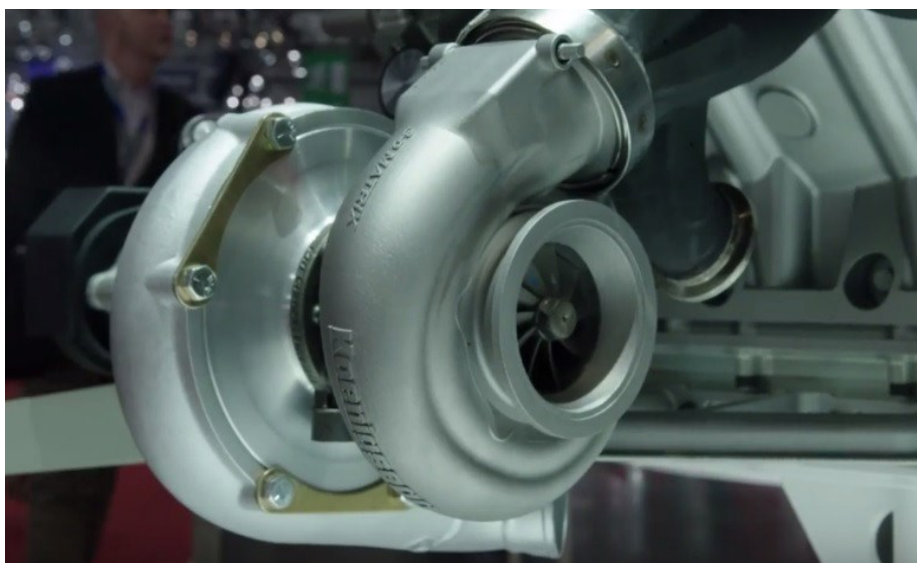
Slika 2.2. Implantat za lubanju izrađen od titanijeve legure postupkom EBM [4]

Zrakoplovna i svemirska te automobilska industrija su još neke od industrija koje su u postupcima PBF vidjele mogućnost za napredak svojih proizvoda. Tako npr. *General Electric-ov GE9X* motor u novom *Boeing 777X* zrakoplovu ima mlaznicu za gorivo proizvedenu postupkom PBF (slika 2.3). Zbog izrade iz jednog komada, takva je mlaznica više od pet puta trajnija od one koja se primjenjivala prije nje te uz to smanjuje potrošnju goriva. Svaki *Boeing 777* zrakoplov sadrži preko 300 dijelova proizvedenih aditivnim tehnologijama. [2, 5, 6]



Slika 2.3. Mlaznica za gorivo na motoru *GE9X Boeinga 777X* [6]

Švedski proizvođač super-automobila *Koenigsegg* za svoj automobil One:1 također je primijenio postupak PBF i za serijsku proizvodnju na dijelovima poput kućišta turbopunjača prikazanog na slici 2.4 (prvog takvog u svijetu [7]), ispuha, usisa zraka i pojedinih dijelova unutrašnjosti. Većina super-automobila izrađuje se samo u par primjeraka no i kod onih u serijskoj proizvodnji radi se o maloj do srednje velikoj proizvodnji. Kod takve izrade aditivne tehnologije su značajno brže i efikasnije od klasičnih postupaka. [8]



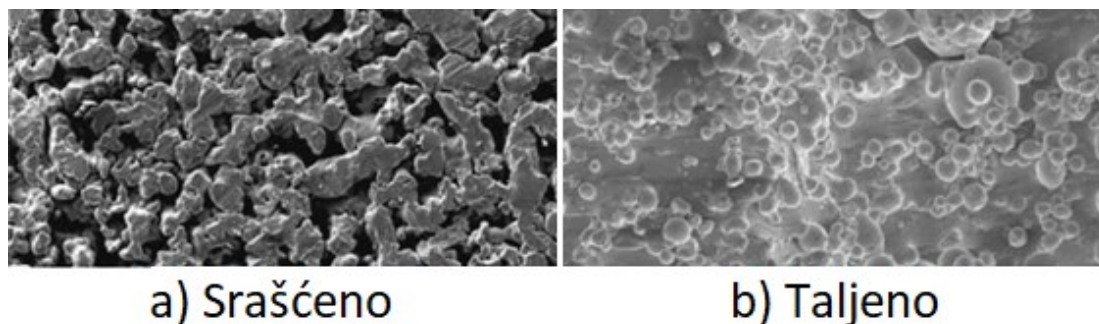
Slika 2.4. 3D turbopunjač super-automobila One:1 tvrtke Koenigsegg [7]

2.1.2. *Selektivno lasersko srašćivanje (eng. Selective Laser Sintering - SLS)*

Postupak SLS dijeli se na izravni i posredni. Kod izravnog postupka čestice praha pod utjecajem visoke temperature i pritiska omekšavaju te međusobno srašćuju. Za unos topline primjenjuje se laser koji selektivno obasjava čestice čija temperatura je uvijek ispod temperature tališta korištenog metala zbog čega metal niti u jednom trenutku nije u kapljevitom stanju. Srašćivanje znači da su čestice međusobno povezane samo svojim rubnim slojem (slika 2.5, a). Može se reći da se čestice malo više nego dodiruju pa su takvi izradci izrazito porozni te im je potrebna toplinska obrada kako bi se poboljšala mehanička svojstva. [3, 9, 10] Posredni postupak sličan je izravnom. Metalni prah za posredni postupak, za razliku od čistog praha za izravni postupak, prekriven je polimernim vezivom koje se pri prolasku lasera tali te međusobno srašćuje čestice metala stvarajući zelenac. Zelenac zatim prolazi toplinsku obradu koja uključuje visokotemperaturno srašćivanje. [11, 12]

2.1.3. *Selektivno lasersko taljenje (eng. Selective Laser Melting - SLM)*

S obzirom na to da je DMLS kao postupak nastao prije SLM-a, SLM se nerijetko još uvijek zamjenjuje s DMLS-om. Postupak SLM je u svojoj suštini isti kao i postupak SLS no uz jednu bitnu razliku. Snažniji laser koji se u postupku SLM primjenjuje omogućuje taljenje čestica praha. Tako se molekule u potpunosti povezuju. Nastaje tvorevina s gotovo savršenom gustoćom bez poroznosti i nesavršenosti (slika 2.5, b), mehaničkih svojstava koje pariraju kovanju. Zbog varijacija u parametrima koji se primjenjuju u različitim 3D pisačima može se uzeti da je čvrstoća tvorevine postupkom SLM jednaka 90 % čvrstoće kovane tvorevine istog metala. [3, 9]



Slika 2.5. Usporedba strukture tvorevine: a) postupak SLS, b) postupak SLM [9]

2.1.4. Taljenje elektronskim snopom (eng. *Electron Beam Melting - EBM*)

Za razliku od lasera postupak EBM kao izvor toplinske energije primjenjuje elektronski snop. Visoka temperatura postupka zahtjeva da se proces odvija u podtllačnoj komori. Snop može obaviti više prolaza u sloju kako bi zagrijao komoru. Kod postupka SLM dolazi do brzog hlađenja koje može uzrokovati pucanje krhkih materijala koji ne mogu pratiti toplinsko širenje i skupljanje. Zagrijana komora kod postupka EBM (uglavnom oko 600 °C) omogućuje postepeno hlađenje tvorevine te time i upotrebu krhkih materijala. Postupak se uglavnom primjenjuje za metale s visokom temperaturom tališta. Hlađenje, ovisno o veličini tvorevine, može trajati i po nekoliko dana. Sve to čini postupak sporim te takvu izradu izrazito skupom. [1, 13]

2.2. Spajanje metalnog praha vezivom (eng. *Metal Binder Jetting - MBJ*)

Među svim postupcima 3D tiskanja metala ovaj postupak je najbliži klasičnom ispisivanju. Poput postupaka PBF, MBJ također za materijal upotrebljavaju metal u obliku praha. Stroj ravnomjerno rasporedi sloj praha određene debljine. Iznad sloja praha kreće se glava prikazana na slici 2.6. Ona je slična tintnom 2D pisaču, no u ovom postupku ona ištrcava polimerno vezivo. Ono slabo veže čestice praha u obliku presjeka izrađivanog komada. Radna podloga stroja se zatim pomiče prema dolje za debljinu idućeg sloja te se postupak ponavlja dok tvorevina nije u cijelosti načinjena. Proces je prikazan na slici 2.7. [3, 15]



Slika 2.6. Glava MBJ stroja s mlaznicama [14]

Oblikovanje tvorevine događa se pri sobnoj temperaturi zbog čega ne postoji rizik od deformacije i savijanja što je glavni razlog za upotrebu potporne strukture. S obzirom na to da potpornji ne zauzimaju prostor komore i nema potrebe za izolacijom slojem praha oko tvorevine, volumen cijele komore je iskoristiv. To omogućuje izradu velikog broja dijelova odjedanput te je MBJ od svih postupaka 3D tiskanja metala najprimjenjiviji za serijsku proizvodnju. U usporedbi s postupcima s laserom ili elektronskim snopom gdje je takav izvor toplinske energije samo jedan, a dodatak još jednog značajno povećava cijenu stroja, MBJ stroj ima niz mlaznica bez dodatnog troška. [3, 15]

Tvorevine izrađene ovim postupkom moraju nužno proći naknadnu toplinsku obradu srašćivanja. Srašćivanje se događa u pećima (slika 2.8) gdje se dijelovi zagrijavaju pri temperaturi nižoj od temperature tališta metala. Polimerno vezivo pritom izgara, a molekule metala međusobno srašćuju u čvrsti, no porozni komad. U peći se istovremeno može zagrijavati cijela serija dijelova što doprinosi mogućnosti serijske proizvodnje postupkom MBJ. [3, 15]

Unatoč potrebi za dugotrajnom naknadnom obradom, mogućnost izrade desetina pa i stotina dijelova istovremeno te veliki broj mlaznica čini MBJ postupak najbržim, po komadu, od svih postupaka 3D tiskanja metala, no uz visoku cijenu. [3, 15]



Slika 2.7. Faze postupka MBJ [14]



Slika 2.8. Digital Metal MBJ stroj s visokom rezolucijom [15]

Prednosti [3, 15]:

- veliki volumen komore
- potpornji nisu potrebni pa je moguće primijeniti cijeli volumen komore odjedanput
- nema gotovo nikakvih ograničenja po pitanju geometrije
- zbog odvijanja postupka pri sobnoj temperaturi nema deformacija (moguće tiskanje velikih dijelova)
- velika brzina tiskanja
- niža cijena od postupka PBF

Nedostatci [3, 15]:

- nužna dugotrajna naknadna toplinska obrada (sraščivanje)
- visoka cijena stroja i materijala
- niža mehanička svojstva od postupka PBF zbog veće poroznosti
- mali izbor materijala

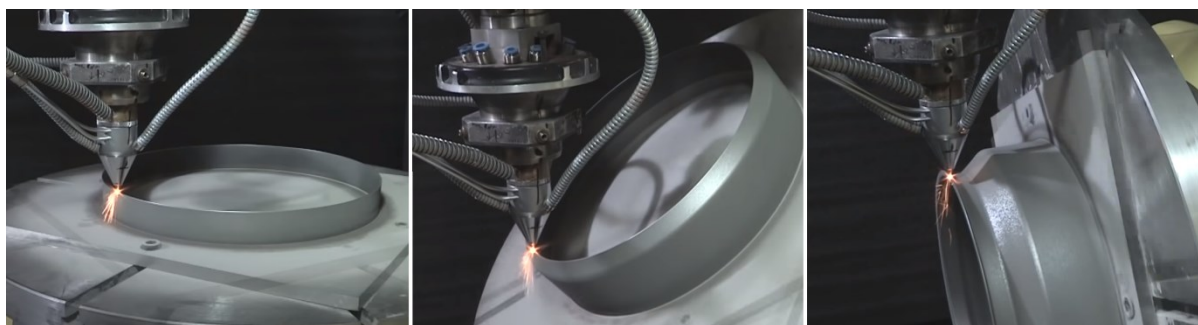
Na slici 2.9 prikazan je stroj za proizvodnju tvorevine postupkom MBJ.



Slika 2.9. Industrijska podtlačna peć za sraščivanje [15]

2.3. Izravno taloženje (eng. *Direct Energy Deposition - DED*)

Postupak vrlo sličan zavarivanju u kojem se materijal, u obliku metalne žice ili praha, tali pod utjecajem lasera, elektronskog snopa ili plazme. Kako se materijal tali, tako se istovremeno taloži pomoću glave sloj po sloj te stvara tvorevinu. Za razliku od postupka PBF potpornji se gotovo nikada ne primjenjuju. Kompleksna geometrija moguća je zahvaljujući višeosnom okretnom stolu za pozicioniranje (slika 2.10). [16, 17]



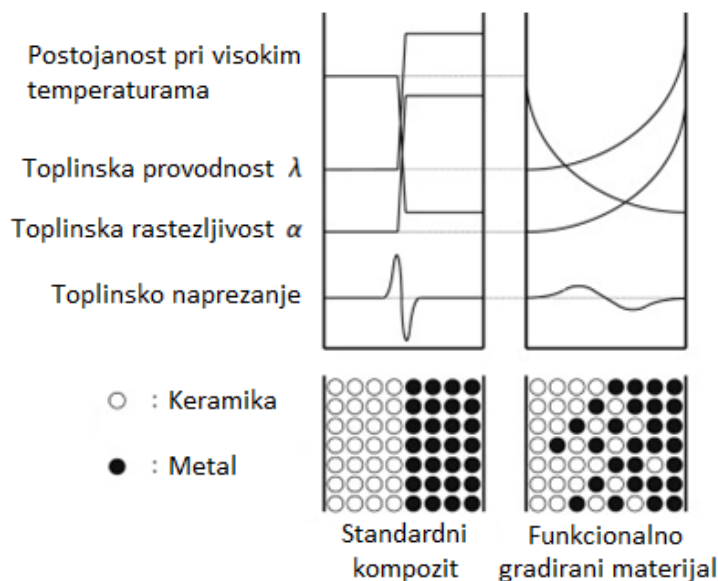
Slika 2.10. Pozicioniranje pomoću višeosnog okretnog stola [18]

Debljina slojeva je između 0,25 i 0,5 mm. Brzina hlađenja je izrazito velika, od 1000 do 5000 °C/s. [13]

Kako bi se spriječila oksidacija metala proces se odvija u inertnoj atmosferi. Postupak s elektronskim snopom odvija se u podtlačnoj komori dok se za laser i plazmu primjenjuje inertni plin. Plin se ili ispuhuje iz mlaznice na glavi stroja i tako stvara zaštitnu atmosferu oko rastaljenog metala ili se cijeli postupak odvija u komori ispunjenoj plinom. Kod primjene metalnog praha on se često ispuhuje zajedno s inertnim plinom. [16, 17]

Prah koji se često upotrebljava grubljih je čestica od onih kod postupka PBF. Za njegovo taljenje potrebna je viša gustoća energije. Kao rezultat toga postupak DED brži je od PBF-a no uz lošiju kvalitetu površine koja nerijetko zahtjeva naknadnu obradu. [16]

Za ispuh praha primjenjuje se jedna ili više mlaznica čime se omogućuje legiranje metala te stvaranje funkcionalno gradiranih materijala. [16, 17] To su materijali kojima se svojstva postepeno mijenjaju po presjeku (slika 2.11). Na jednoj strani mogu biti dobri vodiči topline dok je druga strana izolator. Postepenom promjenom takvih, suprotnih, svojstava smanjuje se unutarnje naprezanje pri visokim temperaturama [19].



Slika 2.11. Struktura i svojstva običnih kompozitnih materijala u usporedbi s funkcionalno gradiranim materijalima [19]

Najčešća primjena postupka DED je za popravljjanje ili dodavanje novih dijelova postojećim metalnim strukturama. [3]

Prednosti [3]:

- metalna žica najjeftiniji je materijal za 3D tiskanje
- primjena više materijala za legiranje metala i stvaranje funkcionalno gradiranih materijala
- popravljjanje metalnih dijelova
- dodavanje novih dijelova postojećim metalnim strukturama
- potpornji nisu potrebni u većini slučajeva
- izrada velikih dijelova
- efikasna upotreba materijala
- visoka gustoća izrađenih dijelova
- visoka brzina postupka

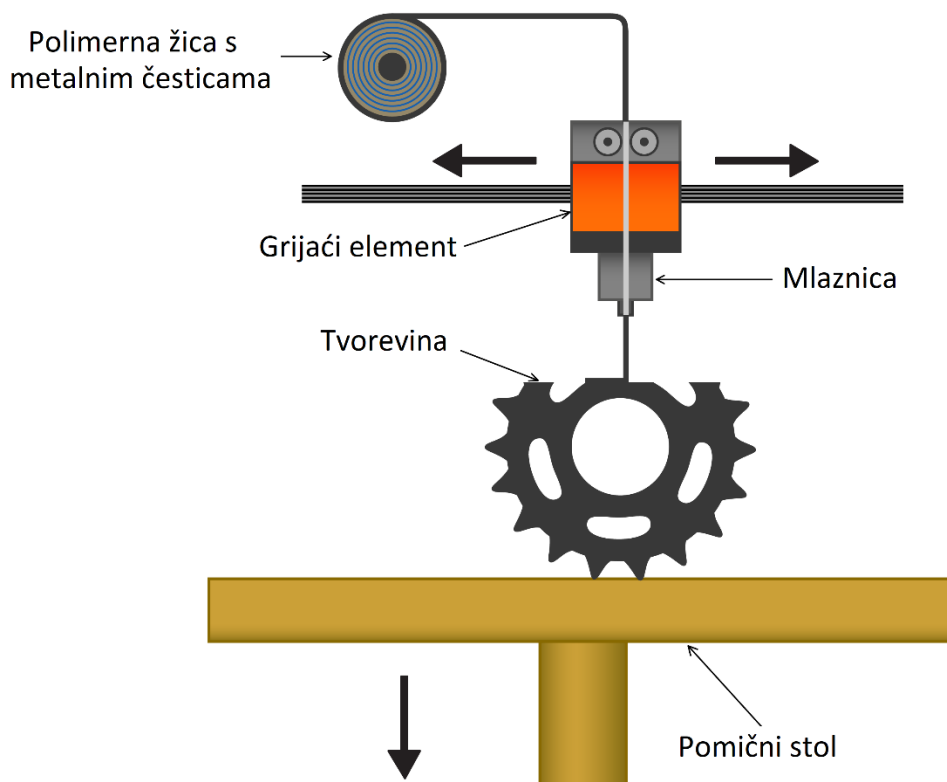
Nedostatci [3]:

- zbog loše kvalitete površine potrebna je naknadna obrada

- “grub“ postupak (sitni detalji nisu izvedivi)
- visoka cijena stroja i postupka
- cijena se ne smanjuje s veličinom serije (dijelovi se moraju izrađivati jedan po jedan)

2.4. Ekstrudiranje metalnih materijala (eng. *Metal Material Extrusion - MME*)

Postupak MME spada među novije postupke. Vrlo je sličan taložnom očvršćivanju (eng. *Fused Deposition Modeling - FDM*). U postupku FDM polimerni materijal u obliku žice prolazi kroz glavu pisača gdje omekšava i u takvom se omekšanom stanju ekstrudira kroz mlaznicu. Omekšani polimer se nanosi u slojevima i vrlo brzo nakon izlaska iz mlaznice očvršćuje. Postupak je prikazan na slici 2.12. [3, 20]



Slika 2.12. Postupak MME [20]

Žica koja se primjenjuje sastoji se od metalnog praha umiješanog u polimerni materijal ili vosak. Takvim materijalom se za razliku od čistog praha može sigurno rukovati. Gotova tvorevina na kraju tiskanja kombinacija je polimernog veziva i metala. Vezivo se zatim mora

ukloniti, a metalni prah međusobno povezati. Tvorevina prvo prolazi proces pranja pri čemu se dio veziva odstranjuje. Zatim ide u peć za srašćivanje gdje se tvorevina postupno zagrijava te pri različitim temperaturama i zadržava. Temperature, brzine zagrijavanja i vrijeme zadržavanja ovise o materijalu (npr. nehrđajući čelik 17-4PH ima sljedeći ciklus: zagrijavanje od 25 do 600 °C pri 120 K/h; zadržavanje od 3 sata pri 600 °C; zagrijavanje od 600 do 900 °C pri 3 K/h; zadržavanje od 1,5 sati pri 900 °C; zagrijavanje od 900 do 1380 °C pri 250 K/h; zadržavanje od 5 sati pri 1380 °C; hlađenje prirodnom konvekcijom [21]). Uz izgaranje preostalog veziva formira se čvrsta tvorevina. Izgaranjem veziva čestice metala nastoje popuniti novonastale šupljine te se međusobno približavaju. Posljedica toga je stezanje tvorevine od 15 do 20 % [21]. Kod nanošenja materijala prilikom tiskanja, formiraju se mjehurići i praznine koji rezultiraju velikom poroznošću gotove tvorevine, a time i značajno smanjenim mehaničkim svojstvima. [3, 20]

Unatoč nemogućnosti primjene u proizvodne svrhe zbog sniženih mehaničkih svojstava, postupak se pokazao odličan kod izrade funkcionalnih prototipa. Visoka brzina izrade, preciznost usporediva s onom kod postupka FDM za polimere te niska cijena. Kao rezultat toga, glavna primjena ovog postupka upravo je u izradi prototipa. [3, 20]

Prednosti [3, 20]:

- odličan za izradu funkcionalnih prototipa
- najjeftiniji postupak za 3D tiskanje metala
- visoka preciznost uz finu rezoluciju slojeva
- materijal je siguran za rukovanje

Nedostatci [3, 20]:

- dugotrajan postupak uklanjanja veziva
- potrebna potporna struktura
- niža mehanička svojstva zbog visoke poroznosti i niske gustoće
- snižena dimenzijska točnost zbog skupljanja u peći

2.5. Ostali postupci

Osim glavnih kategorija postupaka 3D tiskanja metala postoji još cijeli niz postupaka koji se razlikuju od glavnih jedva toliko da zaobiđu patentnu zaštitu. [3]

2.5.1. Joule tiskanje

Razvijen od strane tvrtke *Digital Alloys*, Joule tiskanje vrlo je slično postupku DED. Razlika je što kod ovog postupka struja teče kroz žicu i tako ju tali. Tvrtka tvrdi da takav pristup drastično ubrzava postupak što su demonstrirali tiskanjem 2 kg titanija po satu. [3]

2.5.2. Aditivna proizvodnja kapljevitim metalom (eng. *Liquid Metal Additive Manufacturing*)

Kod ovog postupka metal se zagrijava pri 1200 °C te se pritom tali. Rastaljene kapljice metala se nanose na način sličan klasičnom 2D tintnom pisaču. Postupak je razvijen od strane tvrtke *Vader Systems*. [3]

2.5.3. Elektrokemijska aditivna proizvodnja (eng. *Electrochemical Additive Manufacturing - ECAM*)

Za izradu tvorevina s postupkom ECAM primjenjuje se lokalizirano elektrokemijsko taloženje. Metalni alat u obliku šipke djeluje kao anoda, a podloga na pomičnom višeosnom stolu kao katoda. Cijeli postupak odvija se u elektrolitnoj otopini. Struja teče s anode na katodu prilikom čega anoda erodira, a nastali se materijal taloži na katodi. Ovim postupkom moguće je izraditi dijelove veličine od nekoliko mikrometara do nekoliko stotina mikrometara. [22, 23]

2.5.4. DLP tiskanje metala (eng. *Digital Light Processing metal printing*)

Postupak koji primjenjuje tehnologiju DLP za tiskanje metala. Gdje je polimerna fotoosjetljiva smola pomiješana s metalnim prahom. Takva mješavina materijala stavlja se u kadu gdje ga, sloj po sloj, obasjava izvor svjetlosti. Istovremeno dolazi do očvršćivanja cijelog sloja. Vezivo se kasnije uklanja na isti način kao i kod postupka MME. [3, 24]

2.5.5. Tiskanje metala hladnim štrcanjem (eng. Cold Spray Metal Printing)

Postupak stvoren od strane NASA-e (eng. National Aeronautics and Space Administration) za izradu dijelova u vakuumu svemira. Postupak nije vrlo precizan no zato je izuzetno brz. S aluminijem i bakrom moguće su brzine do 6 kg/s. Tvrtke *Titomic* i *SPEE3D* danas su vodeće u ovoj tehnologiji.

2.5.6. Ultrazvučna konsolidacija

Primjer kombinacije aditivne tehnologije i obrade odvajanjem čestica. Postupak upotrebljava metalne folije koje se pod utjecajem pritiska i ultrazvučnih valova međusobno zavaruju. Između slojeva se tvorevina obrađuje. Tako su moguće komplicirane unutarnje geometrije teško postizive klasičnim postupcima. [3]

2.5.7. LENS

Varijacija postupka DED s laserom. U postupku LENS hermetički zatvorena komora ispunjena je inertnim plinom, uglavnom argonom kako bi se spriječila oksidacija. Od materijala se upotrebljava pretežito titanij, nehrđajući čelik i Inconel superlegura koje omogućuju kontrolu i točnost koji malo koji drugi postupak pruža. [3]

2.5.8. Slobodno oblikovanje elektronskim snopom (eng. Electron Beam Freeform Fabrication – EBF3)

Također razvijen od strane NASA-e za primjenu u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji. Pomoću snage elektronskog snopa tale se dvije žice istovremeno kako bi se brzo i precizno izradila kompleksna geometrija s minimalnom masom. Prilikom postupka nema otpada. [3, 25]

3. SELEKTIVNO LASERSKO SRAŠĆIVANJE I TALJENJE METALA

Osnovni princip rada PBF tehnologije osmišljen je i razvijen na Sveučilištu u Texasu (Austin, Sjedinjene Američke Države). Postupak selektivnog laserskog srašćivanja prvi je od tih postupaka. Njegov razvoj započeo je ranih 1980-tih godina prošlog stoljeća od strane tadašnjeg studenta Carl R. Deckarda (kasnije Dr.) i njegovog mentora Dr. Joe Beamana. U isto vrijeme razvijalo se i 3D CAD modeliranje što je potaknulo, a istovremeno i omogućilo Deckardovu ideju. Zahtjev za patentiranjem postupka podnesen je 1986. godine od strane Sveučilišta u Texasu, a prihvaćen je 1989. godine. Tvrtka koju je Deckard tada osnovao nosila je naziv DTM (današnji *3D Systems*). [10, 26]

Sredinom 1990-tih godina istraživanje na Fraunhofer institutu za lasersku tehnologiju ILT u Aachenu u Njemačkoj rezultiralo je patentom DE 19649865. Na temelju tog istraživanja razvijen je postupak selektivnog laserskog taljenja. Za razliku od postupka SLS, njime se postiže potpuno taljenje materijala. Tvrtka nastala suradnjom pionira tehnologije Dr. Wilhelm Meinersa te Dr. Konrada Wissenbacha i *F&S Stereolithographtechnik GmbH s MCP HEK GmbH* današnji je *SLM Solutions*. [27, 28]

Unatoč razvoju mnogih drugih postupaka 3D tiskanja metala, PBF postupci i dalje su dominantni u industrijskoj primjeni.

3.1. Materijali

Kvaliteta tvorevine uvelike ovisi o svojstvima i kvaliteti početnog materijala. Oba postupka (SLS i SLM) upotrebljavaju metalni prah. Za dobru reproduktivnost nužna su konzistentna svojstva praha. [29] Među najbitnijim svojstvima su raspodjela veličina čestica te njihova morfologija. Zatim slijede gustoća, kompaktnost, pogodnost za srašćivanje, kemijski sastav, čvrstoća zelenca, površina čestice, tecljivost te toplinska provodnost. Za kvalitetu praha su, uz čistoću, ključni veličina te oblik čestica. Najmanja postiziva visina sloja određena je veličinom čestice, a tako je određena i kvaliteta površine tvorevine. Sferična morfologija praha je najpoželjnija. [30]

Veličina i distribucija praha su parametri koji utječu na konačnu tvorevinu no istraživanja koja proučavaju te parametre su, za razliku od parametara lasera, malobrojna. Ipak, istraživanja koja jesu provedena proučavala su utjecaj veličine čestica i distribuciju praha na svojstva izrađenih dijelova te parametre lasera. Istraživanje Bourell et al. došlo je do spoznaje da, za razliku od čestica veličine 38 μm , čestice veličine od 15 μm do 28 μm zahtijevaju nižu gustoću energije za postizanje 99 % gustoće gotove tvorevine. Metalni prah koji se primjenjivao je prah 316L nehrđajućeg čelika. [31] U svojem istraživanju Liu et al. potvrdili su spoznaju da prah manjih i raznovrsnijih veličina čestica zahtjeva niže gustoće energije za postizanje većih gustoća. Čestice takvih veličina postigle su i bolju kvalitetu površine. Dalje je utvrđeno da čestice uniformnog oblika i veličine imaju bolju tečnost što povisuje čvrstoću i tvrdoću izrađenih dijelova. [32]

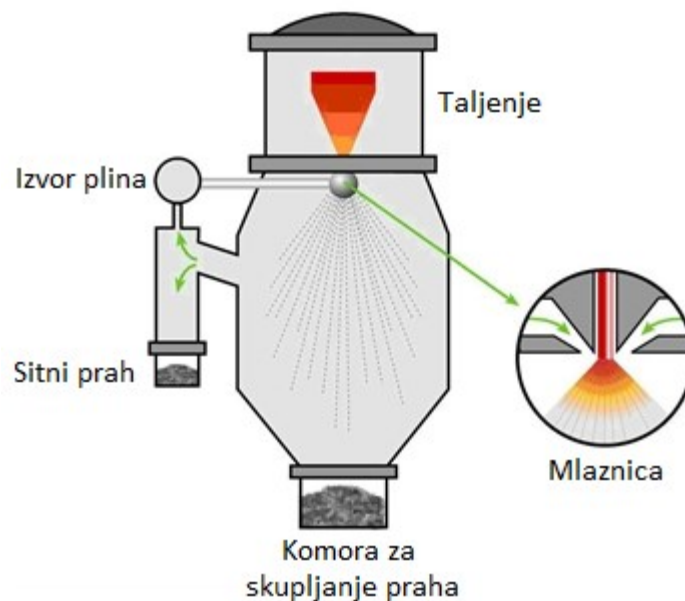
3.1.1. *Proizvodnja metalnog praha*

Ovisno o vrsti metala koji se prerađuje te željenim svojstvima i kvaliteti postoji više postupaka za dobivanje praha. Postupak atomizacije najbolji je za svrhu aditivne proizvodnje zbog toga što daje najpogodniji geometrijski oblik čestica, odnosno izrazito sferični oblik. Atomizacija za tu svrhu provodi se na jedan od dva načina. Ovisno o materijalu koji se atomizira to su: plinska atomizacije i atomizacija plazmom. [33]

3.1.1.1. *Plinska atomizacija*

Postupak (slika 3.1) započinje taljenjem metala, najčešće u indukcijskoj podtlačnoj peći. Peć je pozicionirana točno iznad komore za atomizaciju, te se nakon taljenja metal ulijeva u komoru. Prilikom ulijevanja taljevina se propuhuje plinom pod vrlo visokim pritiskom te dolazi do atomizacije. Upotrebljava se uglavnom inertni plin (argon ili dušik) kako ne bi došlo do oksidacije, no moguće je upotrijebiti i zrak. Očvrsnute čestice praha padaju na dno komore. Ovim postupkom dobivaju se čestice praha do 500 μm čija se veličina može donekle kontrolirati reguliranjem dovoda plina. [30]

Postupak se primjenjuje za nikal, željezo, aluminij, kobalt, titanij te njihove legure. [30]

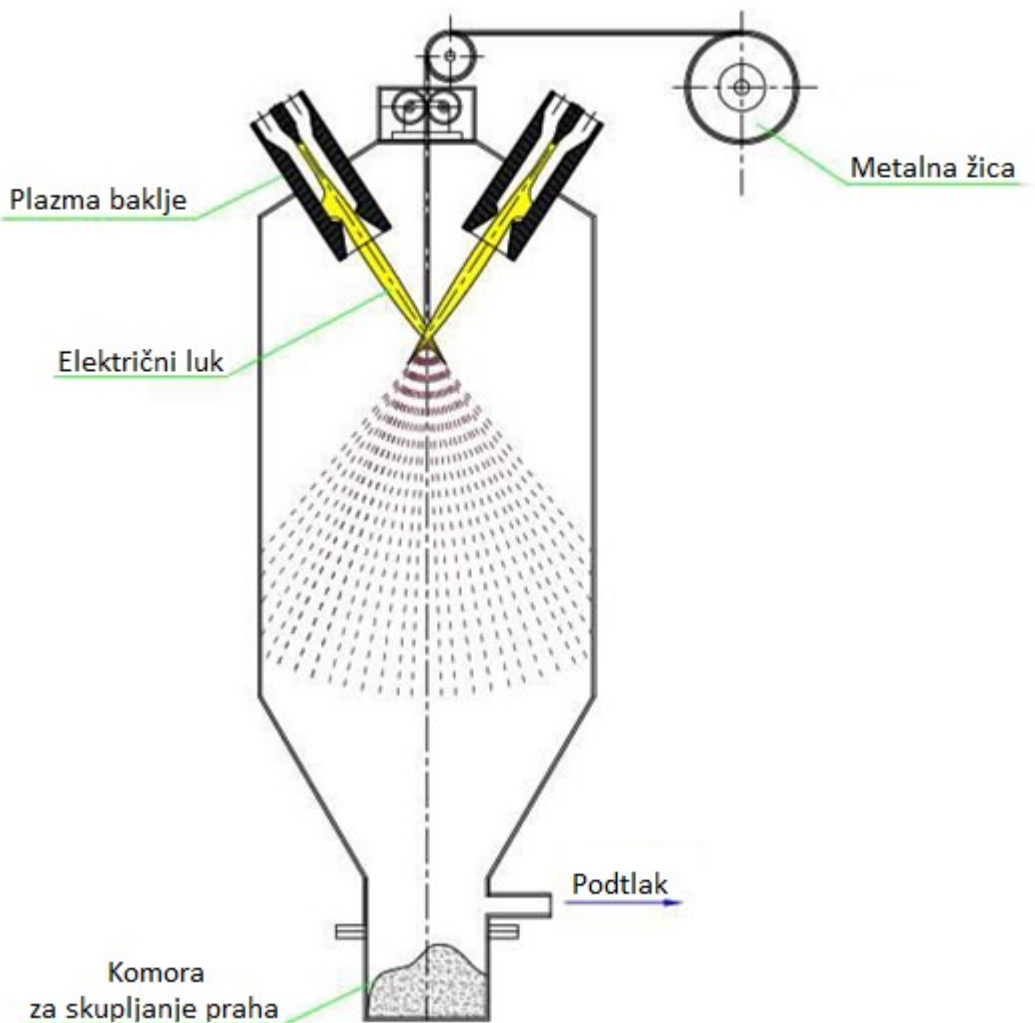


Slika 3.1. Plinska atomizacija [30]

3.1.1.2. Atomizacija plazmom

Postupak teče tako da metal u obliku žice ili grubljeg praha kontinuirano ulazi u komoru za atomizaciju gdje se pod utjecajem nekoliko plazma baklji istovremeno tali i atomizira (slika 3.2). Prah proizveden ovim postupkom izrazito je sferičnog oblika, što se plinskom atomizacijom ne može postići, te veličine do 200 μm . Atomizirani metal se hladi te pada na dno komore u obliku očvrnutih čestica. Postupak se može unaprijediti primjenom rotirajuće deblje žice, odnosno šipke za bolju kontrolu ulaza metala u komoru. Kod takvog postupka veličina čestice je do 100 μm . Atomizacija plazmom daje prah vrlo visoke čistoće te sferičnosti. [34]

Postupak se primjenjuje za titanij i njegove legure. [30]



Slika 3.2 Atomizacija plazmom [33]

3.2. Primjena postupaka SLS i SLM

Najčešće upotrijebljeni materijali u industriji su željezo, titanij i nikal te njihove legure. Odabrani su zbog širokog područja upotrebe te dostupnosti i prihvatljive cijene. S razvojem tehnologije i poboljšanjem postupaka SLS i SLM spektar dostupnih i istraženih materijala raste. Novi materijali otvaraju nove mogućnosti upotrebe te tako tehnologija postaje primjenjiva u sve više industrija. [35]

3.3. Parametri prerade kod postupaka SLS i SLM

Određivanje optimalnih parametara najbitniji i najdugotrajniji je proces postupaka SLS i SLM te izravno utječe na kvalitetu površine, dimenzijsku točnost i mehanička svojstva gotovoe

tvorevine. Dobro određeni parametri rezultiraju tvorevinom s vrlo malo poroznosti i nesavršenosti u svojoj strukturi.

U ovom radu težište će biti na parametrima vezanima uz laser.

3.3.1. Snaga i vrsta lasera

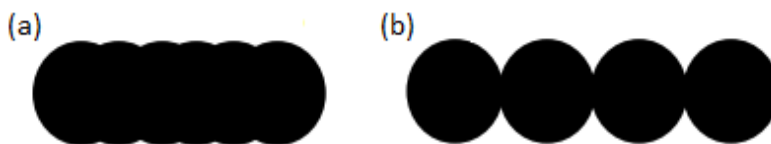
Snaga lasera odnosi se na snagu laserske zrake kojom se osvjetljavaju čestice metalnog praha te time u njega unose toplinu. Viša snaga lasera općenito rezultira većim unosom energije u čestice. [36] Vrstu lasera određuje proizvođač. Najistraživaniji laseri za ove postupke tiskanja su Nd: YAG te CO₂. Poznato je da vrsta lasera ima utjecaj na konačna svojstva tvorevine. [37] Wright et al. proučavali su utjecaj parametara na gustoću tvorevine s Nd: YAG i CO₂ laserima. Prahovi na kojima su provodili ispitivanje su M2 i H13 alatni čelici. Maksimalna gustoća postignuta Nd: YAG laserom za oko 30 % veća je od maksimalne gustoće postignute CO₂. [38] Iako se poroznost, odnosno mala gustoća gleda kao nedostatak postupaka SLS i SLM, postoje i primjene gdje je poroznost prednost. Dobar primjer toga su medicinski implantati. [39]

Uz koherenciju i promjer zrake, valna duljina bitno je svojstvo lasera koje određuje na koji način će se odvijati interakcija između njegove zrake i metalnog praha. Sposobnost upijanja određene valne duljine određuje pogodnost materijala za određeni laser. Različite vrste materijala različito upijaju određenu valnu duljinu. Nd: YAG laser je kratke valne duljine iznosa 1,06 μm. Većina metala vrlo dobro upija kratke valne duljine, stoga je ova vrsta lasera posebno pogodna za metalne materijale. Polimeri i oksidne keramike bolje upijaju duge valne duljine zbog čega je CO₂ laser s valnom duljinom od 10,6 μm pogodniji za njih. [40]

3.3.2. Brzina skeniranja

Laser istovremeno može osvjetljivati samo jednu točku. Kako bi se cijela površina sloja međusobno povezala zraka lasera ju mora cijelu proći. Brzina kretanja zrake lasera određena je brzinom skeniranja.

Prema istraživanju S.G.R. Brown et al. viša brzina skeniranja uzrokovat će smanjenu kvalitetu površine (slika 3.3). [41] Zbog više brzine kretanja točke koje laser uzastopno obasjava bit će više razmaknute što negativno utječe na kvalitetu površine.

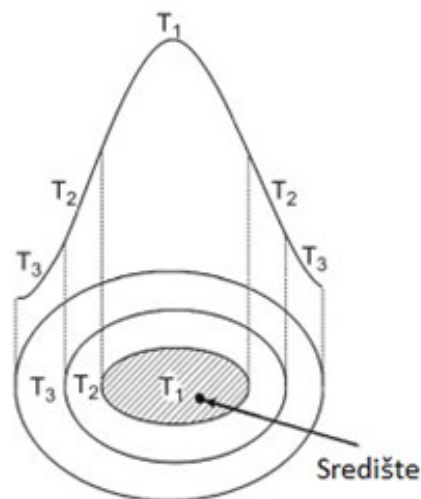


Slika 3.3. Utjecaj brzine skeniranja na kvalitetu površine: a) manja brzina skeniranja, b) veća brzina skeniranja [42]

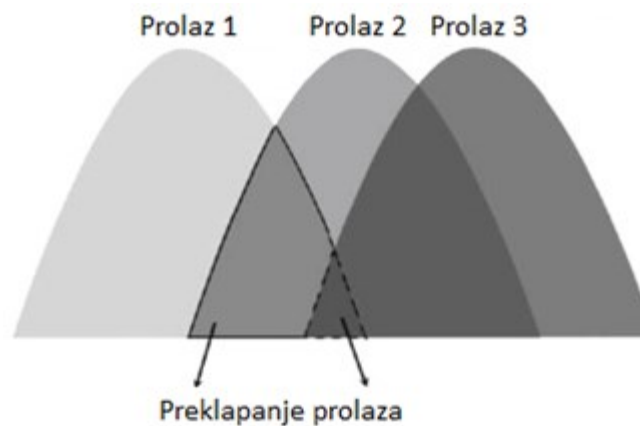
Pri višim brzinama skeniranja potrebno je primijeniti laser više snage te smanjiti razmak između prolaza kako bi čestice metala primile dovoljno topline te se adekvatno spojile. [43] Premali unos topline kao rezultat smanjene gustoće energije dovesti će do stvaranja kugljanja zbog površinske napetosti. Rezultat te pojave je povećano stvaranje pora. [44, 45]

3.3.3. Razmak između putanje laserske zrake (eng. hatch distance)

Razmak između putanje laserske zrake udaljenost je središta laserske zrake između dva paralelna prolaza. Veća udaljenost smanjuje potreban broj prolaza za taj sloj dok će prevelika udaljenost uzrokovati nepotpuno spajanje susjednih čestica, odnosno poroznost tvorevine. Najveći dopušteni razmak između putanje laserske zrake određen je snagom lasera (promjerom točke osvjetljavanja). Ovaj parametar proporcionalan je brzini prerade. Određeni postotak preklapanja prolaza je nužan zbog većeg unosa topline u središtu zrake nego na njenim rubovima (slike 3.4 i 3.5). [36]



Slika 3.4. Raspodjela temperature u laserskoj zruci [36]



Slika 3.5. Preklapanje pri prolazima [36]

Yasa E. et al. svojim su istraživanjem pokazali da se ponovnim unosom topline u već sraštene, odnosno rastaljene čestice povećavaju gustoća i kvaliteta površine tvorevine te smanjuje broj nesavršenosti. [47, 48]

Za svaku strategiju skeniranja potrebno je individualno odrediti razmak između putanje laserske zrake. Stoga se on smatra i parametrom strategije skeniranja. [49, 50]

3.3.4. Visina sloja

Završetkom jednog sloja, tvorevina se spušta za vrijednost visine sloja. Iako nije parametar lasera već stroja, vrlo je bitan za pravilnu raspodjelu praha te je stoga ovdje i spomenut. Idealna

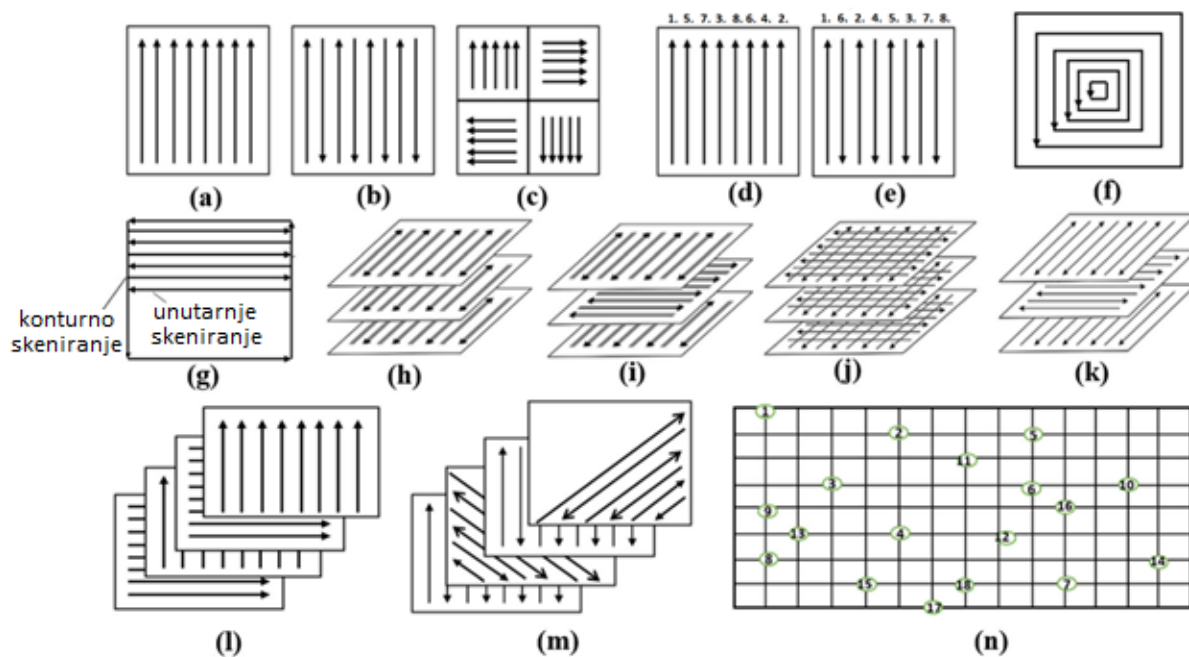
visina sloja ovisi o veličini čestica praha. Han Q. et al svojim su istraživanjem pokazali da se najbolja raspodjela praha s najmanje šupljina u tvorevini dobiva za visinu sloja malo veću od prosječne veličine čestica praha. Prema njihovim rezultatima idealna visina sloja za prah prosječne veličine čestice 35 μm je 40 μm . Kod visine sloja niže od 35 μm lopatica je pri prolasku istisnula 85 % predviđenog praha izvan radne površine što je rezultiralo šupljinama u tvorevini. Također, zbog visokog tlaka lopatice čestice praha se nakon prolaska lopatice pomaknu te dodatno utječu na nejednoliku raspodjelu praha. Visina sloja viša od 40 μm dala je dobre rezultate no zahtjeva više praha pri svakom prolazu lopatice te viša snagu lasera što je neekonomično. Iz navedenog razloga optimalno je primijeniti najnižu moguću visinu sloja. [51]

3.3.5. *Strategija skeniranja*

Strategija skeniranja odnosi se na put kojim će se laserska zraka kretati u prostoru prilikom skeniranja. Strategija skeniranja može se mijenjati među slojevima te se određuje na temelju zahtjeva pojedine tvorevine i njegove geometrije. Ovaj parametar ima važnu ulogu u određivanju konačnih svojstava tvorevine te ga je stoga bitno pravilno odabrati. [52]

Izgled mikrostrukture, mehanička svojstva te količina i vrsta zaostalih naprezanja izravna su posljedica strategije skeniranja. [52]

Broj provedenih istraživanja o utjecaju strategija skeniranja na kvalitetu tvorevine značajno se povećao u proteklih nekoliko godina što govori o važnosti ovog parametra. [52] Tako su Segura-Cardenas et al. uspješno mijenjanjem strategije skeniranja kod postupka SLM utjecali na permeabilnost površine tvorevine načinjenog od austenitnog nehrđajućeg čelika. [53] Istraživanjem utjecaja pojedinih strategija na temperaturu procesa te deformaciju i zaostala naprezanja, Zhang et al. otkrili su da međusobna rotacija slojeva za 90° povoljno utječe na zaostala naprezanja. [54]



Slika 3.6. Shema različitih strategija skeniranja: a) jednosmjerno skeniranje, b) dvosmjerno skeniranje/cik-cak skeniranje, c) otočno skeniranje, d) varijacija sekvencijalnog skeniranja temeljenog na jednosmjernom skeniranju, e) varijacija sekvencijalnog skeniranja temeljenog na dvosmjernom skeniranju, f) heliks skeniranje, g) konturno skeniranje, h) dvosmjerno skeniranje s duplim prolazom, i) dvosmjerno skeniranje s duplim prolazom i zakretanjem vektora prolaza za 90° između slojeva, j) križno skeniranje, k) dvosmjerno skeniranje s jednim prolazom i zakretanjem vektora prolaza za 90° između slojeva, l) jednosmjerno skeniranje sa zakretanjem vektora prolaza za 90° između slojeva, m) dvosmjerno skeniranje sa zakretanjem vektora prolaza za 45° između slojeva, n) točkasto skeniranje [54]

Moguće strategije skeniranja su mnogobrojne, stoga se u ovom poglavlju obrađuju samo često korištene (slika 3.6). Jednosmjerno (slika 3.6, a) i dvosmjerno (slika 3.6, b) skeniranje najjednostavnije su i najčešće primijenjene strategije skeniranja. Definirane su dugim vektorima, a razlikuju se u tome što se kod dvosmjernog naizmjenično mijenja smjer prolaza što nije slučaj kod jednosmjernog skeniranja. [54]

Kod otočnog skeniranja (slika 3.6, c) površina je razdijeljena na manje kvadrate kako bi se smanjila dužina vektora prolaza i omogućilo određivanje kuta i vrste prolaza za svaki kvadrat pojedinačno. Dugi vektori prolaza negativno utječu na kvalitetu velikih tvorevina stvaranjem

zaostalih naprezanja. Stoga skraćivanje vektora prolaza ima pozitivan utjecaj na kvalitetu i mehanička svojstva što su pokazali Jia H. et al. [52] Yasa et al. predložili su zakretanje vektora prolaza na susjednim kvadratima za 90° . Takav pristup pokazao je dodatno smanjenje zaostalih naprezanja, a time i stvaranje pukotina. [55]

Razlika između točki d) i a), odnosno e) i b) (slika 3.6) je u redosljediu prolaza zrake lasera. Prolazi se ne događaju u nizu već su nasumični kako bi se rasporedilo toplinsko naprezanje.

Heliks (slika 3.6, f) strategija je varijacija skraćivanja dužine vektora prolaza. [56]

Konturno skeniranje (slika 3.6, g) najprije kontinuiranim prolazom prati rub unaprijed zadane konture nakon čega se popunjava unutrašnjost. [57, 58] Povoljno utječe na kvalitetu površine.

Do sada spomenute strategije primjenjuju jedan prolaz zrake lasera no mogući su i dodatni prolazi istim putem (slika 3.6, h, i). Takvo ponovno skeniranje umanjuje veličinu zrna što pozitivno utječe na mikrostrukturu. [59] Uz prilagođene druge parametre kod postupka SLM postiže se gotovo 100 % gustoća te poboljšanje kvalitete površine od otprilike 90 %. [47] Prema Shiomi M. et al. najviša su naprezanja u površinskom sloju stoga se ponovno skeniranje vanjskih slojeva posebno preporučuje. [35]

Zakretanjem vektora prolaza između slojeva (slika 3.6, i, k, l, m) stvara se pravilniji raspored pora i bolja distribucija topline te se veličina pora smanjuje. [60, 61, 62] Jia H. et al. svojim istraživanjem pokazali su povećanu vjerojatnost stvaranja izotropnih svojstava. [52]

Za razliku od svih gore spomenutih kontinuiranih strategija točkasto skeniranje (slika 3.6 h) spada u diskontinuirane strategije. Laserska zraka se ne kreće po unaprijed definiranom putu već srađuje, odnosno tali točku po točku. Prema istraživanju Nandwana P. et al. parametri koji najviše utječu na kvalitetu tvorevine za ovu strategiju su jakost struje, vrijeme zadržavanja zrake te razmak između točaka. [59]

Ne postoji najbolja strategija za sve slučajeve već se ona određuje na temelju geometrije izrađivane tvorevine te upotrijebljenog materijala. Vodeći računa o strategiji koja će se primjenjivati za izradu tvorevine od početka, geometrija tvorevine se može optimirati radi postizanja najboljih rezultata.

3.3.6. *Temperatura komore*

Temperatura komore je parametar kojim se kontrolira temperatura procesa te metalnog praha u komori tijekom postupka tiskanja. Najčešći način zagrijavanja komore je posredno preko radne ploče. Temperatura u komori je povišena u odnosu na okolinu kako bi unos topline laserom bio što manji. Kako bi se spriječilo nastajanje površinskih mikropukotina kao posljedica temperaturnog šoka prilikom nanošenja novog sloja praha, korisno je predgrijati i prah. [55]

Shiomi M. et al. svojim su istraživanjem zaostalih naprezanja kod selektivnog laserskog taljenja pokazali kako u odnosu na nezagrijanu komoru zagrijavanje i održavanje komore pri temperaturi od 160 °C smanjuje ukupna zaostala naprezanja za 40 %. [63]

3.3.7. *Gustoća energije*

Gustoća energije ključan je pokazatelj unosa energije u materijal, a definirana je navedenim izrazom [52]:

$$ED = \frac{P}{\text{brzina skeniranja} * \text{razmak između putanje laserske zrake} * \text{visina sloja}} \quad (1)$$

gdje je ED [J/mm^3] gustoća energije, P [W] snaga lasera, v [mm/s] brzina skeniranja, l [mm] razmak između prolaza, h [mm] visina sloja.

Brown S.G.R. et al. proučavali su utjecaj gustoće energije na kuglanje kod 316L nehrđajućeg čelika za postupak SLM. Ustanovili su da se kuglanje javlja pri niskoj ($41,81 J/mm^3$) i visokoj ($209,03 J/mm^3$) gustoći energije. Preporučena gustoća energije za njihov stroj (*Renishaw AM250*) je $125 J/mm^3$. Također su ustanovili da u uvjetima niske i visoke gustoće energije

dolazi i do izrazite poroznosti. [42] Najveća poroznost je, kao posljedica nepotpunog taljenja, kod niske gustoće energije čiji je uzrok preveliki razmak između putanje laserske zrake. [41] Kod visoke gustoće energije do poroznosti dolazi zbog zarobljenih plinova te skupljanja pri hlađenju što su ustanovili Hao et al. [64] Taha et al. [65] dalje su ustanovili da takve pore pri visokim gustoćama energije nastaju unutar sloja ili između dva sloja. Istu pojavu gdje do velike poroznosti dolazi pri niskim gustoćama energije koja zatim opada povećanjem gustoće energije te zatim ponovno raste primijetili su i kod magnezija Zhang et al. [66].

Istraživanja Simchi A. pokazala su da je gustoća (obrnuto proporcionalna poroznosti) linearno proporcionalna omjeru snage lasera i brzine skeniranja. [67] Brown S. G. R. et al. ustanovili su da s povećanjem poroznosti dolazi do smanjenja tvrdoće i obrnuto. Razlog tome je implozija pora pod pritiskom. Također pri visokoj gustoći energije tvrdoća nije jednolika po površini uslijed varijacija u brzinama zagrijavanja i hlađenja. Tvrdoća se stoga može regulirati reguliranjem unosa energije. [41]

Proučavajući utjecaj gustoće energije na kvalitetu površine, Brown S.G.R. et al. uvidjeli su da se kvaliteta površine u ovisnosti o promjeni gustoće energije ponaša isto kao i poroznost. Površina je najgrublja pri niskoj gustoći energije te njezinim povećanjem dolazi do optimalne kvalitete koja zatim ponovno opada. [41]

3.4. Pojave pri preradi

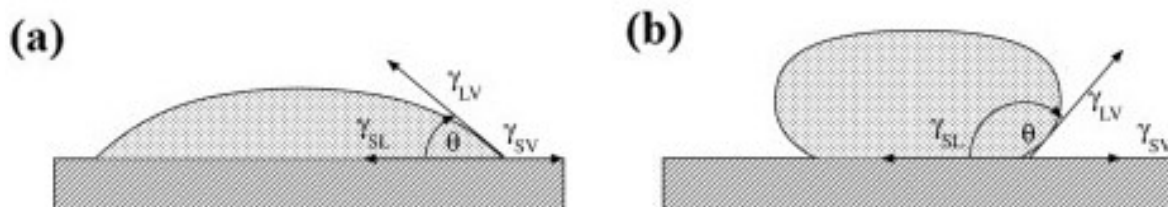
3.4.1. Oksidacija

Kada se radi o metalima, oksidacija je neželjena pojava koju se ne može spriječiti te se kao takva javlja i prilikom 3D tiskanja metala. S obzirom na to da se u postupcima SLS i SLM materijal nanosi u slojevima, oksidacija prethodnog sloja uvelike narušava međusobno povezivanje narednih slojeva. Uz delaminaciju, jedna od glavnih poteškoća koja rezultira oksidacijom je pojava kuglanja. [68]

3.4.1.1. Kuglanje (eng. Balling)

Kuglanje se javlja kao posljedica površinske napetosti te nedovoljnog vlaženja prethodnog, već očvrstnutog sloja zbog nastalog oksida na njegovoj površini. [43, 68, 69] Slika 3.7 pokazuje

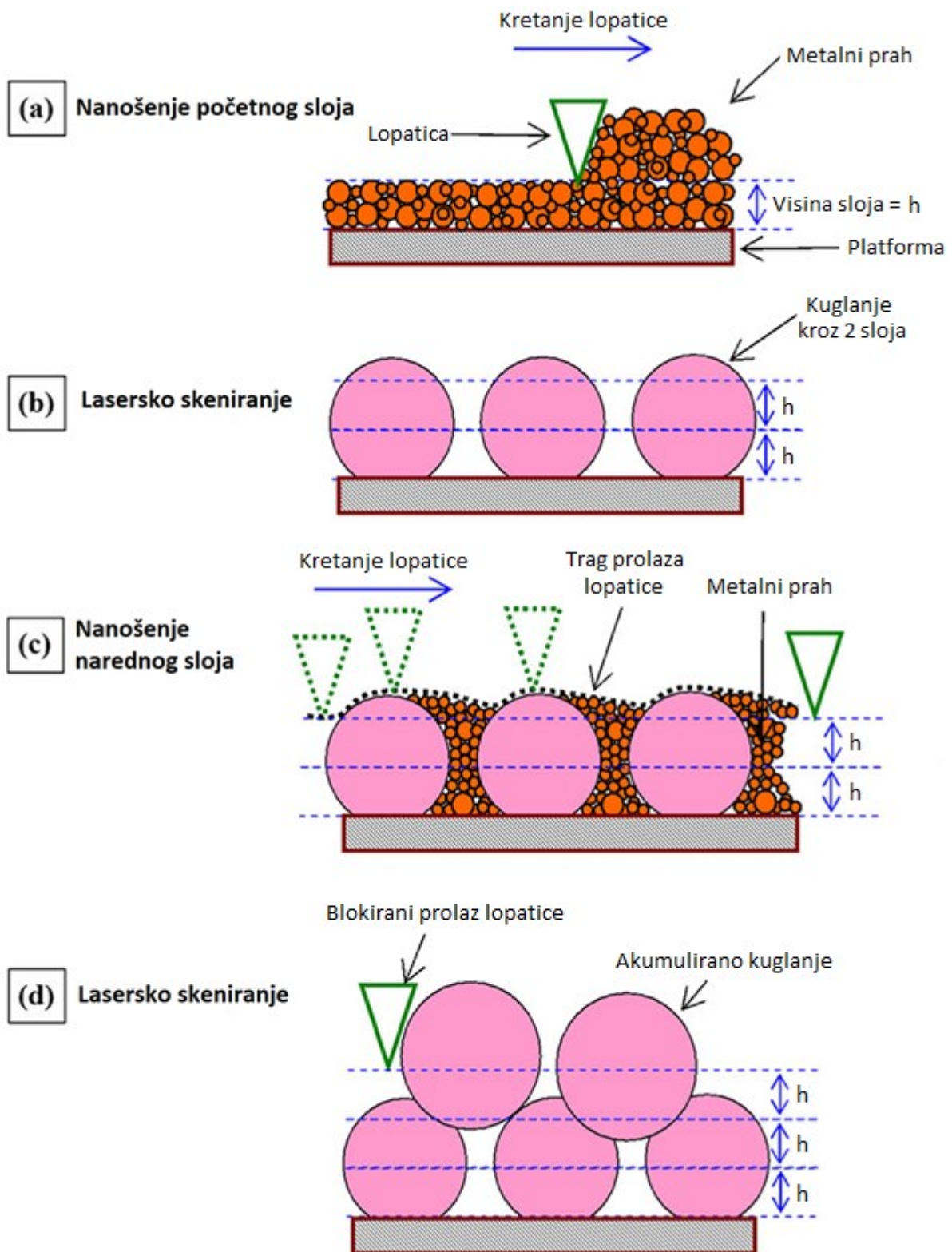
razliku između dovoljnog i nedovoljnog vlaženja prethodnog sloja. Sloj oksida onemogućuje potpuno spajanje slojeva na molekularnoj razini. [35] Pojava se manifestira formiranjem “kuglica” koje sprječavaju stvaranje kontinuiranog toka materijala.



Slika 3.7. Vlaženje prethodnog sloja: a) adekvatno i b) neadekvatno [68]

U drastičnim slučajevima dolazi do akumuliranog kuglanja gdje se “kuglice” izdižu značajno iznad visine svojeg sloja te time blokiraju ponovno nanošenje praha (slika 3.8).

Istraživanjem pojave kuglanja Li R. et al. pokazali su da održavanje razine kisika u komori ispod 0,1 % značajno smanjuje oksidaciju, a time i pojavu kuglanje. Kombiniranjem regulacije kisika s laserom visoke snage te niskom brzinom skeniranja dalje povoljno utječe na smanjenje kuglanja. [69] Istraživanje stoga pokazuje da je za dobru međuslojnu povezanost i smanjeno kuglanje nužno održavanje podtlaka ili ispunjenje komore inertnim plinom. [68]



Slika 3.8. Blokiranje ponovnog nanosa praha kao posljedica kugljanja [69]

3.5. Svojstva tvorevina

Najrasprostranjeniji metali u postupcima SLS i SLM su: željezo, titanij i nikal te najviše istraživanja svojstava provedeno je upravo na tvorevinama izrađenim od tih materijala. S obzirom na širok spektar dostupnih podataka njihovih svojstava, u ovom poglavlju će se pretežito oni i obrađivati.

3.5.1. Kvaliteta površine

Kvaliteta površine odnosi se na njezinu hrapavost i moguće ju je mjeriti. Jedna je od nedostataka ovih postupaka. Iako se tvorevina stvara sloj po sloj, međusobni slojevi na gotovoj tvorevini nisu vidljivi, no unatoč tome, površina ostane zrnata. Naknadna obrada sačmarenjem ili pjeskarenjem je u većini slučajeva poželjna. Ponovno skeniranje površine laserom po čišćenju tvorevine od preostalog praha pokazalo se kao odlična metoda poboljšanja kvalitete površine s poboljšanjem od 90 %. S ovom metodom nije potrebno vađenje tvorevine iz stroja za tiskanje već samo manja prilagodba sustava. Vrijeme izrade se znatnije ne produžuje zbog skeniranja samo površine. Kod postupka SLM, dodatna je prednost što se ponovnim taljenjem površine eliminiraju pore te stvara ljuska gotovo 100 % gustoće. Čvrsta ljuska bitna je zbog najviših naprezanja koja se u njoj javljaju. Stoga je ova metoda posebno poželjna i za dijelove podvrgnute velikim mehaničkim opterećenjima. [35]

3.5.2. Čvrstoća

Čvrstoća je svojstvo koje kod tvorevina izrađenih postupcima SLS i SLM nije diktirano isključivo materijalom. Orijentacija tvorevine u kombinaciji sa strategijom te ostalim parametrima bitno utječe na konačnu čvrstoću tvorevine. Zadovoljavajuća čvrstoća je ključna za dijelove kako bi bili primjenjivi u industriji. Uspoređivanjem svojstava tvorevine od čistog željeza nastalih postupkom SLM s lijevanima, Song B. et al. ustanovili su dvostruko nižu rasteznu čvrstoću lijevanih komada. [70] Do istih rezultata, iako manje drastičnih, došla su i istraživanja s titanijem i niklom te njihovim i željezovim legurama. Razlog više čvrstoće SLM tvorevina je zbog prirode proces gdje se vrlo mala količina materijala u svakom trenutku tali te brzo hladi i pritom očvršćuje. Takav postupak daje homogeniju mikrostrukturu tvorevine u usporedbi s lijevanjem. Pri primjeni legura homogenost, a time i čvrstoća, je izraženija zbog stvaranja uniformnog kemijskog sastava duž dijela. [71]

U tablici 3.1 prikazane su čvrstoće SLM tvorevina u usporedbi s lijevanim dijelovima izrađenih od pojedinih metala i legura.

Tablica 3.3.1. Čvrstoće najrasprostranjenijih metala u postupku SLM te njihove legure [31, 37, 70, 72-83]

Materijal	Rastezna čvrstoća [MPa]	Granica razvlačenja [MPa]	Istezanje [%]	Izvor	Rastezna čvrstoća [72] [MPa] (lijevano i popušteno)
Fe	411,5	305,3	/	[70]	225
Fe-Ni	600	/	/	[73]	/
Fe-Ni-Cr	1100	/	/	[73]	/
Fe-Ni-Cu-P	505	425	/	[74]	/
304L nehrđajući čelik	717	570	42,8	[75]	579
316L nehrđajući čelik	760	650	30,0	[31]	558
Maraging 300 čelik	1290	1214	13,3	[76]	1930
cpTi	654	522	17,0	[77]	655
Ti-6Al-4V	1250	1125	6,0	[78]	1055
Ti-6Al-7Nb	1515	1440	1,4	[79]	1000
Ti-24Nb-4Zr-8Sn	665	563	13,8	[80]	/
Inconel 625	1030	800	10,0	[81]	1000
Inconel 718	1148	907	25,9	[37]	1000
Hastelloy X	930,5	814	35,0	[82]	785
Nimonic 263	108,5	818	24,0	[83]	940

3.5.3. *Gustoća*

Relativna gustoća pojam je koji se često spominje kada se govori o kvaliteti tvorevine. Određena je kao omjer stvarne gustoće tvorevine te teoretske gustoće materijala. [35] Povećanjem gustoće smanjuje se poroznost i obrnuto. Iako se poroznost u većini slučajeva nastoji smanjiti, postoje primjene u kojima je ona poželjna. Smanjena gustoća omogućuje izradu tvorevina smanjene mase s dovoljno dobrim mehaničkim svojstvima. Xiao et al. proučavali su mogućnost upotrebe titanija za izradu implantata smanjene gustoće. Tvorevine visoke poroznosti od 70 % pokazale su zadovoljavajuća pritisna svojstva tvorevina. [84]

Konstruiranje tvorevina smanjene gustoće zahtjevan je proces te je nužna provedba raznih simulacija s ciljem optimiranja strukture za postizanje najviših vrijednosti željenog svojstva. [85]

Pore u unutrašnjosti tvorevine su šupljine koje nastaju zbog prirode procesa izrade. Osim takvih nenamjernih šupljina, u unutrašnjoj strukturi tvorevine moguće je ciljano postaviti šupljine definiranih geometrijskih oblika. Takvom izradom stvara se nehomogeni dio s kompleksnom unutarnjom rešetkom kojom se nastoji smanjiti gustoća gdje je to potrebno uz istovremeno očuvanje povoljnih mehaničkih svojstava. Prvo istraživanje o svojstvima takvih rešetki proveli su Santorinaios M. et al. podvrgavajući ispitna tijela pritisnim i smičnim ispitivanjima. [85]

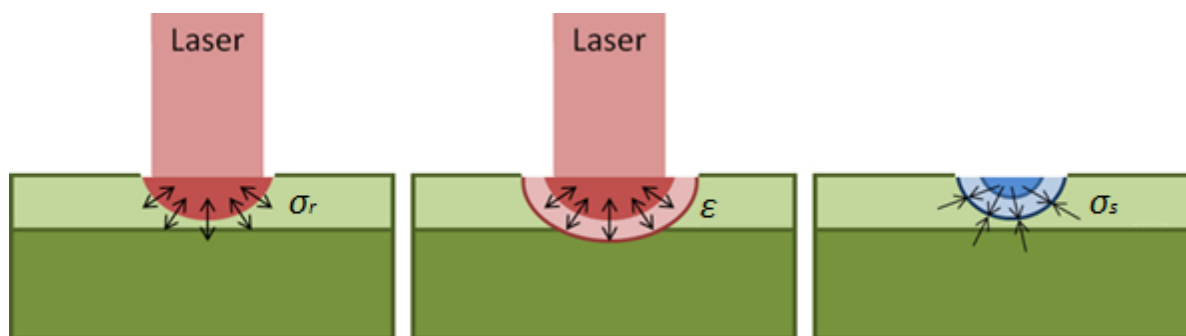
Relativne gustoće često korištenih materijala prikazane su u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Relativne gustoće najrasprostranjenijih metala u SLS i SLM postupcima te njihove legure [38, 48, 65, 72-74, 78-80, 82, 83, 86-98]

Materijal	Najviša postignuta relativna gustoća [%]	Izvor
Fe	99,00	[72]
Fe + 0,8 % C	93,00	[86]
Fe-Al intermetali	98,00	[87]
Fe ₃ Al	99,50	[88]
Fe-Ni	98,00	[73]
Fe-Ni-Cr	99,50	[73]
Fe-Ni-Cu-P	97,50	[74]
304L nehrđajući čelik	92,00	[89]
316L nehrđajući čelik	99,90	[38]
316L nehrđajući čelik	99,95 (duplo skenirani)	[48]
H13 alatni čelik	90,00	[90]
H20 alatni čelik	99,50	[91]
M2 brzorezni čelik	97,00	[92]
Maraging 300 čelik	99,99	[93]
Visokouglični čelik	92,00	[65]
cpTi	99,50	[94]
cpTi	99,90 (u podtlaku)	[95]
Ti-6Al-4V	99,98	[78]
Ti-6Al-7Nb	99,95	[79]
Ti-24Nb-4Zr-8Sn	99,50	[80]
Inconel 625	98,50	[96]
Inconel 718	99,98	[97]
Chomel	88,00	[98]
Hastelloy X	99,50	[82]
Nimonic 263	99,70	[83]

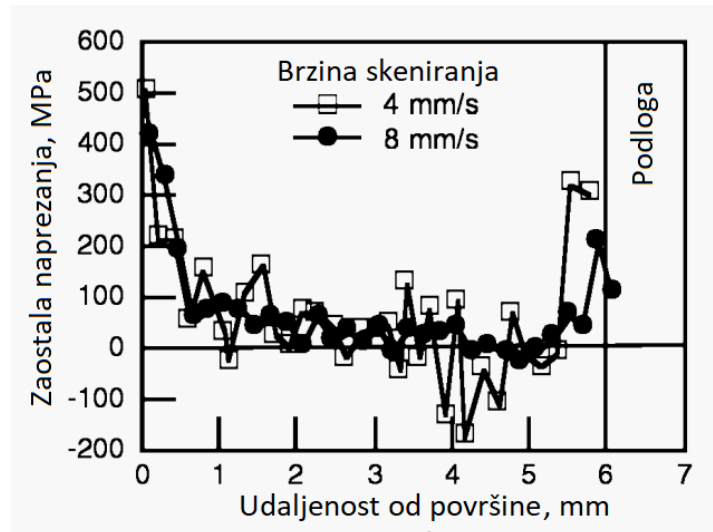
3.5.4. Zaostala naprezanja

Do zaostalih naprezanja dolazi zbog brzih promjena temperature (zagrijavanje/hlađenje) prilikom postupka tiskanja [69]. Slika 3.9 prikazuje tijekom nastajanja zaostalih naprezanja pri tiskanju postupkom SLM. Takva naprezanja su neželjena zbog toga što dovode do nastajanja pukotina (slika 3.11).



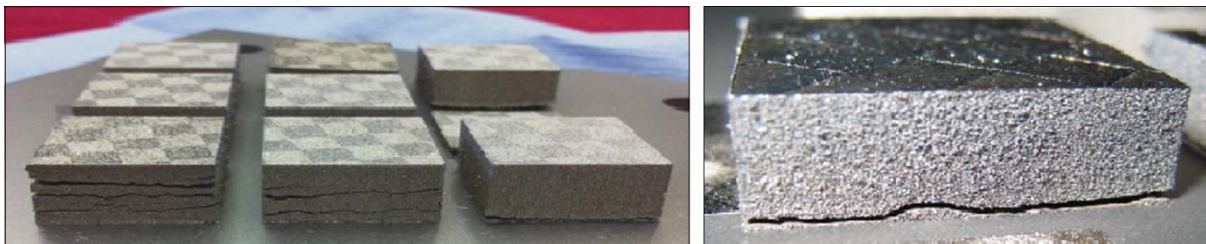
Slika 3.9. Formiranje zaostalih naprezanja zbog zagrijavanja i širenja te posljedičnog hlađenja i skupljanja [69]

Shiomi et al. proučavanjem zaostalih naprezanja pokazali su raspodjelu naprezanja po presjeku te ustanovili da su najviša naprezanja u rubnim slojevima (slika 3.10). Predložili su tri načina njihova smanjenja. Osim prethodno spomenutog zagrijavanja komore koje je dalo najmanje smanjenje od 40 %, ponovnim skeniranjem sloja s istim parametrima postignuto je veće smanjenje zaostalih naprezanja u iznosu od 50 %. Najveće smanjenje od 70 % postignuto je toplinskom obradom pri 600 °C i 700 °C u trajanju od 1 h. Metalni prah koji su primijenili za svoje istraživanje je krom molibden čelik pomiješan s prahovima nikla i bakrovog fosfata. [35]



Slika 3.10. Raspodjela naprezanja po presjeku [35]

Iako se u ovom radu obrađuje 3D tisak metala, potrebno je spomenuti istraživanje Hagedorn Y. C. et al. Njihova grupa proučavala je upotrebu keramičkih kompozita u postupku SLM. Takvi kompoziti su zbog svoje visoke tvrdoće posebno osjetljivi na zaostala naprezanja, stoga bi se metoda njihova smanjivanja mogla potencijalno primijeniti i na metale. Hagedorn Y. C i njegov tim uspješno su smanjili zaostala naprezanja te time i pojavu pukotina primjenom dva lasera. Prvi predgrijava prah na 1600 °C nakon čega ga drugi laser tali. [99]

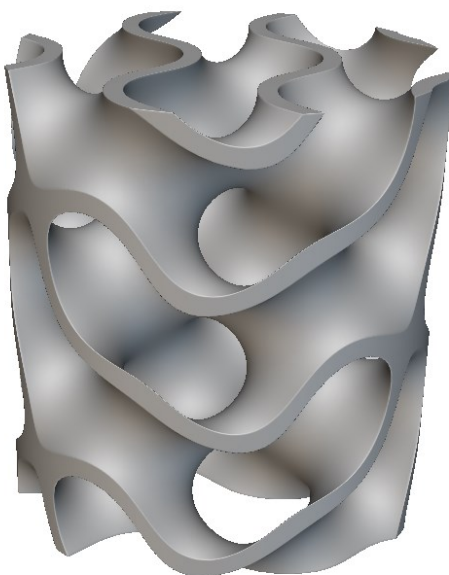


Slika 3.11. Pukotine i delaminacija nastali uslijed zaostalih naprezanja [69]

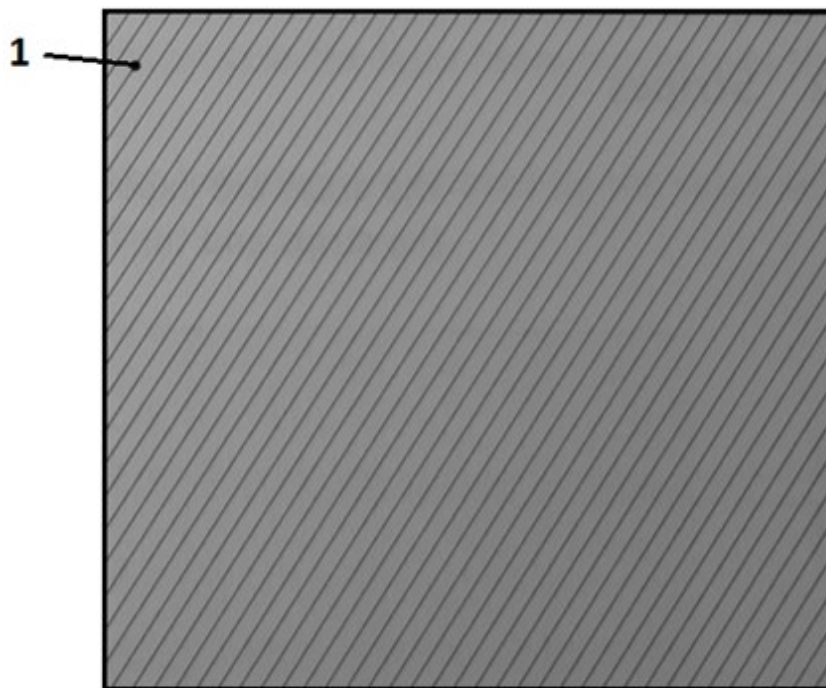
4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Parametri izrade te svojstva materijala

Unatoč velikom broju parametara prerade kod elektivnog laserskog srašćivanja metala u suradnji s tvrtkom *Metalska jezgra Čakovec* odlučeno je da će se ispitati utjecaj strategije skeniranja na mehanička svojstva metalnih tvorevina. Za potrebe ispitivanja utjecaja strategije skeniranja kod postupka SLS na mehanička svojstva tiskanih tvorevina, u suradnji s *Metalskom jezgrom Čakovec*, izrađene su dvije skupine tvorevina različitim strategijama skeniranja. Radi dubljeg ispitivanja mogućnosti ovog postupka, za geometriju tvorevine odabrana je ćelijasta struktura (slika 4.1). Dvije strategije koje se ispituju su “NoPattern“ i “Stripes“, prikazane su na slikama 4.2 i 4.3. Kod strategije “NoPattern“ laser srašćuje pravocrtno po cijeloj dužini presjeka tvorevine. Strategija skeniranja “Stripes“ odnosi se na srašćivanje u prugama. Laser srašćuje pravocrtno po dužini presjeka u segmentima, odnosno prugama s međusobnim preklapanjem. Širina pruge iznosi 8 mm, dok je preklapanje 0,02 mm.

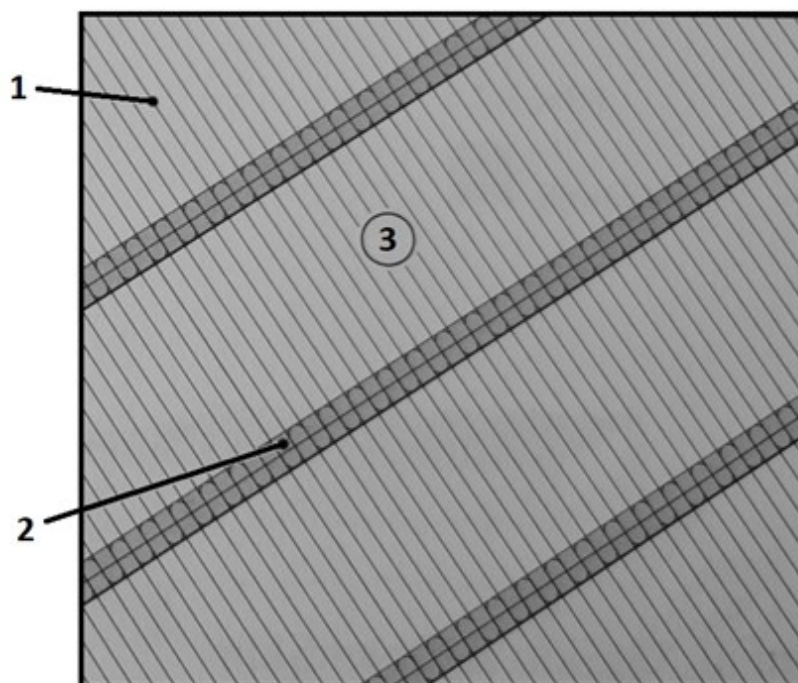


Slika 4.1. 3D CAD model



1 - sredina prolaza laserske zrake

Slika 4.2. "NoPattern" strategija skeniranja [101]



1 - put prolaza laserske zrake
2 - širina pruge
3 - preklapanje pruga

Slika 4.3. "Stripes" strategija skeniranja [101]

Zbog ćelijaste strukture tvorevina ispitivanje je provedeno sljedeći normu ISO 13314:2011. Prema normi ISO 13314:2011, tvorevine su oblika valjaka promjera 32 mm te visine 35 mm (1 : 1,1). 3D CAD model rađen je pomoću *nTopology* softvera. Struktura valjaka je žiroidna bez vanjske opne s veličinom ćelije 20 x 20 x 20 mm te debljine stijenki 2 mm.

Na slici 4.4 prikazana je gotova tvorevina izrađena postupkom DMLS na 3D pisaču *EOS M 290*.



Slika 4.4. Izrađena tvorevina

Prema normi ISO 13314:2011, za potrebe ispitivanja tlačne čvrstoće, postupkom DMLS na 3D pisaču *EOS M 290*, izrađene su dvije skupine tvorevina. Za ponovljivost rezultata ispitivanja načinjena su 3 ispitna tijela po skupini. *EOS M 290* ima Yb (iterbij) stakleni laser maksimalne snage 400 W s promjerom žarišta zrake 100 μm . Sukladno navedenim parametrima u poglavlju 3.3, ostali parametri prerade prikazani su u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Parametri prerade

	Skupina "NoPattern"			Skupina "Stripes"		
	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2	Ispitno tijelo 3	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2	Ispitno tijelo 3
Snaga lasera [W]	370					
Brzina skeniranja [mm/s]	1210					
Razmak između putanje laserske zrake [mm]	8					
Visina sloja [μm]	60					
Strategija skeniranja	NoPattern			Stripes		
Temperatura komore [$^{\circ}\text{C}$]	100					
Gustoća energije [J/mm^3]	33,98					

Tvorevine su izrađene s prahom aluminijske legure AlSi10Mg. Svojstva tiskanih i popuštenih tvorevina prema proizvođaču navedena su u tablici 4.2, a kemijski sastav legure u tablici 4.3.

Tablica 4.2. Svojstva AlSi10Mg prema proizvođaču metalnog praha Heraeus [100]

Svojstvo	Iznos (3D tiskano i popušteno)
Gustoća [g/cm^3]	2,67
Rastezna čvrstoća [MPa]	> 370
Granica razvlačenja [MPa]	> 200
Youngov modul [GPa]	> 65
Istezanje [%]	< 7

Tablica 4.3. Kemijski sastav AlSi10Mg prema proizvođaču metalnog praha Heraeus [100]

Kemijski element	Maseni udio [%]
Al	ostatak (do 100 %)
Si	9-11
Mg	0,2-0,45
Fe	max. 0,55
Cu	max. 0,05
Mn	max. 0,45
Zn	max. 0,1
Ti	max. 0,15
Ni	max. 0,05
Pb	max. 0,05
Sn	max. 0,05

Aritmetičke sredine stvarnih mjerenih dimenzija navedene su u tablici 4.4. Mjerenje je provedeno pomoću pomičnog mjernog uređaja. Prosječna nosiva površina presjeka po visini ispitnog tijela iznosi 136,82 mm².

Tablica 4.4. Srednja vrijednost izmjerenih dimenzija tvorevina

	NoPattern			Stripes		
	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2	Ispitno tijelo 3	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2	Ispitno tijelo 3
Promjer [mm]	31,86 ± 0,31	32,19 ± 0,09	32,09 ± 0,14	32,11 ± 0,14	31,92 ± 0,22	32,05 ± 0,10
Visina [mm]	35,25 ± 0,04	35,24 ± 0,12	35,31 ± 0,11	35,10 ± 0,03	35,22 ± 0,17	35,31 ± 0,15
Debljina stijenke [mm]	1,83 ± 0,02	1,62 ± 0,13	1,65 ± 0,09	1,63 ± 0,07	1,59 ± 0,06	1,55 ± 0,09

4.2. Ispitivanje

Tlačno ispitivanje određeno je normom ISO 13314:2011 za ispitivanje tlačne čvrstoće poroznih i ćelijastih metala. Ispitivanje je provedeno na univerzalnoj kidalici *Shimadzu AG-X* maksimalne sile 300 kN pri sobnoj temperaturi 22 °C.

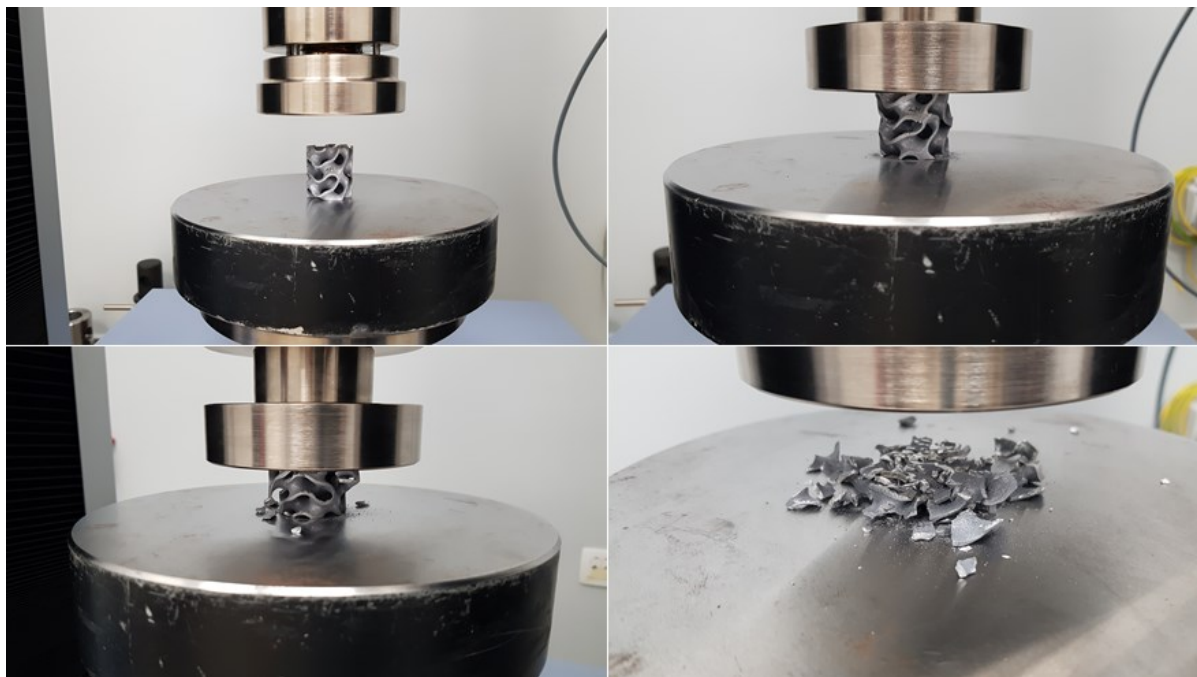
Brzina ispitivanja je konstantna te ovisi o brzini deformacije čiji iznos, definiran normom, je u intervalu 10^{-2} - 10^{-3} s⁻¹. Definirana je sljedećim izrazom [103]:

(2)

$$v_d = v_t \times L_0$$

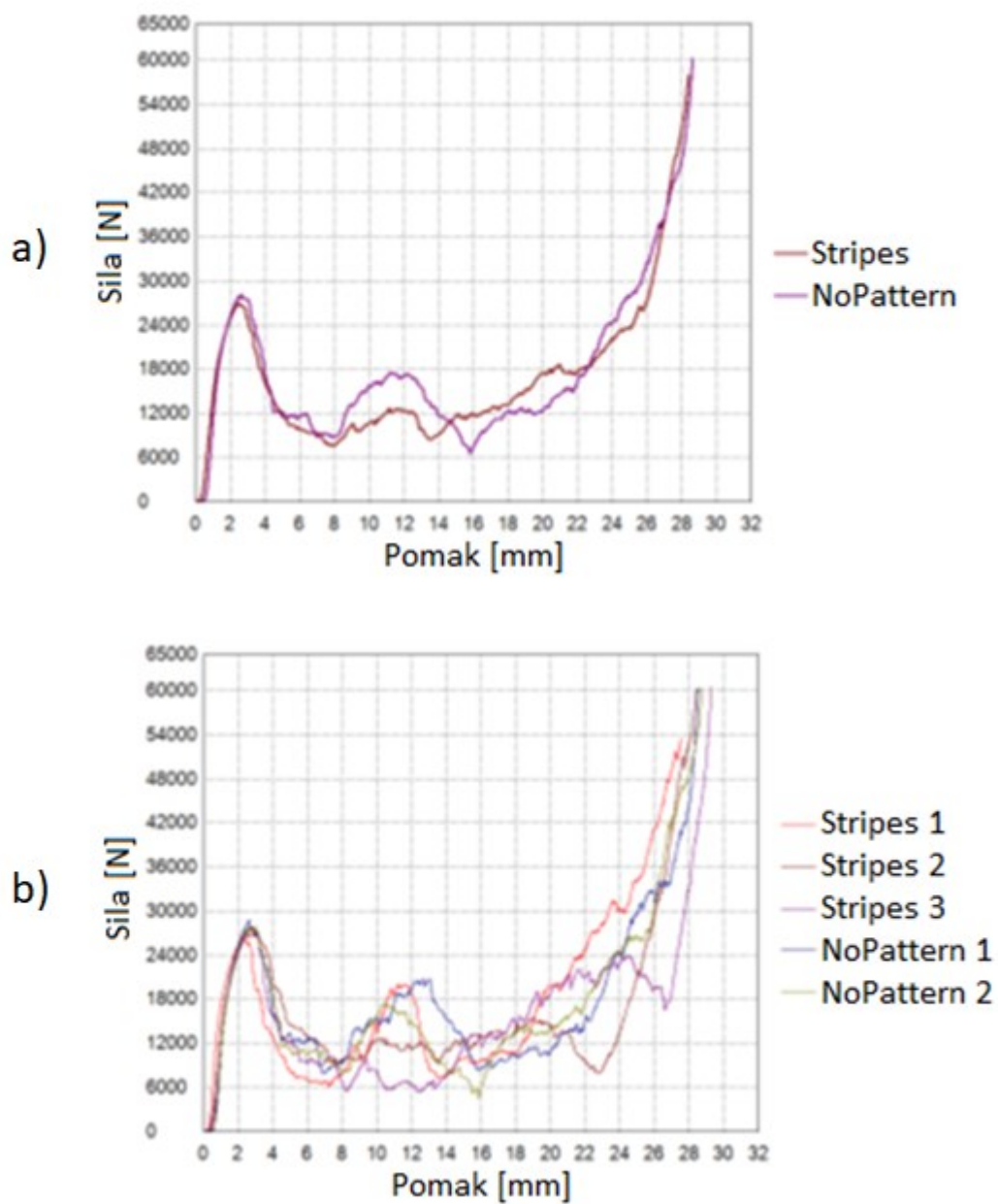
gdje je v_t [s⁻¹] brzina ispitivanja, v_d [mm/s] brzina deformacije te L_0 [mm] početna visina ispitnog tijela.

Za izračun se primjenjuje srednja vrijednost svih početnih visina ispitnih tijela te ona iznosi 35,24 mm. Pri brzini deformacije 10^{-2} s⁻¹ određena je najviša brzina ispitivanja te iznosi 0,35 mm/s (21 mm/min), dok je pri brzini deformacije 10^{-3} s⁻¹ određena najniža brzina ispitivanja koja iznosi 0,035 mm/s (2,1 mm/min). Ispitivanje je provođeno pri brzini ispitivanja 0,33 mm/s (20 mm/min). Kidalica je zaustavljena pri dostizanju sile 60 kN sukladno ponašanju samog ispitnog tijela i njegovog loma. Tijek ispitivanja prikazan je na slici 4.5.



Slika 4.5. Tijek ispitivanja

Dijagrami ispitnih krivulja prikazani su na slici 4.6. Srednja sila kod ispitnih tijela izrađenih sa strategijom skeniranja "NoPattern" iznosi 28117 ± 453 N, dok je srednja sila kod strategije skeniranja laserom "Stripes" 27123 ± 529 N. Pri pomaku od 3 mm kod obje skupine ispitnih tijela dolazi do naglog popuštanja materijala i početku trganja ćelijaste strukture. Pri pomaku od 22 mm dolazi do potpunog lomljenja strukture i sabijanje materijala te bez prekidanja ispitivanja, pritisna sila bi dosegla maksimalnu silu kidalice.



Slika 4.6. Dijagram pritiska sila – pomak: a) krivulje srednjih vrijednosti pojedine skupine; b) sva ispitna tijela

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu uspješno je provedeno ispitivanje pritisnih svojstava u ovisnosti o strategiji skeniranja laserske zrake metalnog praha. U slučaju ćelijaste strukture žiroidnog oblika ispitnih tijela bez vanjske opne, ispitivanje je pokazalo da strategija nema značajnog utjecaja na pritisna svojstva tvorevine. Izradom ovakvih ćelijastih struktura smanjuje se masa tvorevine i potreban materijal za izradu što je financijski povoljno. Unatoč dobivenim rezultatima, svakako se otvaraju vrata daljnjem istraživanju žiroidne ćelijaste strukture s posebnom pažnjom na veličinu ćelije, debljinu stijenke te utjecaju vanjske opne ali i podešavanju drugih parametara prerade na pritisna svojstva tvorevine.

LITERATURA

- [1] <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-electron-beam-melting-ebm#:~:text=In%20EBM%2C%20a%20high%2Denergy,not%20require%20a%20vacuum%20environment>, 11.12.2021.
- [2] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-powder-bed-fusion>, 10.12.2021.
- [3] <https://3dprinting.com/metal/types-of-metal-3d-printing/>, 10.12.2021.
- [4] <https://www.meddeviceonline.com/doc/world-s-first-d-printed-titanium-cranial-implant-cleared-by-fda-0001>, 10.12.2021.
- [5] <https://www.3dnatives.com/en/boeing-777x-300-3d-printed-parts-290120205/#!>, 10.12.2021.
- [6] <https://www.ge.com/news/reports/worlds-first-plant-to-print-jet-engine-nozzles-in>, 10.12.2021.
- [7] <https://www.turbodynamics.co.uk/media/blog/3d-printed-turbocharger>, 10.12.2021.
- [8] <https://www.digitalengineering247.com/article/koenigsegg-harnesses-additive-manufacturing-for-the-one1/>, 10.12.2021.
- [9] <https://www.additivalab.com/laser-sintering-vs-laser-melting/>, 10.12.2021.
- [10] Deckard C. R., Method and apparatus for producing parts by selective sintering, U.S. Patent 4,863,538, 5.9.1989.
- [11] Dewidar M., Lim J.K., Dalgarno K., A Comparison between Direct and Indirect Laser Sintering of Metals, Journal of Materials Science and Technology, 24(2), 2008.
- [12] Liu B., Bai P., Li Y., Post Treatment Process and Selective Laser Sintering Mechanism of Polymer-Coated Mo Powder, The Open Materials Science Journal, 5, 194-198, 2011.
- [13] Gokuldoss P. K., Kolla S., Eckert J., Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines, 2017.
- [14] <https://www.exone.com/en-US/resources/case-studies/what-is-binder-jetting>, 11.12.2021.
- [15] <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal>, 11.12.2021.

- [16] Friel R. J., Power ultrasonics for additive manufacturing and consolidating of materials, Power Ultrasonics - Applications of High-Intensity Ultrasound: 313-335, 2015.
- [17] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/directed-energy-deposition>, 12.12.2021.
- [18] <https://www.youtube.com/watch?v=yKnImfuMSgo>, 12.08.2022.
- [19] Hassanin H., Jiang K., Fabricating functionally graded ceramic micro-components using soft lithography, Advances in Ceramic Matrix Composites: 611-623, 2014.
- [20] <https://www.3deo.co/featured/metal-3d-printing-processes-metal-extrusion-fff-fdm/>, 14.12.2021.
- [21] Gonzales-Gutierrez J., Arbeiter F., Schlauf T., Kukla C., Holzer C., Tensile properties of sintered 17-4PH stainless steel fabricated by material extrusion additive manufacturing, Materials Letters 248:165-168, 2019.
- [22] <https://ceas.uc.edu/research/centers-labs/micro-and-nano-manufacturing-laboratory/research/electrochemical-additive-manufacturing.html>, 12.08.2022.
- [23] Brant A. M., Sundaram M., A Fundamental Study of Nano Electrodeposition Using a Combined Molecular Dynamics and Quantum Mechanical Electron Force Field Approach, Procedia Manufacturing, 10, 253-264, 2017.
- [24] <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-digital-light-processing-dlp>, 14.12.2021.
- [25] <https://www.nasa.gov/topics/technology/features/ebf3.html>, 14.12.2021.
- [26] <https://www.sme.org/technologies/articles/2011/masters-of-manufacturing-carl-r.-deckard-phd/>, 18.12.2021.
- [27] <https://www.hisour.com/selective-laser-melting-40644/>, 18.12.2021.
- [28] Wilhelm M., Konrad W., Andres G., Shaped body especially prototype or replacement part production, Patent DE 19649865, 12.2.1998.
- [29] Slotwinski J. A., Garboczi E. J., Stutzman P. E., Ferraris C. F., Watson S. S., Peltz M. A., Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 119:460-493, 2014.K.S. Narasimhan, M.O.H. Amuda, Powder Characterization, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2017.
- [30] Dawes J., Bowerman R., Trepleton R., Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain, Johnson Matthew Technology Review, 59(3):243-256, 2015.

- [31] Liu B., Wildman R., Tuck C., Ashcroft I., Hague R., Investigation the effect if particle size distribution on processing parameters optimisation in selective laser melting process, *Materials Science*, pp. 227–238, 2011.
- [32] Das S., *Physical Aspects of Process Control in Selective Laser Sintering of Metals*, Advanced Engineering Materials, 2003.
- [33] <http://www.mt-innov.com/index.php?ac=article&at=list&tid=14>, 18.12.2021
- [34] Baskoro A. S., Supriadi S., Dharmanto D., Review on Plasma Atomizer Technology for Metal Powder, *MATEC Web of Conferences*, 2019.
- [35] Shiomi M., Osakada K., Nakamura K., Yamashita T., Abe F., Residual Stress within Metallic Model Made by Selective Laser Melting Process, *CIRP Annals* 53[1]:195-198, 2004.
- [36] Goodridge R., Ziegelmeier S., Powder bed fusion of polymers - Laser and scan parameters, *Laser Additive Manufacturing*, 181-204, 2017.
- [37] Kruth J. P., Mercelis P., Vaerenbergh J. V., Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 26–36, 2005.
- [38] Wright C. S., Youseffi M., Akhtar S. P., Childs T. H. C., Hauser C., Fox, P., Xie J., Selective Laser Melting of Prealloyed High Alloy Steel Powder Beds, *Materials Science Forum* 514-516:516–523, 2006.
- [39] Savalani M. M., Hao L., Harris R. A., Evaluation of CO₂ and Nd: YAG lasers for the selective laser sintering of HAPEX, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture* 220(2), 2006.
- [40] Tolochko N. K., Laoui T., Khlopkov Y. V., Mozzharouv S. E., Titov V. I., Ignatiev M.B., Absorptance of powder materials suitable for laser sintering, *Rapid Prototyping Journal*, 6(3), 155–160, 2000.
- [41] Simchi A., Direct laser sintering of metal powders Mechanism, kinetics and microstructural features, *Materials science and engineering A* 428:148-158, 2006.
- [42] Brown S. G. R., Cherry J. A., Davies H. M., Mehmood S., Investigation into the Effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 76:869-879, 2014.
- [43] Zhang B., Liao H., Coddet C., Effects of processing parameters on properties of selective laser melting Mg–9%Al powder mixture. *Materials and Design* 34:753–758, 2012.

- [44] Yi J. H., Kang J. W., Wang T. J., Wang X., Hu Y. Y., Feng T., Feng Y. L., Wu P. Y., Effect of laser energy density on the microstructure, mechanical properties, and deformation of Inconel 718 samples fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds* 786:481–488, 2019.
- [45] Spierings A. B., Herres N., Levy G., Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts, *Rapid Prototyping Journal* 17:195–202, 2011.
- [46] Whenish R., Optimization of process parameters in selective laser sintering, *International Conference on Sustainable manufacturing*, 2020.
- [47] Yasa E., Deckers J., Kruth J. P., The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts, *Rapid Prototyping Journal* 17(5):312–327, 2011.
- [48] Liu C.Y. , Tong J. D., Jiang M. G., Chen Z. W., Xu G., Liao H. B., Wang P., Wang X. Y., Xu M., Lao C. S., Effect of scanning strategy on microstructure and mechanical properties of selective laser melted reduced activation ferritic/martensitic steel, *Materials Science Engineering: A* 766, 2019.
- [49] Carter L. N., Martin C., Withers P. J., Attallah M. M., The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds* 615:338–347, 2014.
- [50] Yadroitsev I., Smurov I., Selective laser melting technology: from the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape, *Physics Procedia* 5:551–560, 2010.
- [51] Han Q., Gu H., Setchi R., Discrete element simulation of powder layer thickness in laser additive manufacturing, *Powder Technology*, 352, 91-102, 2019.
- [52] Shipley H., McDonnell D., Culleton M., Coull R., Lupoi R., O'Donnell G., Trimble D., Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 128:1–20, 2018.
- [53] Zhang W., Tong M., Harrison N. M., Scanning strategies effect on temperature, residual stress and deformation by multi-laser beam powder bed fusion manufacturing. *Additive Manufacturing*, 36, 2020.
- [54] Jia H., Hua S., Wang H, Wu Y., Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 113(5637), 2021.

- [55] Hagedorn Y. C., Wilkes J., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R., Net Shaped High Performance Oxide Ceramic Parts by Selective Laser Melting, *Physics Procedia* 5:587-594, 2010.
- [56] Zhang C., Zhu H., Hu Z., Zhang L., Zeng X., A comparative study on single-laser and multi-laser selective laser melting AlSi10Mg: defects, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A* 746:416–423., 2019.
- [57] Stamp R., Fox P., O'Neill W., Jones E., Sutcliffe C., The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 20:1839–1848, 2009.
- [58] Huang S., Yeong W. Y., Laser re-scanning strategy in selective laser melting for part quality enhancement: A review, *Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing*: 413–419, 2018.
- [59] Nandwana P., Lee Y., Influence of scan strategy on porosity and microstructure of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam powder bed fusion, *Materials Today Communications* 24, 2020.
- [60] Gustmann T., Neves A., Kühn U., Gargarella P., Kiminami C. S., Bolfarini C., Eckert J., Pauly S., Influence of processing parameters on the fabrication of a Cu-Al-Ni-Mn shape-memory alloy by selective laser melting, *Additive Manufacturing* 11:23–31, 2016.
- [61] Yasa E., Kruth J. P., Microstructural investigation of selective laser melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting, *Procedia Engineering* 19:389–395, 2011.
- [62] Gu D., Shen Y., Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials and Design* 30(8):2903–2910, 2009.
- [63] Yasa E., Deckers J., Kruth J. P., Rombouts M., Luyten J., Investigation of sectoral scanning in Selective Laser Melting, *ASME Conference on Engineering Systems, Design and Analysis*, 2010.
- [64] Brown S. G. R., Cherry J. A., Davies H. M., Mehmood S., Investigation into the Effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 76:869-879, 2014.
- [65] Taha M. A., Yousef A. F., Gany K. A. and Sabour H. A., On selective laser melting of ultra high carbon steel: effect of scan speed and post heat treatment, *Materialwiss Werkstofftech* 43(11):913-923, 2012.

- [66] Zhang B., Coddet C., Effects of processing parameters on properties of selective laser melting Mg–9% Al powder mixture, *Materials and design* 34:753-758, 2012.
- [67] H. Gu, H. Gong, D. Pal, K. Rafi, T. Starr, B. Stucker, Influences of Energy Density on Porosity and Microstructure of Selective Laser Melted 17-4PH Stainless Steel for 24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2013.
- [68] Hao L., Dadbakhsh S., Seaman O. and Felstead M., Selective laser melting of a stainless steel and hydroxyapatite composite for load-bearing implant development, *Journal of materials processing technology* 209:5793-5801, 2009.
- [69] Li R., Liu J., Shi Y., Wang L., Jiang W., Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process, 2012.
- [70] Yap C. Y., Chua K. Z., Dong Z. L., Liu Z. H., Zhang D. Q., Loh L. E., Sing S. L., Review of selective laser melting: Materials and applications, *Applied Physics Reviews* 2(4):041101, 2015.
- [71] Rombouts M., Kruth J. P., Froyen L., Mercelis P., Fundamentals of Selective Laser Melting of alloyed steel powders, *CIRP Annals* 55[1]:187–192, 2006.
- [72] Guan K., Wang Z., Gao M., Li X., Zeng X., Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel, *Materials & Design* 50:581-586, 2013.
- [73] <https://www.asminternational.org>, 12.08.2022.
- [74] Wang Y., Bergstrom J., Burman C., Thermal fatigue behavior of an iron-based laser sintered material, *Materials Science and Engineering A* :513–514, 64–71, 2009.
- [75] Abd-Elghany K., Bourell D. L., Property evaluation of 304L stainless steel fabricated by selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal* 18: 420–428, 2012.
- [76] Kempen K., Yasa E., Thijs L., Kruth J. P., Van Humbeeck J., Microstructure and mechanical properties of Selective Laser Melted 18Ni-300 steel, *Physics Procedia* 12[A]:255-263, 2011.
- [77] Barbas A., Bonnet A. S., Lipinski P., Pesci R., Dubois G.. Development and mechanical characterization of porous titanium bone substitutes, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 9:34–44, 2012.
- [78] Yadroitsev I., Gusarov A., Yadroitsava I., Smurov I., Single track formation in selective laser melting of metal powders, *Journal of Materials Processing Technology* 210[12]:1624–1631, 2010.

- [79] Chlebus E., Kuznicka B., Kurzynowski T., Dybala B., Microstructure and mechanical behaviour of Ti—6Al—7Nb alloy produced by selective laser melting, *Materials Characterization* 62[5]:488–495, 2011.
- [80] L. C. Zhanga, D. Klemm, J. Eckert, Y. L. Hao, T.B., Sercombe, Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti—24Nb—4Zr—8Sn alloy, *Scripta Materialia* 65:21–24, 2011.
- [81] Das S., Wohlert M., Beaman J. J., Bourell D. L., Producing Metal Parts with Selective Laser Sintering/Hot Isostatic Pressing *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society* 50:17–20, 1998.
- [82] Wang Z., Guan K., Gao M., Li X., Chen X., Zeng X., The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds* 513:518–523, 2012.
- [83] T. Vilaro, C. Colin, J. D. Bartout, L. Naze, and M. Sennour, Microstructural and mechanical approaches of the selective laser melting process applied to a nickel-base superalloy, *Materials Science and Engineering: A*, A:534, 446–451, 2012.
- [84] Santorinaios M., Brooks W., Sutcliffe C. J., Mines R. A. W., Crush behaviour of open cellular lattice structures manufactured using selective laser melting, *High Performance Structures and Materials*, WIT Transactions on the Built Environment 85:481–490, 2006.
- [85] Song B., Dong S., Deng S., Liao H., and Coddet C., Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting, *Optical & Laser Technology* 56:451–460, 2014.
- [86] Wohlers T., Caffrey T., Wohlers report 2015 : 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report
- [87] Song B., Dong S. J., Coddet P., Liao H. L., Coddet C., Fabrication and microstructure characterization of selective laser-melted FeAl intermetallic parts, *Surface and Coatings Technology* 206[22]:4704–4709, 2012.
- [88] Rolink G., Vogt S., Senčekova L., Weisheit A., Poprawe R., Palm M., Laser metal deposition and selective laser melting of Fe–28 at.% Al, *Journal of Materials Research* 29:2036–2043, 2014.
- [89] Sustarsic B, Dolinsek S, Jenko M, Leskovsek V (2009) Microstructure and Mechanical Characteristics of DMLS Tool-inserts. *Materials and Manufacturing Processes* 24(7–8):837–841, 2009.

- [90] Tolosa I., Garciandia F., Zubiri F., Zapirain F., Esnaola A., Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by “selective laser melting”, following different manufacturing strategies, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 51:639–647, 2010.
- [91] Milovanović J., Stojković M., Trajanović M., Rapid tooling of tyre tread ring mould using direct metal laser sintering, *Journal of Scientific and Industrial Research* 68(12):1038-1042, 2009
- [92] Z. H. Liu, D. Q. Zhang, C. K. Chua, K. F. Leong, Crystal structure analysis of M2 high speed steel parts produced by selective laser melting, *Materials Characterization* 84:72–80, 2013.
- [93] Casavola C., Campanelli S. L., Pappalettere C., Preliminary investigation on the residual strain distribution due to the Selective Laser Melting Process, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 44[1]:93–104, 2009.
- [94] Gu D. D., Hagedorn Y. C., Meiners W., Meng G. B., Batista R. J. S., Wissenbach K., Poprawe R., Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium, *Acta Materialia* 60[9]:3849–3860, 2012.
- [95] Zhang B. C., Liao H. L., Coddet C., Corrigendum to “Selective laser melting commercially pure Ti under vacuum” [*Vacuum* 95:25–29, 2013.], *Vacuum* 152, 2013.
- [96] Vandenbroucke B., Kruth J. P., Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts, *Rapid Prototyping Journal* 13[4]:196–203, 2007.
- [97] Sanz C., Navas V. G., Structural integrity of direct metal laser sintered parts subjected to thermal and finishing treatments, *Journal of Materials Processing Technology* 213[12]:2126–2136, 2013.
- [98] Osakada K., Shiomi M., Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46[11]:1188–1193, 2006.
- [99] Wang F., Mechanical property study on rapid additive layer manufacture Hastelloy X alloy by selective laser melting technology, *Int J Adv Manuf Technol* 58:545–551, 2012.
- [100] Xiao D., Yang Y., Su X., Wang D., Sun J., An integrated approach of topology optimized design and selective laser melting process for titanium implants materials, *Bio-medical Materials and Engineering* 23(5):433-45, 2013.
- [101] www.heraeus.com, 11.09.2022.

[102] Priručnik za EOS M 290 3D tiskač, Strategije skeniranja

[103] Priopćenje Bidyapati Mishra, Indian Institute of Technology Bombay,
www.researchgate.net, 19.09.2022.

PRILOZI

I. Tablica svih izmjerenih dimenzija ispitnih tijela

	Skupina "NoPattern"			Skupina "Stripes"		
	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2	Ispitno tijelo 3	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2	Ispitno tijelo 3
Promjer [mm]	32,15	32,20	31,85	32,10	31,60	31,95
	31,90	32,20	32,25	32,20	32,10	31,90
	31,45	32,10	32,20	32,30	31,70	32,10
	32,25	32,35	32,10	32,05	32,10	32,15
	31,55	32,10	32,05	31,90	32,10	32,15
\bar{x}	31,86	32,19	32,09	32,11	31,92	32,05
s	0,31	0,09	0,14	0,14	0,22	0,10
Visina [mm]	35,30	35,20	35,40	35,10	35,10	35,50
	35,30	35,35	35,25	35,05	35,05	35,05
	35,25	35,40	35,15	35,15	35,45	35,30
	35,20	35,20	35,30	35,10	35,10	35,30
	35,20	35,05	35,45	35,10	35,40	35,40
\bar{x}	35,25	35,24	35,31	35,10	35,22	35,31
s	0,04	0,12	0,11	0,03	0,17	0,15
Debljina stijenke [mm]	1,85	1,50	1,70	1,60	1,60	1,45
	1,80	1,65	1,60	1,60	1,55	1,60
	1,85	1,45	1,55	1,55	1,55	1,50
	1,80	1,80	1,80	1,75	1,70	1,50
	1,85	1,70	1,60	1,65	1,55	1,70
\bar{x}	1,83	1,62	1,65	1,63	1,59	1,55
s	0,02	0,13	0,09	0,07	0,06	0,09

II. Tablica površina po presjeku ispitnih tijela

Visina presjeka (mjereno od dna) [mm]	Površina [mm]
35	117,84
26,25	187,32
17,5	136,54
8,75	102,31
0	140,08
\bar{x}	136,82
s	28,67

III. Vrijednosti pritisnih sila dobivenih ispitivanjem

Ispitno tijelo	Pritisna sila [N]
NoPattern 1	27 948,9
NoPattern 2	28 630,9
NoPattern 3	27 771,3
\bar{x}	28 117
s	453,8

Ispitno tijelo	Pritisna sila [N]
Stripes 1	26 568,3
Stripes 2	27 177,3
Stripes 3	27 622,7
\bar{x}	27 122,8
s	529,3