

Toplinska obrada MARAGING čelika dobivenog selektivnim laserskim taljenjem

Marinović, Gabrijel

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:162525>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Gabrijel Marinović

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Alar, dipl. ing.

Student:

Gabrijel Marinović

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Željku Alaru, dipl. ing. i asistentu Danielu Pustičkom, mag. ing. na izdvojenom vremenu, savjetima i pruženoj pomoći za vrijeme izrade ovog rada.

Uz to, zahvaljujem se i Metalskoj jezgri Čakovec čija je suradnja omogućila realizaciju eksperimentalnog dijela rada.

Gabrijel Marinović



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 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Gabrijel Marinović** JMBAG: 0035219105

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Toplinska obrada MARAGING čelika dobivenog selektivnim laserskim taljenjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Heat treatment of MARAGING steel obtained by selective laser melting**

Opis zadatka:

Postupci aditivne proizvodnje sve više nalaze primjenu u polju strojarstva za izradu strojnih dijelova specifičnih svojstava. Postupak selektivnog laserskog taljenja (SLM) jedan je od postupaka koji koristi metalni prah za izradu gotovih proizvoda. MARAGING čelik pogodan je materijal za SLM postupak zbog mogućnosti naknadne toplinske obrade dozrijevanja. Kombinacijom parametara selektivnog laserskog taljenja i toplinske obrade moguće je postići jednoličnu i homogenu mikrostrukturu s boljim mehaničkim svojstvima gotovog proizvoda.

U radu je potrebno:

1. Proučiti literaturu i napraviti uvid u trenutno stanje primjene SLM postupaka.
2. Detaljno opisati svojstva i postupak toplinske obrade MARAGING čelika.
3. U eksperimentalnom dijelu rada provesti toplinsku obradu na izrađenim uzorcima.
4. Provesti karakterizaciju materijala i ispitivanje tvrdoće obradenih uzoraka.
5. Analizirati dobivene rezultate i dati određene zaključke.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

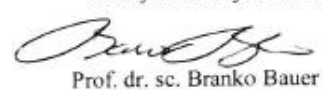
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:


Prof. Željko Alar

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Aditivna proizvodnja.....	1
2. SLM postupak.....	2
2.1. Koraci SLM postupka	2
2.2. Parametri SLM postupka	4
2.3. Fizičke pojave koje nastaju pri SLM-u	5
2.3.1. Međudjelovanje lasera i materijala	5
2.3.2. Nastanak kuglica (engl. balling).....	6
2.3.3. Učinci temperaturnih oscilacija	8
2.4. Metalni materijali i njihove primjene.....	9
2.4.1. Čelik i materijali na bazi željeza.....	9
2.4.1.1. Primjene	10
2.4.1.2. Svojstva	10
2.4.2. Titan i njegove legure	11
2.4.2.1. Primjene	11
2.4.2.2. Svojstva	12
2.4.3. Inconel i legure na bazi nikla.....	12
2.4.3.1. Primjene	13
2.4.3.2. Svojstva	13
2.4.4. Ostali metali.....	14
2.4.4.1. Primjene	14
2.4.4.2. Svojstva	14
2.5. Keramike.....	14
2.5.1. Primjene	15
2.5.2. Svojstva	15
2.6. Kompoziti.....	15
2.6.1. Primjene	16
2.6.2. Svojstva	16
2.7. Napredci u SLM industriji	17
3. MARAGING čelici.....	19
3.1. MARAGING tolinska obrada	19
3.2. Precipitacijsko očvršćivanje.....	20
3.3. Reverzija austenita	21
3.4. Vrste MARAGING čelika i njihove primjene	22

3.4.1. MARAGING čelici za rad pri temperaturama do 425 °C	22
3.4.2. MARAGING čelici za topli rad pri temperaturama do 600 °C.....	22
3.4.3. MARAGING čelici poboljšane otpornosti na koroziju	22
4. Mikrostruktura i svojstva MARAGING 300 čelika dobivenih SLM postupkom	23
4.1. Mikrostruktura	23
4.2. Svojstva.....	25
5. Eksperimentalni dio	27
5.1. Plan istraživanja	27
5.2. Materijal praha	27
5.3. Izrada uzoraka	27
5.4. Priprema površine za ispitivanje tvrdoće	28
5.5. Vickers metoda ispitivanja tvrdoće.....	29
5.6. Ispitivanje tvrdoće.....	30
5.6.1. Ispitivanje tvrdoće isporučenih uzoraka	31
5.6.2. Toplinska obrada uzoraka	32
5.6.3. Ispitivanje tvrdoće toplinski obrađenih uzoraka.....	33
5.7. Nejednolikost površinske tvrdoće	34
6. Analiza.....	35
6.1. Raspodjela površinske tvrdoće uzorka.....	36
6.2. Nejednolikost površinske tvrdoće uzorka	37
7. Zaključak	39
LITERATURA.....	40
PRILOG 1	46

POPIS SLIKA

Slika 1.	Razlika između SLS i SLM tehnologija aditivne proizvodnje [55]	1
Slika 2.	Aditivna proizvodnja SLM postupkom [2]	2
Slika 3.	Pojednostavljeni prikaz SLM printera [2]	3
Slika 4.	Parametri SLM postupka [2]	4
Slika 5.	Pojava nastajanja kuglica [3].....	7
Slika 6.	Predgrijavanje CO2 laserom [11].....	9
Slika 7.	Umetak za kost od titanija [56]	11
Slika 8.	Legura s prisjetljivosti oblika dobivena SLM postupkom [57].....	13
Slika 9.	3D printane zubne krunice od cirkonija [58].....	15
Slika 10.	SLM 500 HL uređaj [59].....	17
Slika 11.	Croft filteri dobiveni aditivnom proizvodnjom [60]	18
Slika 12.	Dijagram postupka MARAGING toplinske obrade [48]	20
Slika 13.	Fazni dijagram MARAGING čelika [62].....	24
Slika 14.	Formiranje mikrostrukture MARAGING čelika SLM postupkom [62]	24
Slika 15.	Krivulje napreznja isporučenih (engl. as-built) i toplinski obrađenih uzoraka [63]	26
Slika 16.	EOS M 290 3D printer [66].....	28
Slika 17.	Uzorci napravljeni SLM postupkom na EOS M 290 uređaju	28
Slika 18.	Otisak indentora za Vickers metodu [69].....	29
Slika 19.	INDENTEC ZHV μ tvrdomjer	30
Slika 20.	Zwick tvrdomjer	31
Slika 21.	Toplinska komora u LIMS-u	32
Slika 22.	Raspodjela tvrdoće uzoraka ovisno o toplinskoj obradi i opterećenju.....	35
Slika 23.	Raspodjela površinske tvrdoće za uzorak broj 5	36
Slika 24.	Dijagram nejednolikosti površinske tvrdoće za metodu HV2.....	38
Slika 25.	Dijagram nejednolikosti površinske tvrdoće za metodu HV10.....	38

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva u isporučenom stanju i nakon toplinske obrade [63].....	25
Tablica 2. Kemijski sastav EOS MaragingSteel MS1.....	27
Tablica 3. Izmjerene tvrdoće uzoraka u isporučenom stanju	31
Tablica 4. Parametri toplinske obrade uzoraka	33
Tablica 5. Srednje vrijednosti tvrdoće nakon toplinske obrade	33
Tablica 6. Nejednolikost površinske tvrdoće za uzorak 5.....	34
Tablica 7. Vrijednosti nejednolikosti površinske tvrdoće za uzorke ovisno o opterećenju	37
Tablica 8. Izmjerene tvrdoće metodom HV2	46
Tablica 9. Izmjerene tvrdoće metodom HV10	46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_a	μm	Srednje aritmetičko odstupanje mjerenog profila
R_z	μm	Srednja visina neravnina
HRC	HRC	Tvrdoća po Rockwellu
HV	HV	Tvrdoća po Vickersu
λ	W/mK	Toplinska vodljivost
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
ε	%	Istezanje
F	N	Primijenjena sila
d_1	mm	Duljina dijagonale otiska
d_2	mm	Duljina dijagonale otiska
d	mm	Srednja vrijednost dijagonale otiska
α	°	Kut između stranica indentora
H_n	HV	Vrijednost najveće izmjerene tvrdoće
H_1	HV	Vrijednost najmanje izmjerene tvrdoće
\bar{H}	HV	Srednja vrijednost tvrdoće
r_{rel}	%	Nejednolikost površinske tvrdoće

SAŽETAK

Tehnologije aditivne proizvodnje sve više se koriste za male serije proizvodnje, izradu specijalnih komponenti i prototipova. Omogućuju izravnu proizvodnju dijelova složenih geometrija i najčešće nije potrebna naknadna obrada.

U ovom radu opisan je postupak aditivne proizvodnje selektivnim laserskim taljenjem (SLM), materijali koji se mogu obrađivati tim postupkom i primjene gotovih komponenti.

Uzorci su izrađeni od MARAGING čelika SLM postupkom, ispitana je tvrdoća u isporučenom stanju, provedena je toplinska obrada te je ponovno ispitana tvrdoća toplinski obrađenih uzoraka. Na temelju dobivenih rezultata provedena je analiza i napisan zaključak.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, SLM, MARAGING, tvrdoća

SUMMARY

Additive manufacturing technologies are increasingly used for small series production, production of special components and prototypes. They enable direct production of parts with complex geometries and in most cases, post-processing is not required.

This paper describes the process of additive manufacturing by selective laser melting (SLM), the materials that can be processed by SLM, and the applications of the finished components.

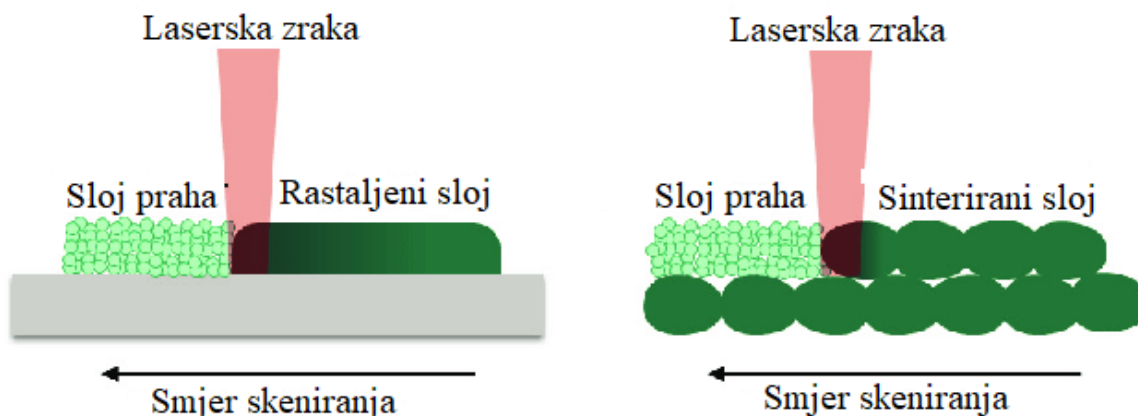
Samples of MARAGING steel were made by SLM process, hardness was tested in the "as-built" state, heat treatment was carried out, and hardness of the heat-treated samples was tested again. Based on the obtained results, an analysis was carried out and a conclusion was written.

Key words: additive technology, SLM, MARAGING, hardness

1. UVOD

1.1. Aditivna proizvodnja

Tehnologije aditivne proizvodnje omogućuju direktnu proizvodnju komponenti dodavanjem materijala, obično sloj po sloj. Ove tehnologije koriste se za izradu malih serija, prototipova i alata. Naspram konvencionalnih tehnologija, tehnologije aditivne proizvodnje pružaju geometrijsku slobodu, izradu dijelova složenih geometrija i oblika te zahtijevaju manje naknadne obrade. Prethodno navedene prednosti omogućuju izradu specijalno prilagođenih komponenti. Jedina ograničenja ovih tehnologija proizlaze iz potrebe za uklanjanjem neočvrstnutog materijala iz šupljina i potrebe za potporama prevjesa. Neke od važnijih aditivnih tehnologija proizvodnje uključuju: selektivno lasersko taljenje (SLM), izravnu depoziciju metala (DMD), taljenje zrakom elektrona (EBM) i inkjet printanje. Aditivne tehnologije se međusobno razlikuju u načinu dovođenja osnovnog materijala i izvoru energije. Dovođenje materijala može biti nanošenjem tankog sloja praha na ploču supstrata, izravno nanošenje praha pomoću mlaznice ili sustavom dovođenja žice. Potrebna energija sustavu se dovodi pomoću lasera, zrake elektrona ili električnim lukom. SLM i SLS (selektivno lasersko sinteriranje) su najzastupljenije aditivne tehnologije za proizvodnju metalnih komponenata [1]. Razlika između SLS i SLM tehnologija prikazana je na slici 1.



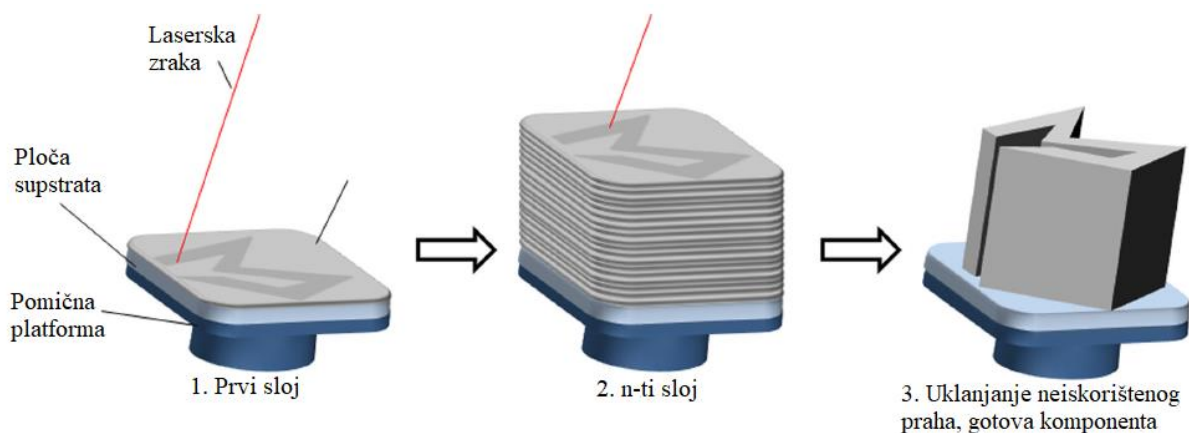
Slika 1. Razlika između SLS i SLM tehnologija aditivne proizvodnje [55]

2. SLM postupak

SLM ili selektivno lasersko taljenje je postupak aditivne proizvodnje koji su razvili dr. M. Fockele i dr. D. Schwarze. SLM kao izvor energije koristi laser visokog intenziteta koji tali i spaja lokalna odabrana područja sloja metalnog praha.

2.1. Koraci SLM postupka

Metalne komponente se izgrađuju sloj po sloj prema dokumentaciji računalno potpomognutog projektiranja (engl. computer aided design). Postupak čini niz koraka, od pripreme CAD dokumentacije do odvajanja izgrađenog dijela od supstrata na kojem se izgrađuje. Najprije je potrebno obraditi stereolitografske (STL) datoteke pomoću programa, kao što je Magics. To je važno zbog stvaranja podataka o laserskom skeniranju pojedinačnih slojeva izgradnje i osiguranja potpornih struktura za značajke poput prevjesa. Prvi korak u izgradnji je nanošenje tankog sloja metalnog praha na ploču supstrata. Slijedi taljenje i spajanje metalnog praha pomoću lasera visoke gustoće energije. Laser skenira i djeluje na odabrana područja prema obrađenim STL datotekama. Nakon završetka skeniranja, platforma za izgradnju spušta se za visinu prethodnog sloja te slijedi nanošenje novog sloja metalnog praha. Laser skenira novi sloj. Prethodni postupak se ponavlja za broj slojeva definiran u STL datoteci, to jest do potpune izgradnje komponente. Završetkom skeniranja, uklanja se višak praha te se ručno ili pomoću EDM (obrada električnog pražnjenja) stroja komponenta odvaja od supstrata. Cijeli postupak je automatiziran, osim pripreme podataka i odvajanja komponente od supstrata. Na slici 2 je prikazan SLM postupak [2].

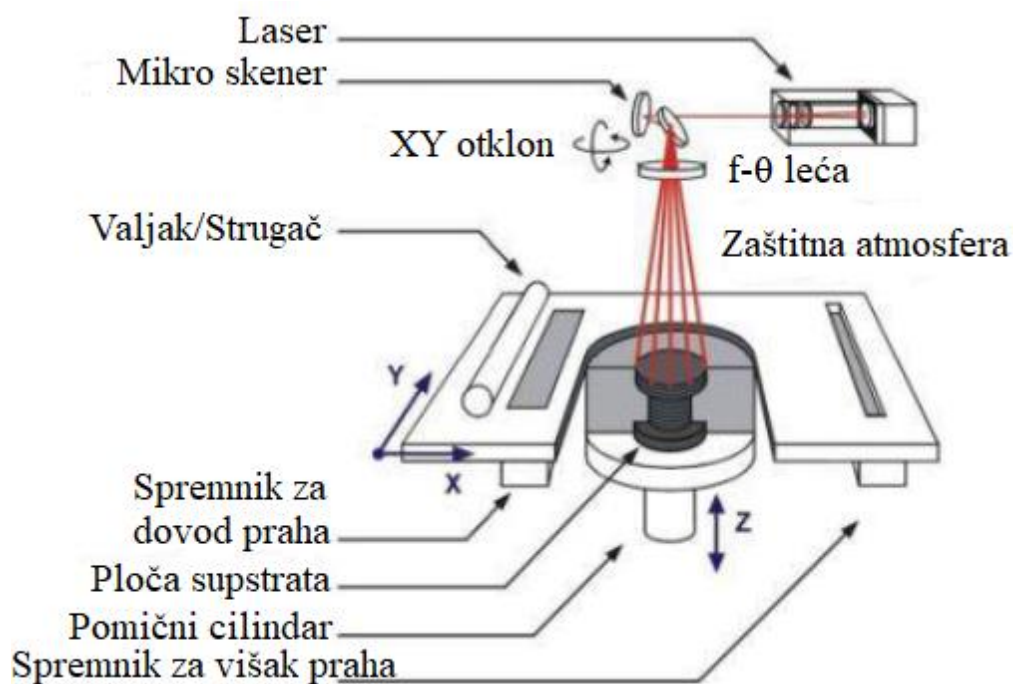


Slika 2. Aditivna proizvodnja SLM postupkom [2]

Inertni plin, poput dušika ili argona, se koristi unutar komore za izgradnju kao zaštita od površinske oksidacije zagrijanih metalnih dijelova.

Istraživanja pokazuju da SLM postupak potpunim taljenjem metalnog praha omogućuje proizvodnju komponenata visoke relativne gustoće bez potrebe za naknadnom obradom, osim odvajanja gotove komponente i potpora od ploče supstrata. SLM postupak može se promatrati kao evolucija SLS postupka.

SLS ili selektivno lasersko sinteriranje spaja čestice praha srašćivanjem (sinteriranjem) u čvrstom stanju ili taljenjem veziva. Dobivaju se dijelovi s većim udjelom pora i nižom čvrstoćom. Moguće je naknadno poboljšanje komponenata dobivenih SLS postupkom, ali je zahtjevno i dugotrajno. SLM postupak ne koristi vezivna sredstva, kraće je vrijeme postupka, bolja je pouzdanost i dobivaju se dijelovi više kvalitete. Na slici 3 prikana je shema SLM printera.

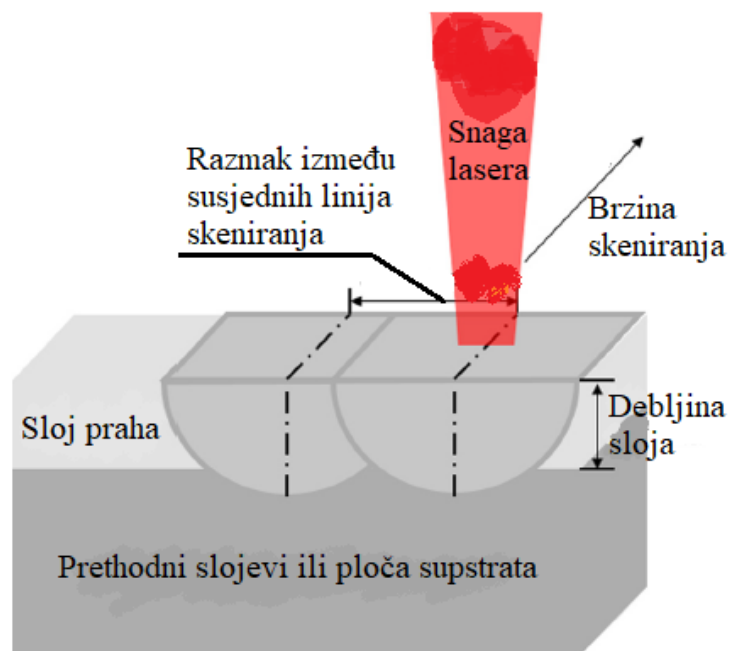


Slika 3. Pojednostavljeni prikaz SLM printera [2]

Također postoji inačica SLM-a za popravak oštećenih komponenti. Riječ je o SLE ili selektivnoj laserskoj epitaksiji. Mala količina praha, do 2 mm debljine, nanosi se na površinu oštećenog dijela te se tali pomoću Nd:YAG lasera visoke snage. Ovim postupkom se popunjavaju pukotine na oštećenim dijelovima [2].

2.2. Parametri SLM postupka

Najbitniji parametri postupka su snaga lasera i brzina skeniranja. Oni znatno utječu na postizivu gustoću i na morfologiju slojeva. Ostali parametri su debljina sloja, udaljenost između susjednih linija skeniranja (engl. hatch spacing) i svojstva samog praha poput oblika čestica, rasporeda veličine čestica i kompozicije [1, 2]. Parametri SLM postupka prikazani su na slici 4.



Slika 4. Parametri SLM postupka [2]

Potrebno je optimizirati prethodno navedene parametre kako bi se pojedinačni vektor taljenja mogao u potpunosti spojiti sa susjednim vektorom i prethodnim slojem te na taj način postići zadovoljavajuću relativnu gustoću dobivene komponente. Debljina sloja je između 20 i 100 μm te predstavlja ravnotežu između visoke tečnosti praha i visoke rezolucije. Prahovi sa manjim česticama omogućuju visoku rezoluciju, ali zbog van der Waals-ovih sila imaju sklonost gomilanja koje uzrokuje lošu tečnost i loše nanošenje praha. Prahovi većih čestica imaju bolju tečnost, ali rezultat ima lošiju rezoluciju i grublje tolerancije [2].

Stvaranje poroznosti ovisi o morfologiji sloja, koja je direktno povezana sa parametrima postupka. Pogrešni parametri uzrokuju neujednačeno preklapanje staza skeniranja, nastaju defekti koji propagiraju dalje i ne omogućuju homogeno polaganje praha. Rezultat toga je nastanak pora.

Ponovno taljenje i različite strategije skeniranja neki su od načina za osiguranje visoke gustoće i bolje morfologije slojeva. Ponovno taljenje laserom smanjuje hrapavost površine i poroznost. Primjenjuje se nakon skeniranja svakog sloja, a također se koristi za poboljšavanje kvalitete površine. Strategije skeniranja se koriste za smanjenje utjecaja zaostalih naprezanja nastalih zbog visokog temperaturnog gradijenta koji je posljedica taljenja i očvršćivanja visokom brzinom. Obično se za svaki sloj mijenja smjer skeniranja [1].

2.3. Fizičke pojave koje nastaju pri SLM-u

SLM postupak temelji se na izmjeni velike količine energije, koja se laserskom zrakom prenosi na prah materijala, nakon čega slijedi ubrzano očvršćivanje. Fizičke pojave koje se javljaju su: apsorpcija laserskog zračenja od strane materijala u prahu, nastanak kuglica (engl. balling) i toplinske oscilacije materijala koje mogu uzrokovati nastanak pukotina i kvar komponente [2].

2.3.1. Međudjelovanje lasera i materijala

SLM postupak je projektiran kako bi se omogućila aditivna proizvodnja metalnih materijala. Stoga je potreban laser dovoljne snage da omogući taljenje metalnog praha. U početku se koristio CO₂ laser prilagođen iz SLS postupka, a danas se koriste Nd:YAG i Yb:YAG vlaknasti laseri. Razlog prelaska na Nd:YAG laser je manja valna duljina. Valna duljina CO₂ lasera iznosi 10,6 μm, a valna duljina Nd:YAG lasera iznosi približno 1,06 μm. Manja valna duljina je pogodna jer metalni prahovi imaju višu stopu apsorpcije zračenja čija je valna duljina slična infracrvenom zračenju. U odnosu na Nd:YAG, Yb:YAG pruža veći raspon apsorpcije što smanjuje zahtjeve na sustav upravljanja toplinom, ima dulji životni vijek i niže temperaturno opterećenje po jediničnoj snazi diodne pumpe. Učinkovitost SLM postupka poboljšava se istraživanjima i razvojjima unutar laserske tehnologije.

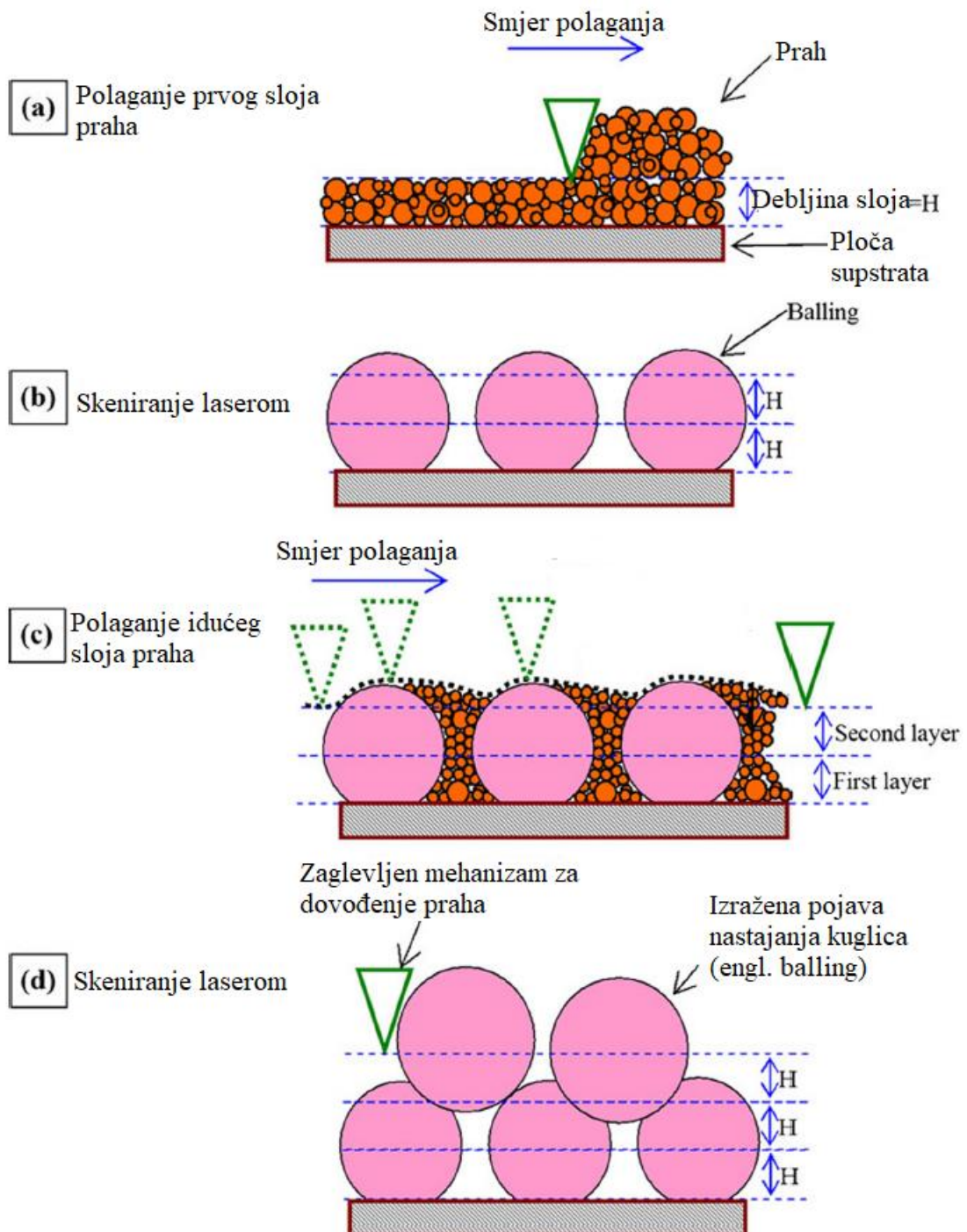
Snaga lasera, brzina skeniranja, udaljenost između susjednih linija skeniranja, debljina sloja i apsorpcija laserskog zračenja utječu na količinu volumetrijske energije kojom raspolažemo za zagrijavanje i taljenje praha. Toplinski kapacitet i latentna toplina ovise o vrsti materijala i masi koja se tali te se moraju uzeti u obzir prilikom zagrijavanja i taljenja [2]. Nedovoljna količina energije kombinacija je niske snage lasera, visoke brzine skeniranja i velike debljine sloja te rezultira manjkom natapanja zone taljenja prethodnim slojem. To uzrokuje pojavu nastajanja kuglica [3]. Također, prevelika količina energije nije poželjna jer vodi do prekomjernog isparavanja materijala i efekta ključanice [4]. Isparavanje materijala može dovesti do njegove kondenzacije na samom laseru i ometati prijenos laserske zrake.

Apsorpcija ukazuje na energetska učinkovitost SLM postupka. Omjer energetskog toka apsorbiranog materijalom i energetskog toka usmjerenog na materijal nazivamo apsorpcijom. Razlika u apsorpciji između rasutog materijala (engl. bulk material) i materijala u prahu može biti značajna [2]. Tolochko je u istraživanju uspoređivao apsorpciju rasutog materijala i materijala u prahu te je došao do spoznaja da materijal u prahu, neovisno o vrsti lasera (CO₂ ili Nd:YAG), ima znatno veću apsorpciju zbog višestrukih refleksija laserske zrake unutar sloja praha [5].

Loh proučava efekt koji profil laserskog snopa ima na SLM postupak. Uspoređuje Gauss-ov snop i ujednačeni snop. Ujednačenim snopom postiže se veća širina taljenja i slična penetracija. Korištenjem ujednačenog laserskog snopa može se smanjiti udaljenost između susjednih linija taljenja i na taj način povećati produktivnost SLM postupka [6].

2.3.2. Nastanak kuglica (engl. balling)

Nastanak kuglica je fizička pojava nastajanja očvrnutih kapljica zbog nedovoljnog natapanja prethodnog sloja i djelovanja površinske napetosti [7]. Ova pojava sprječava stvaranje neisprekidanih linija taljenja, nastaju grube površine, a u nekim slučajevima može zaglaviti mehanizam dovodjenja praha metalnim kapljicama koja se nadziru iznad visine sloja praha [3]. Loše međuslojno spajanje i pojava delaminacije posljedica su prisutnosti kisika. Nastanak kuglica, prikazan na slici 5, može se kontrolirati smanjenjem razine prisutnog kisika i razaranjem oksidnog sloja laserom [2].



Slika 5. Pojava nastajanja kuglica [3]

2.3.3. Učinci temperaturnih oscilacija

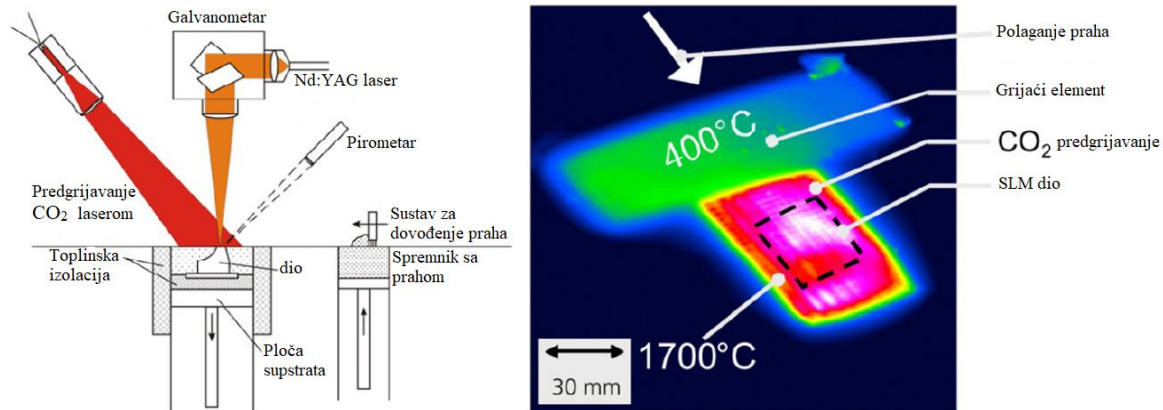
Tokom SLM postupka prisutne su temperaturne oscilacije u različitim mjerama, a kao posljedica tih oscilacija nastaju zaostala naprezanja [8]. Prisutnost zaostalih naprezanja može dovesti do stvaranja pukotina i delaminacije [2].

Metode za smanjivanje zaostalih naprezanja unutar dijelova nastalih tehnologijom SLM-a iz praha krom-molibdena, nikla i bakrenih fosfata proučava Shiomi. Toplinskom obradom na temperaturi od približno 650 °C u trajanju od 1 sat, zaostala naprezanja smanjena su za 70%. Ponovnim laserskim skeniranjem jednakih parametara, zaostala naprezanja smanjena su za 55%. Smanjenje zaostalih naprezanja u iznosu od 40% postignuto je zagrijavanjem sloja praha na temperaturu od 160 °C [9].

Znatno smanjenje zaostalih naprezanja moguće je primjenom strategije sektorskog skeniranja koju je prvi primjenio Yasa. Slojevi su podijeljeni na manja kvadratna polja. Susjedna polja skeniraju se međusobno okomito [10]. Unutar programa kao što su Autofab ili SLM Build Processor strategija sektorskog skeniranja zove se strategija šahovnice.

Zbog niske lomne žilavosti i visokog gradijenta temperatura, koji je posljedica niske toplinske vodljivosti keramike i visokih temperatura tališta, često se javlja problem nastanka pukotina i delaminacije. [2]

Istraživačka grupa Hagerdorna je ovaj problem riješila korištenjem eutektičke mješavine aluminija i cirkonija koja je smanjila temperaturu tališta na 1860 °C te korištenjem sekundarnog lasera za predgrijavanje praha na 1600 °C. Predgrijavanje praha sekundarnim CO₂ laserom prikazano je na slici 6 [11].



Slika 6. Predgrijavanje CO₂ laserom [11]

Odabirom odgovarajuće strategije skeniranja, parametara skeniranja, predgrijavanjem i naknadnom toplinskom obradom moguće je smanjiti pojave nastanka kuglica, zaostalih naprezanja i pukotina [2].

2.4. Metalni materijali i njihove primjene

Zbog njihove cijene i široke primjene, većina istraživanja u području SLM-a provodi se na željezu, titanu i niklu. Dolaženjem do novih spoznaja sve se više razmatra primjena ostalih metalnih materijala poput volframa, magnezija, aluminija i bakra.

2.4.1. Čelik i materijali na bazi željeza

Sposobnost proizvodnje dijelova sa strukturiranom poroznosti pomoću SLM postupka omogućuje proizvođačima iskorištavanje visoke čvrstoće čelika za projektiranje komponenti s ciljem smanjenja mase [2].

Istraživačka grupa sveučilišta u Leedsu proučavali su staze taljenja u SLM postupku za alatne čelike (M2 i H13) te nehrđajući čelik 314S. Rezultati modeliranja i eksperimentalnog istraživanja su sljedeći. Postizanje stabilnih staza taljenja moguće je korištenjem lasera visoke snage i ograničavanjem brzine skeniranja na maksimalni iznos do 15 mm/s. Na taj način se osigurava proizvodnja komponenti potpune gustoće [12, 13].

Također, temperaturna povijest procesa određuje količinu praha koju je moguće rastaliti djelovanjem laserskog zračenja.

U svome istraživanju SLM-a praha nehrđajućih čelika, Jerrard pokazuje da je mijenjanjem omjera konstituenata u prahu moguće utjecati na tvrdoću i magnetska svojstva SLM komponente. Ova spoznaja omogućuje proizvodnju čelika različitih razreda tvrdoće ili različitih magnetskih svojstava ovisno o zahtjevima na komponentu [14].

2.4.1.1. Primjene

Primjena SLM čelika ovisi o njihovim svojstvima. Budući da je riječ o skupoj tehnologiji izrade, ove komponente većinom se primjenjuju u industrijama visoke vrijednosti kao što su automobilska industrija, zrakoplovna i svemirska industrija te medicina.

Mogućnost prilagodbe i mijenjanja značajki SLM komponenti prema osobnim potrebama bez dodatnih troškova glavna je prednost SLM-a u medicinskim i dentalnim primjenama.

Stvaranje kompleksnih kanala za hlađenje unutar kalupa za injekcijsko prešanje danas je dostupno zahvaljujući aditivnim tehnologijama poput SLM-a [2].

Visok omjer čvrstoće i mase, otpornost na trošenje i koroziju čine željezni intermetalni spoj poput Fe-Al dobrim kandidatom za SLM proizvodnju cijevi izmjenjivača topline, lopatica turbina mlaznih motora i dijelova peći te ostalih dijelova visokotemperaturnih sistema [15].

Također, SLM čelici koriste se za izradu poroznih laganih struktura koje mogu biti stanične ćelijaste strukture ili saće strukture [2].

2.4.1.2. Svojstva

Relativna gustoća predstavlja omjer gustoće komponente dobivene SLM postupkom i teorijske gustoće koja se računa pomoću atomske mase i kristalne strukture materijala. Kvaliteta SLM dijela direktno je povezana sa postignutom relativnom gustoćom. Vrijednosti relativnih gustoća iznose preko 90% za većinu čelika i materijala na bazi željeza dobivenih SLM postupkom. Taljenjem male količine materijala i brzim očvršćivanjem, koji su značajke SLM procesa, stvara se ujednačenija mikrostruktura i kemijski sastav kroz dio. Posljedica toga su SLM čelični dijelovi više čvrstoće, ali manje oblikovljivosti od dijelova dobivenih konvencionalnim postupkom lijevanja [16].

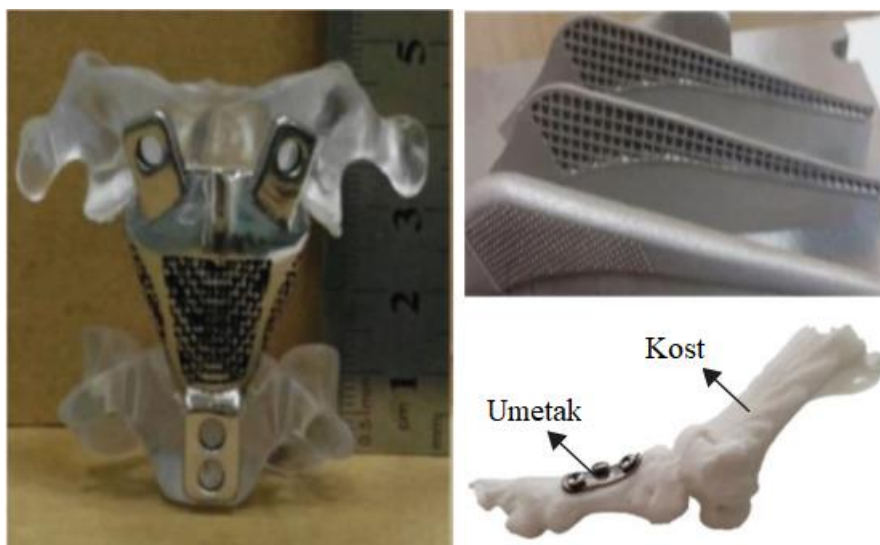
Hrapavost površine jedno je od ograničenja SLM-a. Iznos srednjeg aritmetičkog odstupanja mjenog profila (R_a) obično iznosi oko 20 μm te je za postizanje sjajne i glatke površine potrebna naknadna obrada brušenjem, pjeskarenjem ili sačmarenjem [2].

2.4.2. Titan i njegove legure

Većina istraživanja u području SLM komponenti od titana temelje se na komercijalno čistom titanu (cpTi) ili leguri Ti64. Titan je teže obradiv konvencionalnim tehnologijama poput lijevanja jer je u tekućem agregatnom stanju izuzetno reaktivan i osjetljiv na prisutnost dušika, vodika, kisika i ugljika. Prilikom SLM postupka, inertna atmosfera plina argona pruža zaštitu titanu od dodira i reakcije sa zrakom. Također, lokalizirana priroda zagrijavanja i brzog očvršćivanja onemogućuju unos intersticijskih elemenata kao što su kisik, ugljik i vodik [2].

2.4.2.1. Primjene

Zbog svoje biokompatibilnosti, visoke specifične čvrstoće i modula elastičnosti sličnog kosti, titan i njegove legure imaju visoki potencijal za primjenu kao proteze u medicini i zubni umetci [17].



Slika 7. Umetak za kost od titanija [56]

SLM postupkom iz praha komercijalnog čistog titana izgrađene su zubne krunice i krunice kostiju. Pomoću različitih strategija skeniranja i primjenom jediničnih ćelija napravljeni su porozni, biokompatibilni projekti za ortopedске primjene [18, 19, 20].

Smanjenje razlike između modula elastičnosti umetka i kosti predloženo je SLM-om legure Ti-24Nb-4Zr-8Sn umjesto legure Ti64. Razlika u modulu elastičnosti uzrokuje resorpciju kosti (propadanje koštanog tkiva) i rezultira labavljenjem umetka [21].

Izrada laganih konstrukcija titana nalik na skele, koje se koriste u medicini i zrakoplovnoj industriji, moguća je zahvaljujući SLM postupku [2].

2.4.2.2. Svojstva

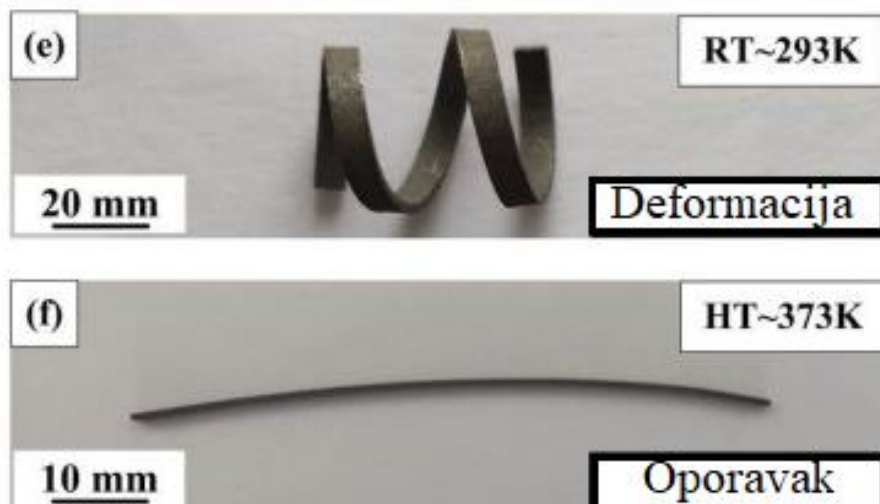
Ispitivanja relativne gustoće titana i legura na bazi titana dobivenih SLM postupkom pokazuju vrlo uspješne rezultate. Dobiveni iznosi relativne gustoće je 98%, a u kasnijim istraživanjima iznosi 99,5% ili više [22]. Kao i kod čelika, dijelovi dobiveni SLM postupkom imaju čvrstoću jednaku ili veću od dijelova dobivenih lijevanjem. To je posljedica ujednačenije mikrostrukture i kemijskog sastava kroz dio zbog ubrzanog očvršćivanja male količine materijala [2].

Mikrotvrdoća nije proporcionalna relativnoj gustoći. U istraživanju SLM-a legure Ti-6Al-4V najviši iznos mikro-tvrdoće (613 HV) dobiven je za iznose relativne gustoće 95,2% i 95,8%. Povišenjem relativne gustoće na 97,6% rezultiralo je izmjerenom mikro-tvrdoćom iznosa samo 515 HV [23].

2.4.3. Inconel i legure na bazi nikla

Inconel je naziv za obitelj superlegura na bazi nikla i bakra za visokotemperaturne primjene. Karakterizira ih čvrstoća pri visokim temperaturama, visoka otpornost na koroziju, otpornost na oksidaciju i otpornost puzanju.

Jedna od zanimljivijih legura na bazi nikla je NiTi legura sa prisjetljivosti oblika SMA (engl. shape memory alloy) poticanu promjenom temperature. Ova je legura sposobna imati dvosmjernu postupnu faznu transformaciju. SLM NiTi pokazao je martenzitnu transformaciju između 32 °C i 59 °C te austenitnu transformaciju između 59 °C i 90 °C [24]. Oporavak uslijed deformacije NiTi legure sa prisjetljivosti oblika prikazan je na slici 8.



Slika 8. Legura sa prisjetljivosti oblika dobivena SLM postupkom [57]

SLM NiTi komponente pokazuju visoku cikličku stabilnost naspram konvencionalne NiTi komponente, ali manju lomnu čvrstoću i manje kritično naprezanje [25, 26].

2.4.3.1. Primjene

SLM Inconel 718 legure se zbog otpornosti na umor materijala, otpornosti na trošenje i koroziju, čvrstoće pri visokim temperaturama i dobre zavarljivosti primjenjuje za izradu rotora turbopunjača, lopatica turbina i ostalih dijelova namijenjenih radu u ekstremnim uvjetima [27].

Sloboda projektiranja i visoka rezolucija omogućuju izradu složenih komponenata motora sa unutarnjim izgaranjem koje će imati bolju učinkovitost hlađenja, manju masu i manju potrošnju goriva [2].

Provedeno je istraživanje za potencijalnu primjenu SLM NiTi legure kao materijala prenosioca za ljudske mezenhimske matične stanice pomoću kojih bi se poboljšao rast kostiju i zacjeljivanje različitih koštanih nedostataka [28].

2.4.3.2. Svojstva

Relativna gustoća dobivena SLM postupkom legura Inconel 718, Nimonic 263 i Hastelloy X iznosi gotovo 100%. Čvrstoća SLM legura na bazi nikla viša je od lijevanih legura na bazi nikla. Kvaliteta površine je dobra, R_a je manji od 10 μm . Mikro-tvrdoću je moguće poboljšati dozrijevanjem [2].

2.4.4. Ostali metali

Osim navedenih materijala kao što su čelik, titan i nikal, materijali poput magnezija, bakra, aluminija, volframa, kobalt-kroma i zlata su također uzeti u obzir za proizvodnju SLM postupkom [2].

2.4.4.1. Primjene

Zubne krunice i mostovi od Co-Cr relativne gustoće 99% dobiveni SLM postupkom proizvođeni su kroz period od 14 mjeseci. Ustanovila se dobra ponovljivost postupka i zadovoljavajuća svojstva [29].

Zbog visoke toplinske vodljivosti SLM bakra iznosa $\lambda = 401 \text{ W/(mK)}$, primjenjuje se u izmjenjivačima topline. SLM aluminij može se koristiti za rashladna tijela [30].

Zbog visoke temperature tališta, dobre otpornosti na trošenje i visoke gustoće, SLM volfram koristi se kao zaštita od zračenja i za uravnoteženje mase na avionima [31].

SLM proizvodnja nakita od zlata i srebra omogućuje izradu složenih dizajna, uklanja potrebu za korištenjem skupih kalupa i matrica te smanjuje cijenu proizvodnje [32, 33].

2.4.4.2. Svojstva

Čvrstoća i duktilnost imaju niže vrijednosti zbog visokog udjela pora. Mikro-tvrdoća se može povisiti dodavanjem bakrenog praha leguri Al6061 zbog stvaranja AlCu₂ [34].

2.5. Keramike

Provedena su brojna istraživanja keramičkim materijalima kao što su Al₂O₃, SiO₂, Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ (LAS) staklo i tri-kalcij-fosfat (TCP) za primjenu sa SLM postupkom aditivne proizvodnje. Umjesto Nd:YAG lasera ili Yb:YAG lasera, u većini istraživanja koristio se CO₂ laser zbog bolje zajedničke učinkovitosti sa keramičkim materijalima.

Keramike imaju nižu gustoću od metala, lošiju tečnost, višu temperaturu tališta i nižu duktilnost. Prilikom SLM postupka sa keramičkim materijalom, potrebna je velika količina energije da bi se postiglo taljenje. Skeniranjem lasera po sloju praha, javljaju se visoke temperaturne oscilacije. One stvaraju zaostala toplinska naprezanja koja sa niskom duktilnosti keramike mogu uzrokovati pojavu pukotina. Problem zaostalih naprezanja može riješiti primjenom sekundarnog CO₂ lasera za predgrijavanje praha [2].

2.5.1. Primjene

SLM proizvodnja keramičkih komponenti primjenjuje se za zubnu restauraciju te izgradnju koštanih implatanti [35]. Zubni implatanti od keramike nastali SLM postupkom prikazani su na slici 9.



Slika 9. 3D printane zubne krunice od cirkonija [58]

Također se mogu primjeniti za izradu prevlaka otpornih na trošenje i toplinske ili električne izolacije [36].

2.5.2. Svojstva

Postizanje visoke relativne gustoće SLM postupkom sa keramičkim materijalima je teško, ali je moguće primjenom sekundarnog lasera kako bi se smanjile temperaturne oscilacije. Primjenom sekundarnog lasera se povećava relativna gustoća, ali se istovremeno povećava i hrapavost površine. Srednja visina neravnina R_z ima vrijednosti 150 μm i više [37].

2.6. Kompoziti

Taljenjem dva ili više različitih prahova SLM postupkom dobivamo kompozitne materijale. Jedan od prahova djeluje kao matrica, a drugi kao ojačalo. Obično je riječ o metalnoj matrici i keramičkom ojačalu.

2.6.1. Primjene

Primjena ovisi o svojstvima kompozitnog materijala. SLM kompoziti se koriste u zrakoplovnoj, svemirskoj, automobilskoj industriji, medicini i ostalim industrijama visoke vrijednosti [2].

SLM izgradnja nosivih koštanih umetaka od hidroksiapatita (HA) i nehrđajućeg čelika pokazala je dobra svojstva čvrstoće čelika i sposobnosti hidroksiapatita za poticanjem rasti koštanog tkiva [38].

Slojeviti kompozit superlegure na bazi nikla, s povećanjem udjela cirkonija kroz svaki idući sloj od 0% do 10%, razmatrao se za primjenu kao prevlaka otporna na visoke temperature unutar motora sa unutarnjim izgaranjem [39].

Gu i Meiners SLM-om mješavine volfram-nikal-grafit praha stvaraju kompozit $\text{Ni}_2\text{W}_4\text{C}(\text{M}_6\text{C})$ ojačan volfram-karbidima (WC). Ovaj kompozit namijenjen je za izradu alata za strojnu obradu i kalupa sa poboljšanom mikro-tvrdoćom [40].

2.6.2. Svojstva

Relativne gustoće SLM kompozita su između 82% i 99,6% [2].

Čvrstoća ispitana na koštanim umetcima od SLM kompozita bila je dovoljna za njihovu nosivu funkciju [38].

Mikro-tvrdoća je vrlo dobra zbog materijala ojačala. Visoka mikro-tvrdoća i sporo trošenje poželjni su za alate [41].

2.7. Napredci u SLM industriji

Razmatra se promjena dizajna potpornih struktura izgrađenih od Ti_6Al_4V kako bi se smanjio udio volumena potreban za osiguranje prevjesa u SLM procesu. Naj taj način je moguće smanjiti količinu materijala potrebnu za izgradnju potpora, smanjiti vrijeme odvajanja komponente i vrijeme skeniranja te smanjiti cijenu postupka [42].

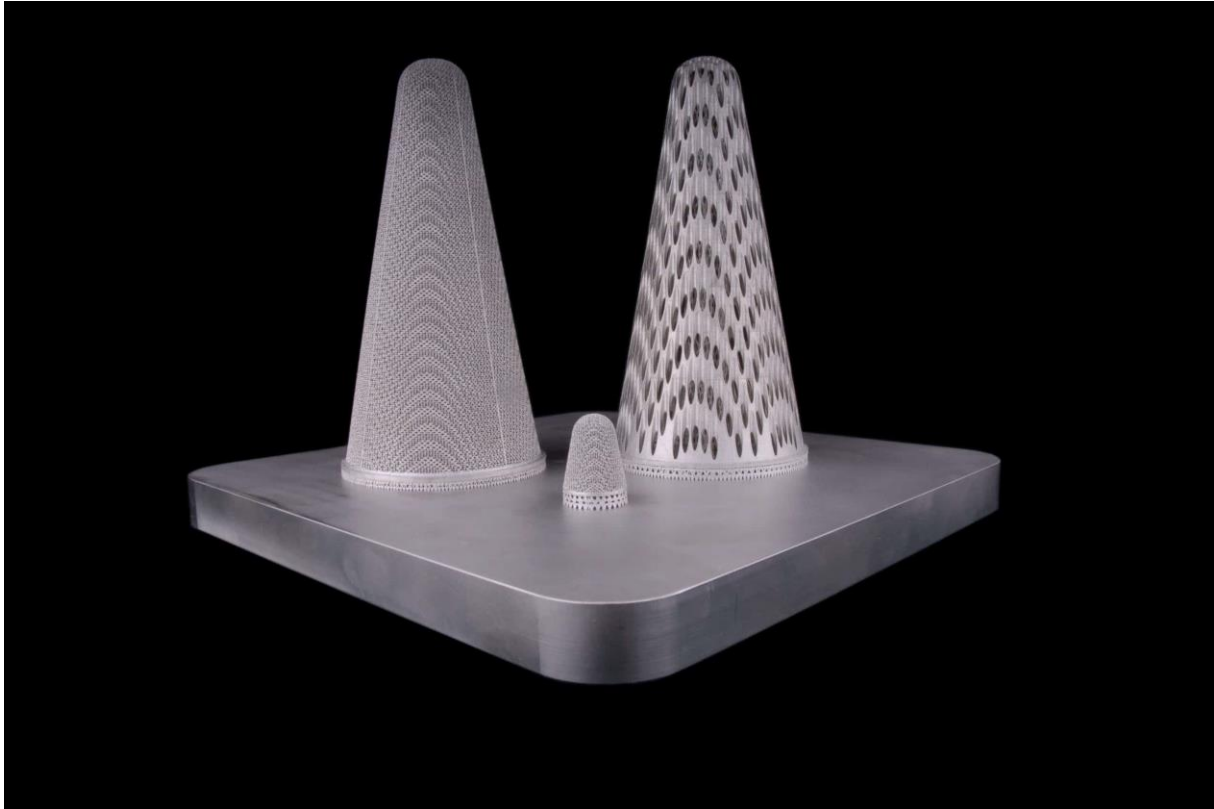
Istraživači se bave razvijanjem veće opreme za aditivnu proizvodnju koja će imati integriranu mogućnost obavljanja naknadne obrade poput starenja, sačmarenja, pjeskarenja, brušenja i poliranja [43].

Relativno mala veličina komponente koja može biti proizvedena SLM postupkom udvostručena je razvojem SLM 500 HL uređaja, prikazanog na slici 10, čiji volumen komore izgradnje iznosi 500 mm x 280 mm x 365 mm [2].



Slika 10. SLM 500 HL uređaj [59]

Croft Filters, proizvođač filtera po narudžbi je smanjio broj koraka u proizvodnji primjenom SLM-a. Konvencionalno je bilo potrebno rezanje i zavarivanje, a sada imaju proizvodnju u jednom koraku [44, 45]. Na slici 11 prikazani su filteri dobiveni aditivnom proizvodnjom.



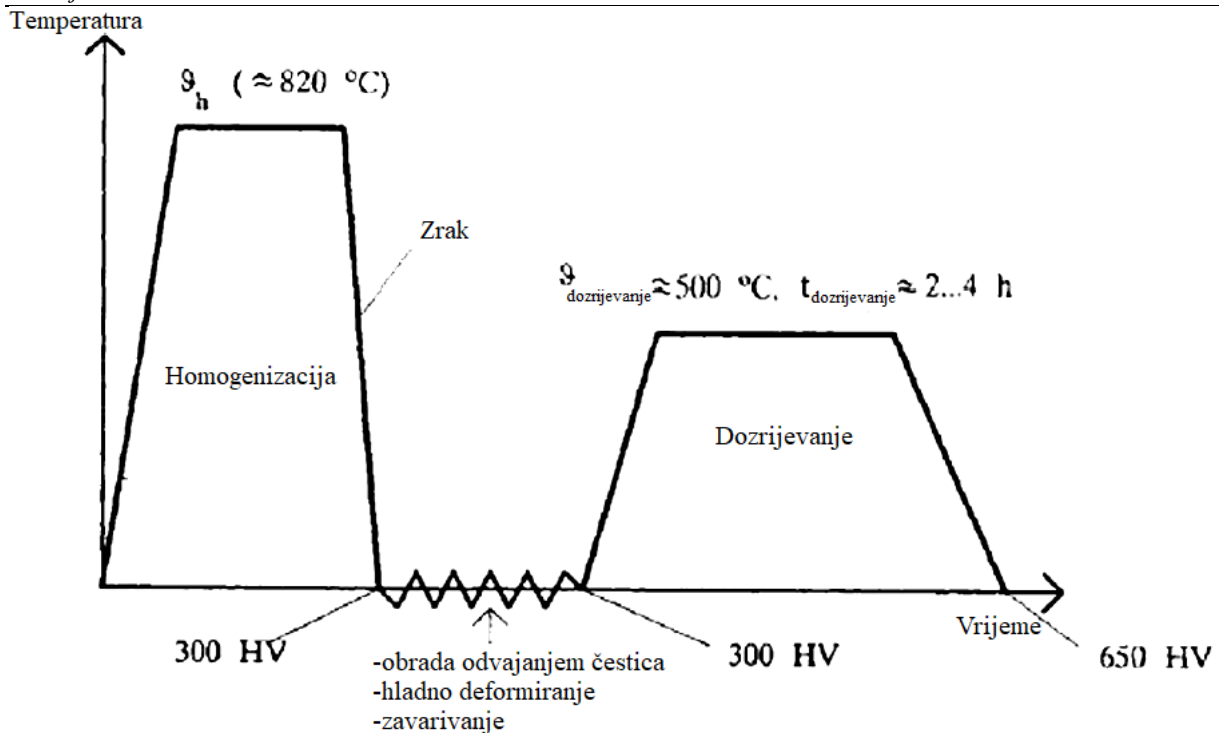
Slika 11. Croft filteri dobiveni aditivnom proizvodnjom [60]

U budućnosti se očekuje pad cijene SLM opreme. Razlog za to je istek patenata i proizvodnja opreme u većim volumenima [2].

3. MARAGING čelici

3.1. MARAGING tolinska obrada

MARAGING čelici su dobili ime spajanjem riječi martenzit i „aging“ (dozrijevanje). U ovu skupinu spadaju niskouglični čelici ($<0,03\% \text{ C}$) sa visokim udjelom legirnih elemenata. Riječ je o sustavima Fe-Ni-Co s legirnim elementima kao što su Ti, Mo i Al. Maraging čelici počeli su se razvijati šezdesetih godina prošlog stoljeća za primjenu u zrakoplovnoj industriji i izradu alata. Svojstva ovih čelika uključuju visoku žilavost i lomnu žilavost, visoku čvrstoću, visoku otpornost toplinskom umoru, dobru zavarljivost i dobru obradljivost elektroerozijom. Postupak toplinske obrade MARAGING čelika, prikazana na slici 12, jednostavniji je od konvencionalnih toplinskih obrada alatnih čelika, ne zahtjeva zaštitnu atmosferu i ne postoji rizik od razugličjenja i oksidacije površine. Glavni nedostaci su relativno niska tvrdoća ovih čelika (50–57 HRC) i niska otpornost trošenju. Otpornost umoru postiže se precipitacijom intermetalnih spojeva unutar martenzitne matrice. Koraci MARAGING toplinske obrade su homogenizacijsko žarenje i starenje. Prvo se čelik grije na temperaturu između 800 °C i 900 °C. U tom području nalazi se samo faza austenit. Nakon toga se intenzivno hladi na zraku ili u vodi. Na približno 250 °C počinje transformacija austenita u nikal-martenzit i završava pri otprilike 200 °C. Tada u strukturi imamo prezasićeni nikal-martenzit. Nikal-martenzit ima tvrdoću oko HV 300, nema visoku trvrdoću i nije krhak. Nakon homogenizacijskog žarenja čelik se oblikuje na konačni oblik i dimenzije. Slijedi dozrijevanje koje se provodi na temperaturi od približno 500 °C bez zaštitne atmosfere. Zatim se provodi hlađenje. Pojavljuje se velik broj fino dispergiranih precipitata intermetalnih spojeva (Ni_3Al , Ni_3Mo , Fe_2Mo , FeCr , Ni_3Ti) unutar nikal-martenzita. Rezultat precipitacijskog očvršćivanja je gomilanje dislokacija koje je uzrok povećanja tvrdoće, vlačne čvrstoće i granice razvlačenja [1, 46, 47].



Slika 12. Dijagram postupka MARAGING toplinske obrade [48]

Čvrstoća MARAGING čelika ovisi o tri čimbenika: čvrstoći martenzitne matrice, očvršćivanju čvrste otopine (ovisi o vrsti i koncentraciji atoma) i precipitacijskom očvršćivanju. Čvrstoća martenzitne matrice ovisi o udjelu ugljika, veličini zrna i gomilanju dislokacija. Precipitacijsko očvršćivanje daje najbitniji prinos čvrstoći MARAGING čelika [49].

3.2. Precipitacijsko očvršćivanje

Precipitacijsko očvršćivanje se postiže ograničavanjem gibanja dislokacija raspršenim precipitatima unutar strukture. Precipitati povećavaju potrebno naprezanje za pomicanje dislokacija i samim tim rastu čvrstoća i tvrdoća materijala. Porast čvrstoće ovisi o strukturi, veličini i rasporedu precipitata. Prije početka precipitacijskog očvršćivanja, mora se inducirati fazna transformacija u čvrstom stanju. Ovo se postiže smanjenjem temperature čime smanjujemo i topljivost legiranih elemenata. Zato se prije dozrijevanja provodi homogenizacijsko žarenje. Precipitacijsko očvršćivanje MARAGING čelika omogućuje dozrijevanje. Dozrijevanjem nastaju nanometarski intermetalni precipitati koji se raspršuju unutar strukture čelika [1].

Pri različitim temperaturama dozrijevanja, prisutne su različite sekundarne faze precipitata i njihov sastav ovisi o sastavu legiranih elemenata čelika. Nikal je osnovni legirni element. Zajedno sa titanijem, molibdenom i aluminijem tvori intermetalne spojeve koji pridonose očvršćivanju. Povećavanjem udjela kobalta, smanjuje se topivost molibdena, raste udio niklovihi intermetalnih spojeva i pospješuje se precipitacija željezo-molibden faze [49]. Očvršćivanje se pripisuje precipitaciji Ni_3Ti , Ni_3Mo i željezo-molibden fazama po granicama zrna unutar martenzitne matrice [50].

3.3. Reverzija austenita

Precipitacijsko očvršćivanje je funkcija temperature dozrijevanja i vremena držanja. Ta dva parametara utječu na kinetiku precipitacije. Tijekom precipitacije, istovremeno se javlja očvršćivanje, ali i omekšavanje uslijed reverzije austenita. Postiziva čvrstoća se smanjuje porastom temperature jer omekšavanje često nadvlada očvršćivanje [1].

Gubitak čvrstoće kod MARAGING čelika posljedica je povratne transformacije martenzita u austenit koju nazivamo reverzijom austenita. Reverzija austenita povezana je sa otapanjem precipitata i ovisi o temperaturi dozrijevanja. Pri temperaturama višim od 500 °C, otapanjem Ni_3Mo precipitata, dolazi do stvaranja austenita. Austenit se javlja istovremeno kao i Fe_2Mo , ali ima suprotan učinak, to jest snižava čvrstoću. Otapanjem Ni_3Mo , martenzitna matrica postaje bogata molibdenom i niklom, od kojih je posljednji austenitotvorac [50].

Udio austenita ovisi o temperaturi dozrijevanja. Raste povećanjem temperature sve dok ne dosegne vrh pri temperaturi od približno 600 °C [51]. Ovisno o udjelu, austenit može imati poželjne ili nepoželjne učinke. Općenito se porastom udjela austenita smanjuje čvrstoća, ali zadržavanjem manjeg udjela austenita može se poboljšati žilavost i duktilnost uz mali pad čvrstoće [52]. Kakogod, zadržavanje austenita predugim dozrijevanjem snižuje čvrstoću, žilavost i uzrokuje krhkost [53].

Za postizanje željenog učinka MARAGING procesa toplinske obrade na čvrstoću i ostala svojstva čelika, potrebno je optimizirati vrijeme držanja i temperaturu dozrijevanja. [1]

3.4. Vrste MARAGING čelika i njihove primjene

3.4.1. MARAGING čelici za rad pri temperaturama do 425 °C

Čvrstoća i tvrdoća ovih čelika počinje padati pri temperaturama od 500 °C zbog rasta udjela austenita [54].

Sukladno tome, ti se čelici primjenjuju za [48]:

- kalupe za preradu polimera
- alate za ekstrudiranje aluminijskih legura
- matrice i bitove za hladno kovanje.

3.4.2. MARAGING čelici za topli rad pri temperaturama do 600 °C

Ovi čelici imaju niži udio Ni od uobičajenog (~18% Ni). Homogenizacijsko žarenje se odvija na temperaturama od približno 900 °C, a dozrijevanje na temperaturama do 625 °C. Udio molibdena iznosi od 5% do 8% i pridonosi stvaranju precipitata Ni_3Mo koji povišuju tvrdoću. Zbog otpornosti na toplinski umor, ti se čelici primjenjuju za izradu komponenti kalupa za tlačno lijevanje aluminijskih legura [48].

3.4.3. MARAGING čelici poboljšane otpornosti na koroziju

Ovi čelici imaju niži udio nikla (od 8% do 10%) i kobalta (od 3% do 5%) te sadrže između 9% i 13% kroma. Krom povišuje otpornost na koroziju, ali također smanjuje tvrdoću i čvrstoću. Prisutnost kroma smanjuje temperature početka i završetka stvaranja nikal-martenzita (M_s i M_f). Zato je moguće zadržavanje austenita pri sobnoj temperaturi te je poželjno provesti duboko hlađenje. Ovaj tip čelika koristi se za izradu komponenti kalupa za preradu visoko-korozivnih polimera [47].

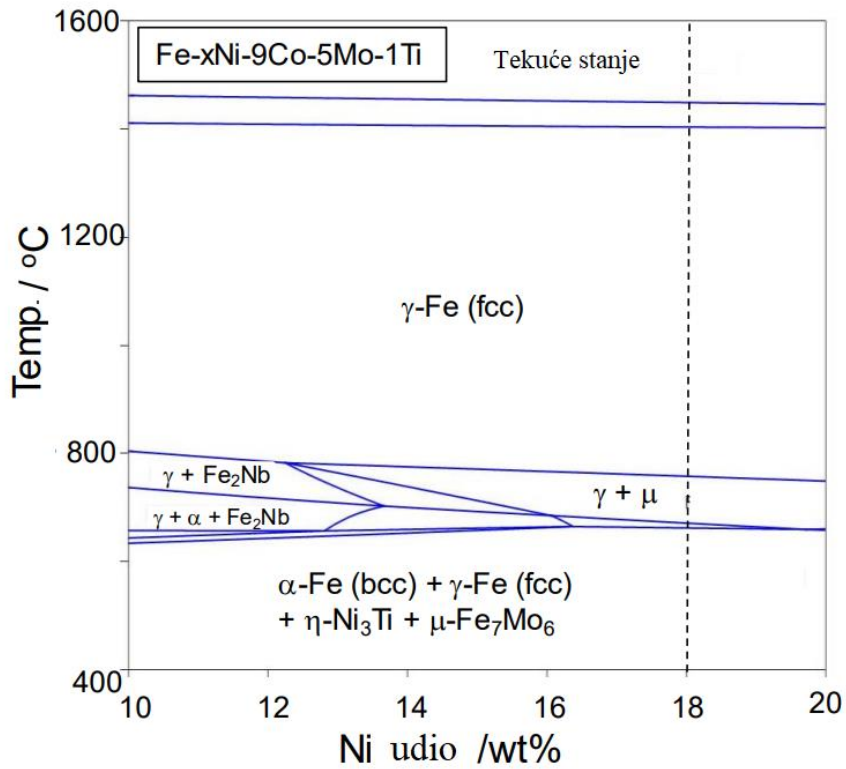
4. Mikrostruktura i svojstva MARAGING 300 čelika dobivenih SLM postupkom

Mikrostruktura i svojstva MARAGING 300 čelika dobivenih SLM postupkom rezultat su parametara SLM uređaja, parametara izgradnje i parametara naknadne toplinske obrade.

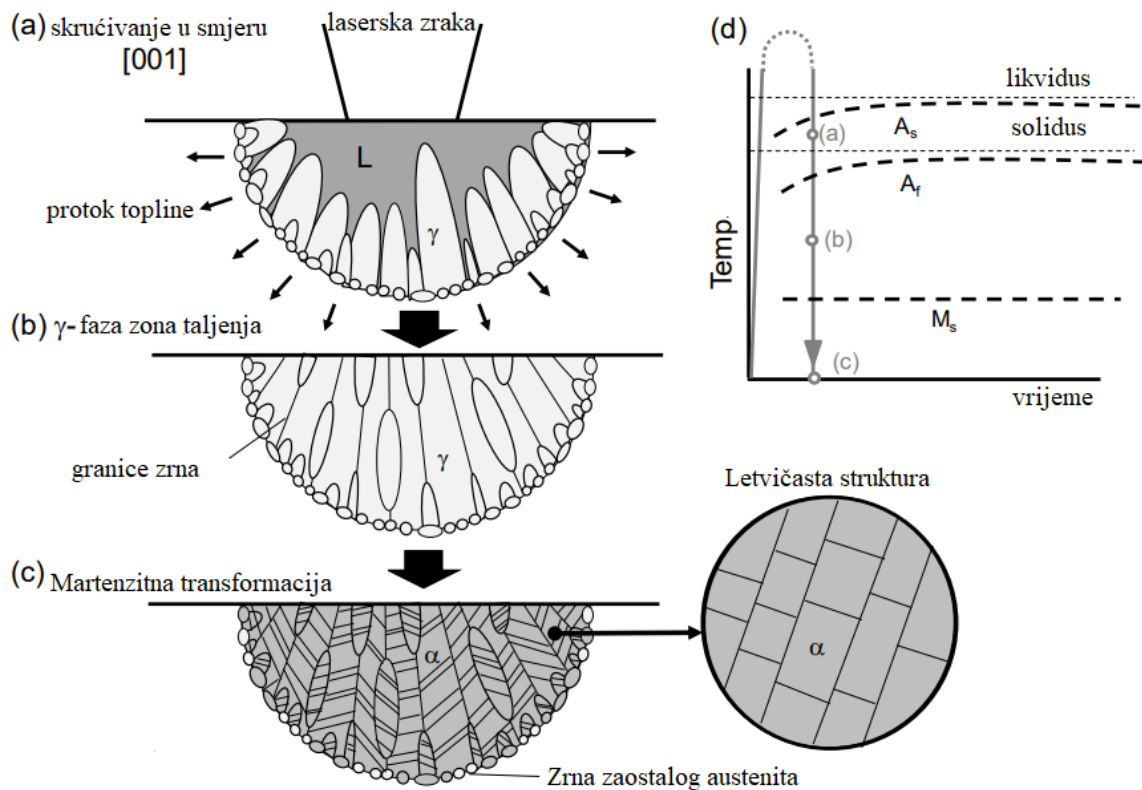
4.1. Mikrostruktura

Za razliku od konvencionalno proizvedenih MARAGING 300 čelika, SLM postupak ne zahtjeva provođenje homogenizacijskog žarenja. To je moguće zbog brzog hlađenja zona taljenja kojim nastaje prezasićena čvrsta otopina spremna za precipitacijsko očvršćivanje. Proizvodnja je znatno skraćena jer se odmah nakon izrade dijelova može krenuti sa postupkom precipitacijskog očvršćivanja, to jest toplinskom obradom dozrijevanja [61].

Laserska zraka stvara zone taljenja zagrijavanjem i taljenjem lokalnih područja sloja praha. Austenit (γ -faza) formira se prvi hlađenjem taline ispod 1400 °C (solidus linija) i raste prema središtu zone taljenja. Do 800 °C mikrostruktura je monofazna austenitna. Zrna austenita, uslijed brzog hlađenja, imaju orijentaciju skrućivanja {001}. Ispod 800 °C izlučuju se intermetalni spojevi μ -Fe₇Mo₆ i η -Ni₃T. Daljnjim hlađenjem ispod 650 °C nastaje martenzit (α -faza). Što je veća brzina hlađenja, više je udio zaostalog austenita na granicama zona taljenja nego unutar samih zona taljenja. To pridonosi vlačnoj duktilnosti MARAGING čelika dobivenih SLM postupkom. Zaostali austenit na granicama zona taljenja sprječava potencijalni lom, duž istih granica, koji se inače može pojaviti ovisno o smjeru izgradnje kod ostalih legura. Zbog toga kod MARAGING čelika vlačna duktilnost ne ovisi o smjeru izgradnje. Na temperaturama ispod 200 °C dolazi do stvaranja letvičaste strukture martenzita (engl. lath martensite structure). Zadržavanjem malog udjela austenita unutar martenzita letvičaste strukture mogu se poboljšati eksploatacijska svojstva MARAGING čelika dobivenih SLM postupkom [62]. Na slici 13 prikazan je dijagram prisutnih faza u MARAGING čeliku ovisno o temperaturi i udjelu nikla, a na slici 14 prikazano je formiranje mikrostrukture MARAGING čelika tijekom SLM postupka.



Slika 13. Fazni dijagram MARAGING čelika [62]



Slika 14. Formiranje mikrostrukture MARAGING čelika SLM postupkom [62]

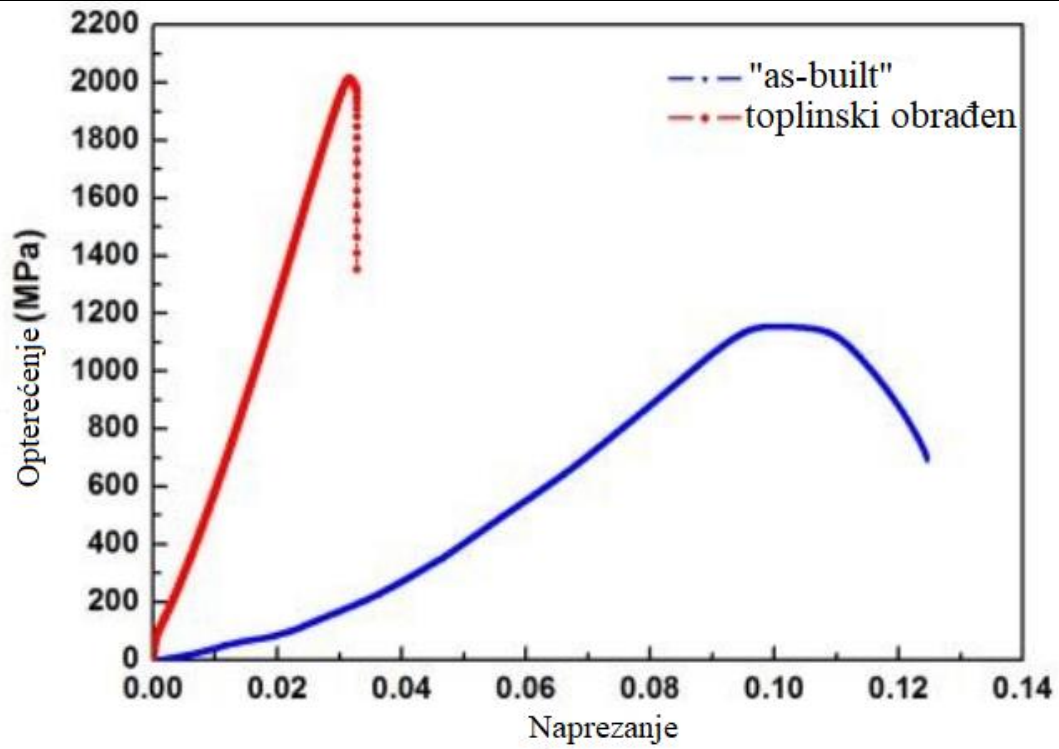
4.2. Svojstva

EOS MaragingSteel MS1 je materijal praha korišten u ovom radu. Svojstva ovog praha u isporučenom stanju posljedica su orijentacije izgradnje. Orijetacija izgradnje utječe na anizotropiju materijala koja uzrokuje pojavu zaostalih naprezanja i poroznosti. Poroznosti smanjuju otpornost umoru materijala. Zaostala naprezanja vode do dimenzijske nestabilnosti, a javljaju se zbog kratkog i intenzivnog djelovanja lasera na prah te naknadnog brzog hlađenja zona taljenja. Postiziva mehanička svojstva nakon toplinske obrade dozrijevanja ovise o parametrima. Parametri toplinske obrade dozrijevanja su temperatura dozrijevanja i vrijeme držanja [61].

Tvrdoća isporučenih uzoraka iznosi od 35-36 HRC, dok tvrdoća uzoraka izloženih toplinskoj obradi na 490 °C u trajanju od 6 sati iznosi od 51-55 HRC. Dozrijevanje znatno povisuje tvrdoću MARAGING čelika proizvedenih SLM postupkom. Na slici 15 prikazan je dijagram krivulja naprezanja za uzorke u isporučenom stanju i uzorke nakon dozrijevanja u trajanju od 6 sati pri 490 °C. Vlačna čvrstoća i konvencionalna granica razvlačenja toplinski obrađenih uzoraka su povišene u odnosu na isporučene uzorke, dok je istezanje pri lomu znatno smanjeno. Dozrijevanje povisuje čvrstoću, ali smanjuje duktilnost [63]. U tablici 1 prikazane su vrijednosti mehaničkih svojstava prije i nakon toplinske obrade.

Tablica 1. Mehanička svojstva u isporučenom stanju i nakon toplinske obrade [63]

Uzorak	Rm (MPa)	Rp _{0,2} (MPa)	ε (%)	HRC
SLM	1165±7	1967±11	12,44±0,14	35~36
SLM + toplinska obrada	2014±9	915±7	3,28±0,05	51~55



Slika 15. Krivulje naprezanja isporučenih (engl. as-built) i toplinski obrađenih uzoraka [63]

5. Eksperimentalni dio

5.1. Plan istraživanja

Uzorci su isprintani postupkom selektivnog laserskog taljenja praha EOS MaragingSteel MS1 na uređaju EOS M 290. Nakon izrade provedena je toplinska obrada uzoraka u LIMS-u te ispitivanje tvrdoće.

5.2. Materijal praha

EOS MaragingSteel MS1 ima dobra mehanička svojstva i pogodan je za toplinsku obradu. Optimalni parametri toplinske obrade iz literature su temperatura dozrijevanja od 490 °C i vrijeme držanja od 6 sati. Dijelovi od ovog čelika su lako obradivi nakon izgradnje. Mogu se strojno obrađivati, obrađivati elektroerozijom iskrom, zavarivati, sačmariti, polirati i prevlačiti [64]. U tablici 2 prikazan je kemijski sastav EOS MaragingSteel MS1 dobiven od proizvođača (Metalska jezgra Čakovec).

Tablica 2. Kemijski sastav EOS MaragingSteel MS1

Oznaka uzorka	%												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Ti	Al	Co	Fe
NU	0,02	0,05	0,10	0,006	0,003	0,32	4,22	16,68	0,07	0,71	0,12	9,7*	ostatak

5.3. Izrada uzoraka

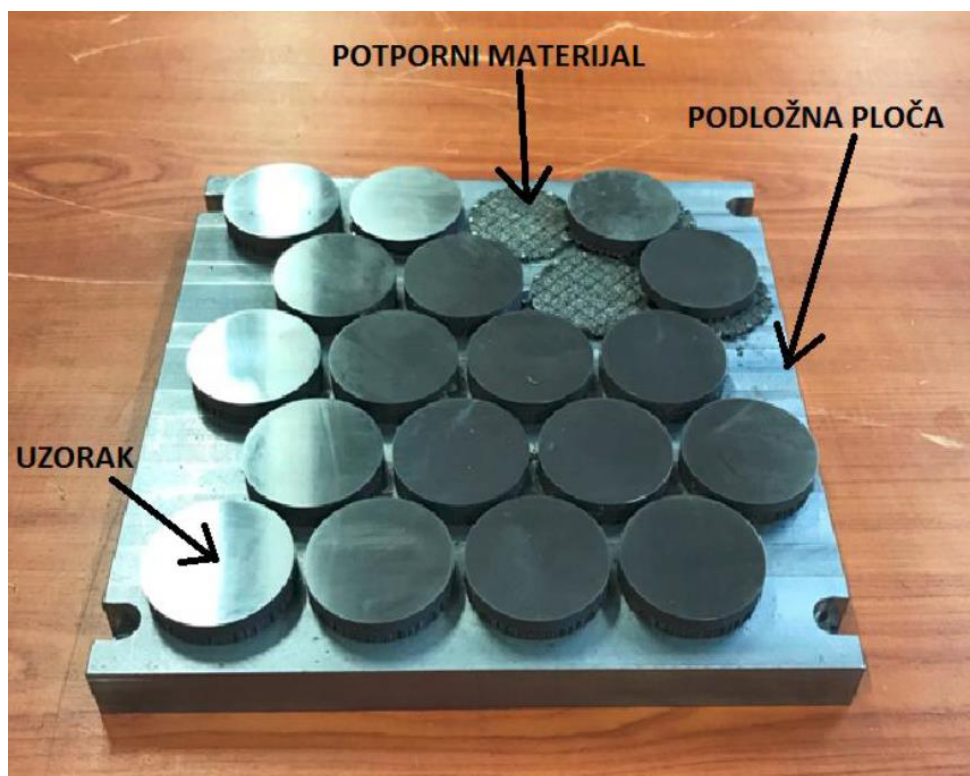
Metalska jezgra Čakovec izrađuje uzorke pomoću EOS M 290 uređaja za 3D printanje metalnih dijelova tehnologijom selektivnog laserskog taljenja. EOS M 290 omogućuje izgradnju komponenata od velikog broja materijala koji uključuju aluminijske legure, bakrene legure, legure titanija i različite vrste čelika [65]. Na slici 16 prikazan je EOS M 290 uređaj za 3D printanje. Izrađeno je 20 uzoraka sa optimalnim parametrima uređaja preporučenim od proizvođača. Promjer svakog od uzoraka iznosi 50 mm, a debljina 6 mm.



Slika 16. EOS M 290 3D printer [66]

5.4. Priprema površine za ispitivanje tvrdoće

Ispitna površina uzoraka naknadno je obrađena brušenjem i poliranjem sukladno normi HRN EN ISO 6507-3:2018 za ispitivanje tvrdoće, a poledina uzoraka je samo brušena. Na slici 17 prikazani su uzorci izrađeni pomoću EOS M 290 uređaja za 3D printanje.

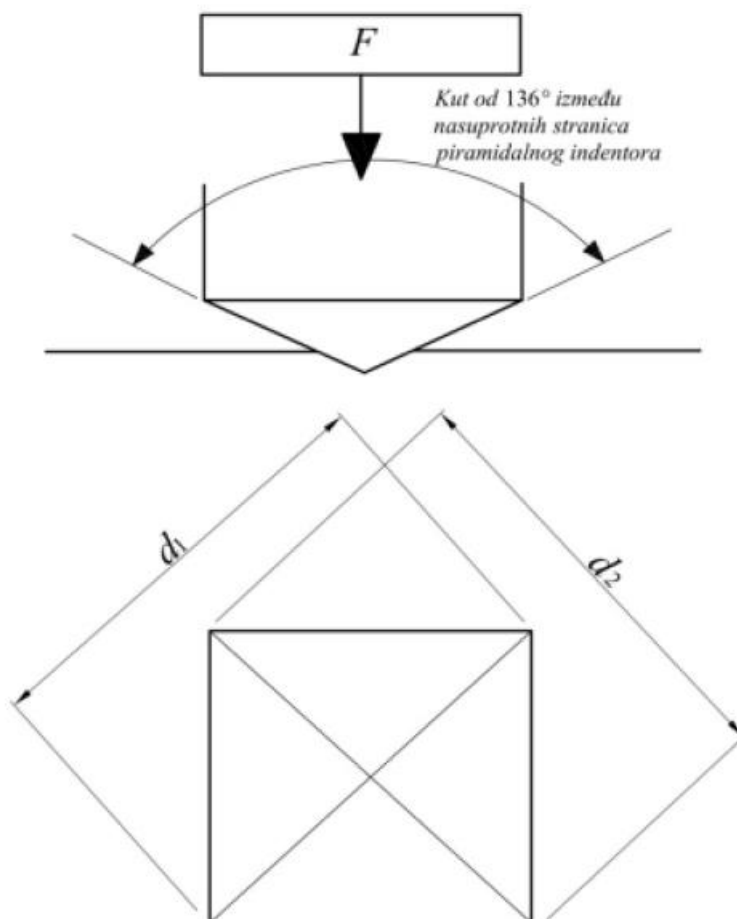


Slika 17. Uzorci napravljeni SLM postupkom na EOS M 290 uređaju

5.5. Vickers metoda ispitivanja tvrdoće

Indentor Vickers metode je četverostrana piramida. Kut između stranica piramide je 136° .

Vickers metoda riješila je glavne probleme koji su se javljali kod upotrebe Brinellove metode. Uvođenjem dijamantnog indentora moguće je mjeriti i najtvrdje materijale, a izmjerena tvrdoća više ne ovisi o primijenjenoj sili zbog geometrije indentora [67]. Na slici 18 prikazani su indentor i otisak Vickers metode.



Slika 18. Otisak indentora za Vickers metodu [69]

Nakon utiskivanja indentora u ispitnu površinu silom F , mjere se duljine dijagonala d_1 i d_2 te se izračunava iznos izmjerene tvrdoće prema izrazu [68]:

$$HV = 0,102 \times \frac{2F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad [HV] \quad (1)$$

5.6. Ispitivanje tvrdoće

U ovom radu tvrdoća se ispitivala metodama HV2 i HV10. Prvo se ispitivala tvrdoća isporučenih uzoraka, a nakon toga tvrdoća toplinski obrađenih uzoraka. Tvrdomjer INDENTEC, tipa ZHV μ , pomoću kojeg se ispitivala tvrdoća metodom HV2, prikazan je na slici 19. Zwick tvrdomjer, pomoću kojeg se ispitivala tvrdoća metodom HV10, prikazan je na slici 20.



Slika 19. INDENTEC ZHV μ tvrdomjer



Slika 20. Zwisch tvrdomjer

5.6.1. Ispitivanje tvrdoće isporučenih uzoraka

Najprije se ispitivala tvrdoća uzoraka prije toplinske obrade, u stanju kakvom su dostavljeni.

Tablica 3 prikazuje rezultate izmjerenih tvrdoća uzoraka prije toplinske obrade.

Tablica 3. Izmjerene tvrdoće uzoraka u isporučenom stanju

Mjerenje	1	2	3	4	5	srednja vrijednost
HV2	391	390	385	386	387	387,8
HV10	396	401	396	386	381	392

5.6.2. Toplinska obrada uzoraka

Toplinska obrada provedena je u komori za toplinsku obradu u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Na slici 21 je prikazana komora za toplinsku obradu.



Slika 21. Toplinska komora u LIMS-u

Na 7 uzoraka izrađenih postupkom selektivnog laserskog taljenja (SLM) pomoću uređaja EOS M 290 provedena je toplinska obrada dozrijevanjem. Konvencionalno se MARAGING toplinska obrada sastoji od homogenizacijskog žarenja, gašenja i dozrijevanja. Međutim, zbog same prirode SLM postupka nije potrebno provoditi homogenizacijsko žarenje, već samo dozrijevanje. U tablici 4 su prikazane temperature dozrijevanja i vremena držanja za svaki od 7 uzoraka. Iz pregleda literature odabrali smo temperature dozrijevanja i vremena držanja s ciljem dobivanja različitih vrijednosti tvrdoća.

Tablica 4. Parametri toplinske obrade uzoraka

Temperatura dozrijevanja, °C	Vrijeme držanja, h
405	4,5
430	1
430	8
490	4,5
490	9,5
550	8
575	4,5

5.6.3. Ispitivanje tvrdoće toplinski obrađenih uzoraka

Nakon toplinske obrade, ispitivala se tvrdoća uzoraka ispitnim metodama HV2 i HV10. U tablici 5 prikazani su rezultati srednjih vrijednosti tvrdoća za svaki od 7 uzoraka, ovisno o metodi ispitivanja. Tvrdoća se mjerila u liniji promjera uzorka od oboda prema suprotnom obodu. Za svaki uzorak provedeno je 10 mjerenja tvrdoće i uzeta je srednja vrijednost.

Tablica 5. Srednje vrijednosti tvrdoće nakon toplinske obrade

Uzorak	Temperatura dozrijevanja, °C	Vrijeme držanja, h	Srednja vrijednost HV2	Srednja vrijednost HV10
1	405	4,5	433,2	437,3
2	430	1	474,7	480,8
3	430	8	562,7	567,3
4	490	4,5	544,6	555,9
5	490	9,5	573,2	573,5
6	550	8	536,9	541,1
7	575	4,5	514,7	524,4

5.7. Nejednolikost površinske tvrdoće

Jednolikost/nejednolikost tvrdoće r_{rel} predstavlja omjer razlike najveće i najmanje tvrdoće i srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća, a izražava se u postotcima. Računa se prema izrazu:

$$r_{rel} = 100 \times \frac{H_n - H_1}{\bar{H}} \quad [\%] \quad (2)$$

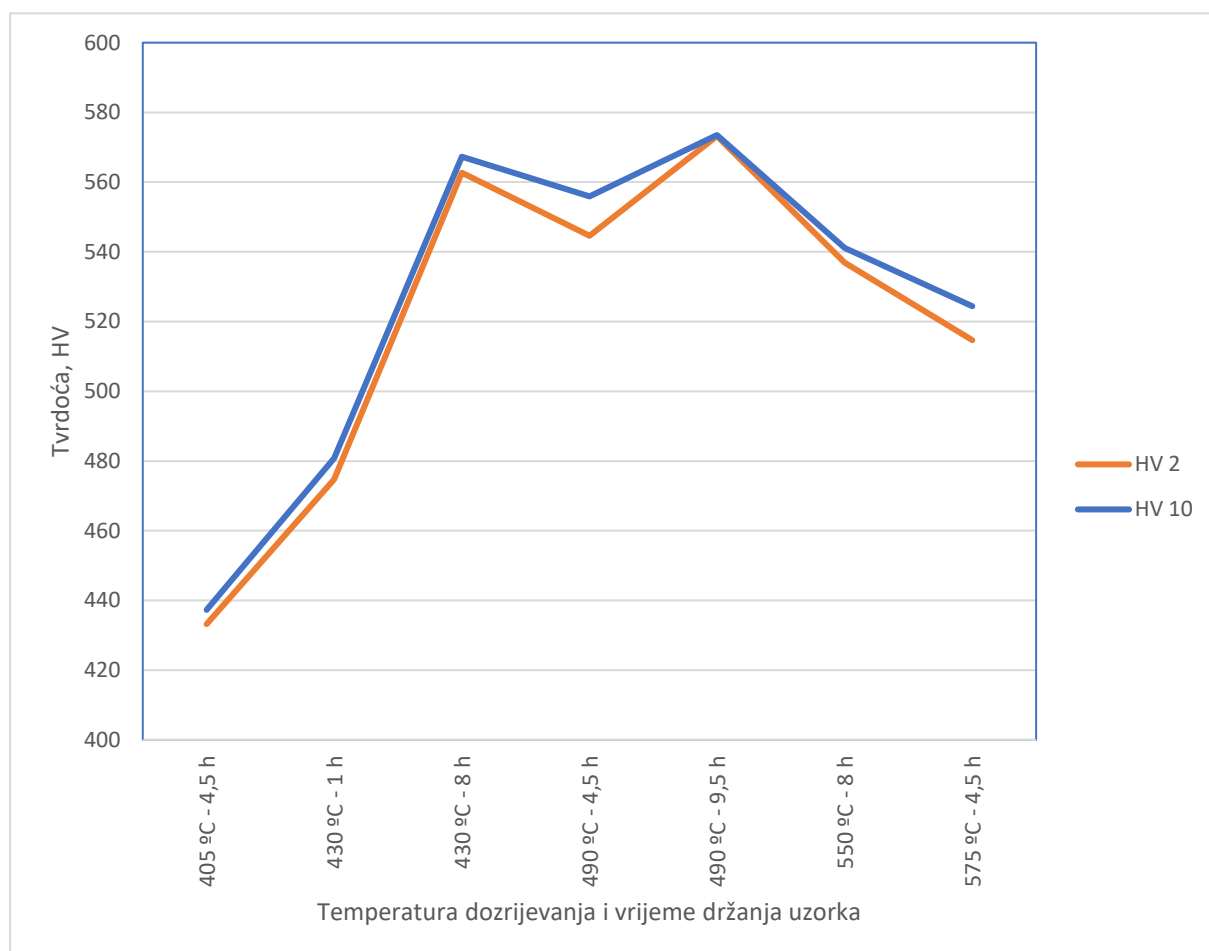
U tablici 6 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće za uzorak broj 5 te dobivena vrijednost nejednolikosti površinske tvrdoće.

Tablica 6. Nejednolikost površinske tvrdoće za uzorak 5

Mjeriteljski uvjeti		Okolišni uvjeti	
Opterećenje	19,61 N	Temperatura	21 °C
Brzina opterećivanja	0,1 mm/s	Tlak	1034 hPa
Vrijeme opterećivanja	15 s	Vlaga	32%
Mjerenje br.	HV2	HV2sr.	rrel, %
1	562	573,2	3,31
2	579		
3	572		
4	570		
5	577		
6	572		
7	575		
8	581		
9	575		
10	569		

6. Analiza

U MS Excel-u napravljen je dijagram rasporeda tvrdoće toplinski obrađenih uzoraka, ovisno o opterećenju, prikazan na slici 22.

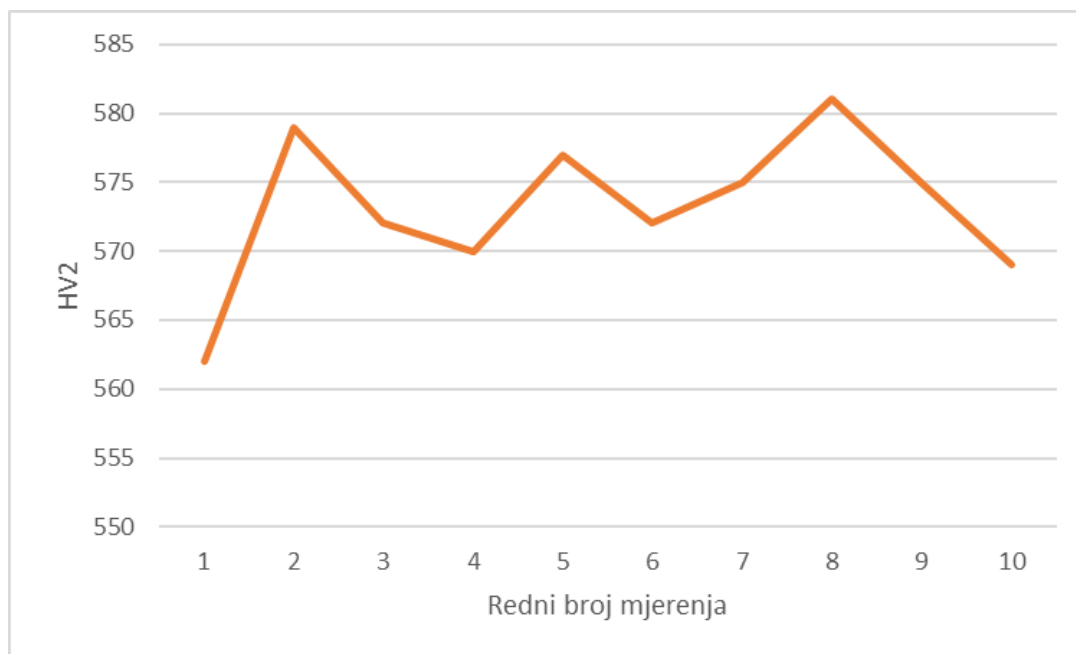


Slika 22. Raspodjela tvrdoće uzoraka ovisno o toplinskoj obradi i opterećenju

Rezultati su davali očekivane iznose vrijednosti tvrdoće s obzirom na polazni materijal. Iz dijagrama na slici 22 može se uočiti rast tvrdoće povišenjem temperature dozrijevanja sve do otprilike 500 °C kada tvrdoća počinje padati. To odgovara pojavi navedenoj u poglavlju o reverziji austenita (3.3 Reverzija austenita). Kada temperatura dozrijevanja prijeđe 500 °C, počinju se otapati Ni_3Mo precipitati. Količina nikla u matrenzitoj matrici raste. Nikal je autenitotvorac i potiče stvaranje austenita. Austenit snižava čvrstoću, a samim time i tvrdoću uzorka.

6.1. Raspodjela površinske tvrdoće uzorka

Na slici 23 prikazane je raspodjela vrijednosti tvrdoća ovisno o rednom broju mjerenja za uzorak broj 5.



Slika 23. Raspodjela površinske tvrdoće za uzorak broj 5

Na dijagramu rasporeda površinske tvrdoće za uzorak broj 5 vidljive su varijacije u iznosu tvrdoće od ruba prema sredini. To se može povezati sa poliranjem bez adekvatnog hlađenja površine. Dolazi do zagrijavanja na središnjim dijelovima uzorka te se uslijed hlađenja mijenja mikrostruktura. Rezultat toga su viši iznosi tvrdoće u sredini uzorka u odnosu na rubove uzorka.

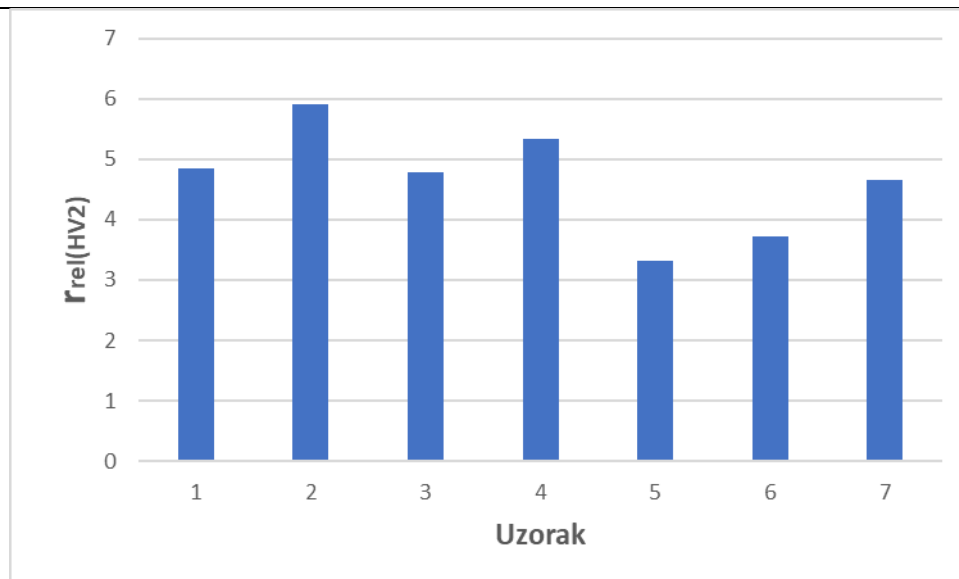
6.2. Nejednolikost površinske tvrdoće uzoraka

U tablici 7 prikazani su iznosi za nejednolikost površinske tvrdoće za sve uzorke ovisno o opterećenju.

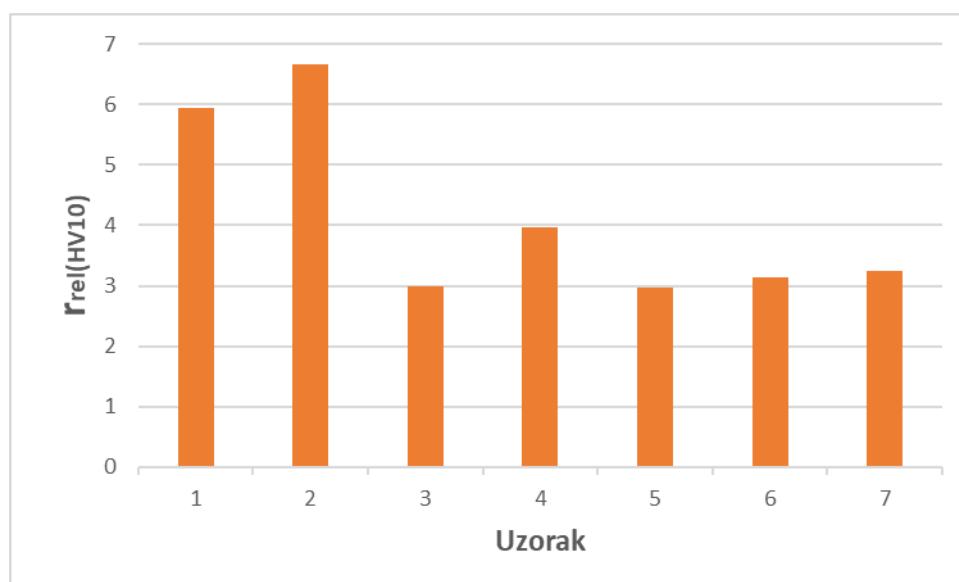
Tablica 7. Vrijednosti nejednolikosti površinske tvrdoće za uzorke ovisno o opterećenju

Uzorak	$r_{\text{rel(HV2), \%}}$	$r_{\text{rel(HV10), \%}}$
1	4,85	5,95
2	5,90	6,66
3	4,79	2,99
4	5,33	3,96
5	3,31	2,96
6	3,73	3,14
7	4,66	3,24

Vrijednosti nejednolikosti površinske tvrdoće su manje od 7% što je vrlo dobro. Iznosi nejednolikosti površine prikazani su u stupčastim dijagramima na slici 24 za metodu HV2 i na slici 25 za metodu HV10.



Slika 24. Dijagram nejednolikosti površinske tvrdoće za metodu HV2



Slika 25. Dijagram nejednolikosti površinske tvrdoće za metodu HV10

7. Zaključak

Razvoj tehnologija aditivne proizvodnje omogućio je izradu geometrijski složenih komponenti koje konvencionalnim postupcima izrade ne bismo mogli ostvariti. SLM postupkom iz niza različitih materijala dobivamo dijelove zadovoljavajućih svojstava. Postiziva relativna gustoća je približno 100%. Vrijednosti čvrstoće i tvrdoće dijelova dobivenih SLM-om obično su više od vrijednosti postignutih konvencionalnim tehnologijama zbog ujednačenije strukture. Kvaliteta površine nije sjajna te je potrebno provesti završnu obradu površine brušenjem i/ili poliranjem. Zbog visoke cijene opreme, SLM kao i većina tehnologija aditivne proizvodnje, najviše se koristi za male serije proizvodnje i izradu prototipova.

Iz rezultata ispitivanja može se zaključiti sljedeće.

1. SLM postupkom aditivne proizvodnje mogu se dobiti kompaktni uzorci bez poroznosti.
2. Moguće je provesti uspješnu toplinsku obradu. Postiže se očekivani raspon tvrdoća. Neovisno o opterećenju, vrijednosti tvrdoća su vrlo slične. To ukazuje na ujednačenu mikrostrukturu, bez lokaliziranih precipitata, koju možemo postići SLM postupkom.
3. Nejednolikosti površinske tvrdoće po površini uzoraka su u razinama manjim od 7%.
4. SLM postupkom je moguće pouzdano proizvoditi uzorke ponovljive kvalitete i svojstava.

LITERATURA

- [1] Carlo Masneri: Microstructural and mechanical properties of maraging steel parts produced by selective laser melting, Milano School of Industrial and Information Engineering.
- [2] C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh, S. L. Sing: Review of selective laser melting: Materials and applications.
- [3] Li, R., Liu, J., Shi, Y. et al.: Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. *Int J Adv Manuf Technol* 59, 1025–1035 (2011).
- [4] P. Krakhmalev, I. Yadroitsev: Microstructure and properties of intermetallic composite coatings fabricated by selective laser melting of Ti–SiC powder mixtures, *Intermetallics*, Volume 46, 147-155 (2014).
- [5] Tolochko, N.K., Khlopkov, Y.V., Mozzharov, S.E., Ignatiev, M.B., Laoui, T. and Titov, V.I.: "Absorptance of powder materials suitable for laser sintering", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 6 No. 3, 155-161 (2000).
- [6] L.E. Loh, Z.H. Liu, D.Q. Zhang, M. Mapar, S.L. Sing, C.K. Chua & W.Y. Yeong: Selective Laser Melting of aluminium alloy using a uniform beam profile, *Virtual and Physical Prototyping*, 9:1, 11-16.
- [7] S. Das: Physical Aspects of Process Control in Selective Laser Sintering of Metals, *Adv. Eng. Mater.* 5, 701–711 (2003).
- [8] K. Kempen, B. Vrancken, L. Thijs, S. Bols, J. Van Humbeeck, and J.-P. Kruth, in *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, 2013, Austin, TX, USA (The University of Texas at Austin).
- [9] M. Shiomi, K. Osakada, K. Nakamura, T. Yamashita, F. Abe: Residual Stress within Metallic Model Made by Selective Laser Melting Process, *CIRP Annals*, Volume 53, Issue 1, 195-198 (2004).
- [10] E. Yasa, J. Deckers, J.-P. Kruth, M. Rombouts, and J. Luyten, in *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis* (ASME, 2010), pp. 695–703.
- [11] Y.-C. Hagedorn, J. Wilkes, W. Meiners, K. Wissenbach, and R. Poprawe, *Phys. Proc.* 5, 587–594 (2010).

- [12] T.H.C. Childs, C. Hauser, M. Badrossamay: Mapping and Modelling Single Scan Track Formation in Direct Metal Selective Laser Melting, *CIRP Annals*, Volume 53, Issue 1, 191-194 (2004).
- [13] Childs T.H.C., Hauser C., Badrossamay M.: Selective laser sintering (melting) of stainless and tool steel powders: Experiments and modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2005;219(4):339-357.
- [14] Jerrard P.G.E., Hao L., Evans K.E.: Experimental investigation into selective laser melting of austenitic and martensitic stainless steel powder mixtures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2009;223(11):1409-1416.
- [15] M. Santorinaios, W. Brooks, C. J. Sutcliffe, and R. A. W. Mines: *High Performance Structures and Materials III* (WIT Press, 2006), pp. 481–490.
- [16] T. Wohlers: *Wohlers Report* (Wohlers Associates, 2015).
- [17] Abe F., Costa Santos E., Kitamura Y., Osakada K., Shiomi M.: Influence of forming conditions on the titanium model in rapid prototyping with the selective laser melting process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2003;217(1):119-126.
- [18] Laoui T., Santos E., Osakada K., et al.: Properties of Titanium Dental Implant Models Made by Laser Processing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2006;220(6):857-863.
- [19] L. Mullen, R. C. Stamp, W. K. Brooks, E. Jones, and C. J. Sutcliffe, J. Biomed.: Selective Laser Melting: A regular unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone in-growth constructs, suitable for orthopedic applications, *Mater. Res., Part B* 89B, 325–334 (2009).
- [20] Stamp, R., Fox, P., O'Neill, W. et al.: The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting. *J Mater Sci: Mater Med* 20, 1839–1848 (2009).
- [21] L. C. Zhang and T. B. Sercombe, *Powder Metallurgy of Titanium: Powder Processing, Consolidation and Metallurgy of Titanium* (Trans Tech Publications, 2012), pp. 226–233.

- [22] Santos E.C., Osakada K., Shiomi M., Kitamura Y., Abe F.: Microstructure and mechanical properties of pure titanium models fabricated by selective laser melting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2004;218(7):711-719.
- [23] Liciane Sabadin Bertol, Wilson Kindlein Júnior, Fabio Pinto da Silva, Claus Aumund-Kopp: Medical design: Direct metal laser sintering of Ti–6Al–4V, *Materials & Design*, Volume 31, Issue 8, 3982-3988 (2010).
- [24] Clare, A.T., Chalker, P.R., Davies, S. et al.: Selective laser melting of high aspect ratio 3D nickel–titanium structures two way trained for MEMS applications. *Int J Mech Mater Des* 4, 181–187 (2008).
- [25] H. Meier, C. Haberland, J. Frenzel, and R. Zarnetta: *Selective Laser Melting of NiTi Shape Memory Components* (CRC Press, 2010), pp. 233–238.
- [26] H. Meier, C. Haberland, and J. Frenzel: *Structural and Functional Properties of NiTi Shape Memory Alloys Produced by Selective Laser Melting* (CRC Press, 2012), pp. 291–296.
- [27] Zemin Wang, Kai Guan, Ming Gao, Xiangyou Li, Xiaofeng Chen, Xiaoyan Zeng: The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 513, 518-523 (2012).
- [28] T. Habijan, C. Haberland, H. Meier, J. Frenzel, J. Wittsiepe, C. Wuwer, C. Greulich, T.A. Schildhauer, M. Köller: The biocompatibility of dense and porous Nickel–Titanium produced by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: C*, Volume 33, Issue 1, 419-426 (2013).
- [29] Maria Averyanova, Philippe Bertrand & Benoît Verquin: Manufacture of Co-Cr dental crowns and bridges by selective laser Melting technology, *Virtual and Physical Prototyping*, 6:3, 179-185 (2011).
- [30] M. Ameli, B. Agnew, P.S. Leung, B. Ng, C.J. Sutcliffe, J. Singh, R. McGlen: A novel method for manufacturing sintered aluminium heat pipes (SAHP), *Applied Thermal Engineering*, Volume 52, Issue 2, 498-504 (2013).
- [31] Zhang, D., Cai, Q., Liu, J. et al. Research on Process and Microstructure Formation of W-Ni-Fe Alloy Fabricated by Selective Laser Melting. *J. of Materi Eng and Perform* 20, 1049–1054 (2011).
- [32] Khan, M. and Dickens, P.: Selective laser melting (SLM) of gold (Au), *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 18 No. 1, pp. 81-94. (2012).

- [33] Jhabvala, J., Boillat, E. & Glardon, R.: On the use of EBSD analysis to investigate the microstructure of gold samples built by selective laser melting. *Gold Bull* 44, 113–118 (2011).
- [34] P. Jerrard, L. Hao, S. Dadbakhsh, and K. Evans, in *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference* (Springer, 2010), pp. 487–490.
- [35] Wilkes, J., Hagedorn, Y., Meiners, W. and Wissenbach, K.: Additive manufacturing of ZrO₂-Al₂O₃ ceramic components by selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 19 No. 1, pp. 51-57. (2013).
- [36] I. Shishkovsky, I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, I. Smurov: Alumina–zirconium ceramics synthesis by selective laser sintering/melting, *Applied Surface Science*, Volume 254, Issue 4, Pages 966-970 (2007).
- [37] Y. C. Hagedorn, N. Balachandron, W. Meiners, K. Wissenbach, and R. Poprawe, in *SFF Symposium, 2011, Austin, TX, USA* (University of Texas at Austin).
- [38] L. Hao, S. Dadbakhsh, O. Seaman, M. Felstead: Selective laser melting of a stainless steel and hydroxyapatite composite for load-bearing implant development, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 209, Issue 17, 5793-5801 (2009).
- [39] Mumtaz, K.A., Hopkinson, N. Laser melting functionally graded composition of Waspaloy® and Zirconia powders. *J Mater Sci* 42, 7647–7656 (2007).
- [40] Dongdong Gu, Wilhelm Meiners: Microstructure characteristics and formation mechanisms of in situ WC cemented carbide based hardmetals prepared by Selective Laser Melting, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 527, Issues 29–30, 7585-7592 (2010).
- [41] Dongdong Gu & Guoquan Zhang: Selective laser melting of novel nanocomposites parts with enhanced tribological performance, *Virtual and Physical Prototyping*, 8:1, 11-18 (2013)
- [42] Ahmed Hussein, Liang Hao, Chunze Yan, Richard Everson, Philippe Young, Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing: *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, Issue 7, 1019-1026 (2013)
- [43] S.F. Wen, C.Z. Yan, Q.S. Wei, L.C. Zhang, X. Zhao, W. Zhu & Y.S. Shi: Investigation and development of large-scale equipment and high performance materials for powder bed laser fusion additive manufacturing, *Virtual and Physical Prototyping*, 9:4, 213-223 (2014).
- [44] Neil Burns: Why AM now has the potential to revolutionise filtration solutions, *Filtration + Separation*, Volume 51, Issue 2, 42-43 (2014).

- [45] L. Nickels: Meeting the mainstream, Metal Powder Report, Special Feature (2015).
- [46] dr. sc. Stjepan Kožuh, doc.: SPECIJALNI ČELICI -skripta-, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak (2010).
- [47] Franjo Cajner, Darko Landek, Vojteh Leskovšek: SURFACE MODIFICATIONS OF MARAGING STEELS USED IN THE MANUFACTURE OF MOULDS AND DIES, Materials and technology 44 (2010) 2, 85–91.
- [48] Cajner F., Krumes D.: MARAGING steels – new tool materials, Proceedings of symposium Modern technologies of heat treatment of steels, Zagreb, Croatia, 11. 6. 1998., 69–80.
- [49] Galindo Nava EI, Rainforth WM, Rivera-Díaz-del-Castillo PEJ.: Predicting microstructure and strength of maraging steels: Elemental optimisation. Acta Materialia 2016;117:270-85.
- [50] Pardal JM, Tavares SSM, Terra VF, Da Silva MR, Dos Santos DR.: Modeling of precipitation hardening during the aging and overaging of 18Ni–Co–Mo–Ti maraging 300 steel. J Alloys Compounds 2005;393(1-2):109-13.
- [51] Li X, Yin Z.: Reverted austenite during aging in 18Ni(350) maraging steel. Mater Lett 1995;24(4):239-42.
- [52] Hossein Nedjad S, Meimandi S, Mahmoudi A, Abedi T, Yazdani S, Shirazi H, Nili Ahmadabadi M.: Effect of aging on the microstructure and tensile properties of Fe–Ni–Mn–Cr maraging alloys. Materials Science & Engineering.A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing 2009;501(1-2):182-7.
- [53] Viswanathan UK, Dey GK, Sethumadhavan V.: Effects of austenite reversion during overageing on the mechanical properties of 18 ni (350) maraging steel. Materials Science & Engineering.A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing 2005;398(1-2):367-72.
- [54] Shetty, K., Kumar, S., Raghothama, R.: Effect of ion nitriding on the microstructure and properties of Maraging steel (250 Grade), Surface & Coatings Technology 203, 1530–1536 (2009).
- [55] Klocke, Fritz & Arntz, Kristian & Teli, Mahesh & Winands, Kai & Wegener, Maximilian & Oliari, Stella. (2017). State-of-the-art Laser Additive Manufacturing for Hot-work Tool Steels. Procedia CIRP. 63. 58-63.

- [56] Fatma Nur Depboylu, Evren Yasa, Özgür Poyraz, Joaquim Minguella-Canela, Feza Korkusuz, M Antonia De los Santos López, Titanium based bone implants production using laser powder bed fusion technology, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 17, 1408-1426 (2022).
- [57] Qingquan Zhang, Shijie Hao, Yuting Liu, Zhiwei Xiong, Wenqian Guo, Ying Yang, Yang Ren, Lishan Cui, Luquan Ren, Zhihui Zhang, The microstructure of a selective laser melting (SLM)-fabricated NiTi shape memory alloy with superior tensile property and shape memory recoverability, *Applied Materials Today*, Volume 19, 2020.
- [58] Schweiger, Josef & Edelhoff, Daniel & Güth, Jan-Frederik. (2021). 3D Printing in Digital Prosthetic Dentistry: An Overview of Recent Developments in Additive Manufacturing. *Journal of Clinical Medicine*.
- [59] <https://www.3dprintekzo.be/products-services/3d-printers/slm-500hl/>
- [60] <https://filters.co.uk/material/metal-3d-printing/>
- [61] Mooney, Barry & Kourousis, Kyriakos. (2020). A Review of Factors Affecting the Mechanical Properties of Maraging Steel 300 Fabricated via Laser Powder Bed Fusion. *Metals - Open Access Metallurgy Journal*.
- [62] Takata, N.; Nishida, R.; Suzuki, A.; Kobashi, M.; Kato, M. Crystallographic Features of Microstructure in Maraging Steel Fabricated by Selective Laser Melting. *Metals* 2018, 8, 440.
- [63] Tan, Chaolin & Zhu, Kesong & Tong, Xin & Huang, Yushan & Li, Jing & Ma, Wenyou & Li, Fuhai & Tongchun, Kuang. (2016). Microstructure and Mechanical Properties of 18Ni-300 Maraging Steel Fabricated by Selective Laser Melting.
- [64] EOS GmbH - Electro Optical Systems; EOS MaragingSteel MS1/400W; TMS, WEIL / 05.2014
- [65] eos_system_data_sheet_eos_m_290_en.pdf
- [66] <https://na.eos.info/Equipment/Metal-Platforms/EOS-M-290>
- [67] Ivušić V, Franz M, Španiček Đ, Čurković L; Materijali 1; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb; 2014.
- [68] Norma HRN EN ISO 6507-3:2018; Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu – 3. dio: Umjeravanje etalonskih pločica.
- [69] Martinez I. Umjeravanje referentnih etalonskih pločica tvrdoće za metodu Vickers [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.

PRILOG 1

Ispitivanje tvrdoće uključivalo je 10 mjerenja metodom HV2 i 10 mjerenja metodom HV10 za svaki od uzoraka. Rezultati dobivenih vrijednosti tvrdoće za svaki od uzoraka metodom HV2 dani su u tablici 8, a metodom HV10 u tablici 9.

Tablica 8. Izmjerene tvrdoće metodom HV2

HV2							
Mjerenje	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	Uzorak 6	Uzorak 7
1	425	490	562	541	562	532	513
2	435	475	558	548	579	533	516
3	444	481	566	538	572	527	519
4	432	462	564	548	570	541	524
5	425	470	574	556	577	535	500
6	428	480	548	548	572	530	516
7	427	483	562	561	575	533	513
8	439	473	554	538	581	545	520
9	431	471	564	532	575	547	512
10	446	462	575	536	569	546	514

Tablica 9. Izmjerene tvrdoće metodom HV10

HV10							
Mjerenje	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	Uzorak 6	Uzorak 7
1	430	461	559	554	574	545	530
2	432	487	576	542	576	534	518
3	435	460	572	559	574	544	515
4	439	492	574	548	567	536	522
5	442	487	571	558	568	540	530
6	427	483	564	564	578	532	518
7	436	486	559	553	581	545	527
8	438	487	561	559	579	541	532
9	453	480	563	564	574	545	530
10	441	485	574	558	564	549	522