

Karakterizacija 3D printanih etalonskih pločica tvrdoće

Jurak, Franciska

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:235:856238>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-11**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Franciska Jurak

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Alar, dipl. ing.

Student:

Franciska Jurak

Zagreb, 2022

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

Zahvaljujem se svom mentoru red. prof. dr. sc. Željku Alaru i asistentu Danielu Pustičkom, mag. ing. mech. na smjericama, savjetima i pomoći pruženoj tijekom izrade ovog završnog rada.

Također zahvaljujem razvojno-edukacijskom centru za metalsku industriju-Metalska jezgra Čakovec na suradnji na ovome projektu.

Franciska Jurak



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: **Franciska Jurak** JMBAG: **0035217296**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija 3D printanih etalonskih pločica tvrdoće**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of 3D printed hardness standard blocks**

Opis zadatka:

Postupak 3D printanja danas se koristi u proizvodnji različitih proizvoda. S obzirom na zahtjeve koje moraju ispunjavati etalonske pločice tvrdoće vrlo važno je definirati tehnološke parametre 3D printanja u cilju stvaranja homogene mikrostrukture.

U radu je potrebno:

1. Opisati značajna svojstva i zahtjeve na etalonske pločice sukladno normama
2. Proučiti literaturu i napraviti uvid u trenutno stanje primjene 3D printanja
3. U ekperimentalnom dijelu izraditi etalonske pločice tvrdoće te provesti karakterizaciju materijala
4. Analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

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.

Zadatak zadao:


Izv.prof. dr.sc. Željko Alar

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
1.1. Svojstva etalonskih pločica tvrdoće	1
1.2. Zahtjevi na etalonske pločice sukladno normi	2
1.3. Utjecaj etalonskih pločica tvrdoće na mjernu sljedivost tvrdoće.....	3
2. 3D PRINTANJE METALA	5
2.1. Povijest i razvoj 3D printanja.....	5
2.2. Postupak izrade 3D tvorevina	8
2.3. Procesi 3D proizvodnje metalnih proizvoda	9
2.3.1. Selektivno lasersko srašćivanje metala (eng. Selective Laser Sintering - SLS) .	10
2.3.2. Izravno lasersko srašćivanje metala (eng. Direct Metal Laser Sintering - DMLS)	11
2.3.3. Selektivno lasersko srašćivanje taljenje (eng. Selective Laser Melting - SLM).	12
2.3.4. 3D tiskanje metala (postupak ProMetal).....	13
2.3.5. Izravno taloženje metala (eng. Laser Engineering Net Shaping - LENS)	14
2.3.6. Izravno taloženje metalnog praha (eng. Direct Metal Deposition - DMD)	15
2.3.7. Taljenje s pomoću snopa elektrona (eng. Electron Beam Melting - EBM).....	16
3. EKSPERIMENTALNI DIO	18
3.1. Plan ispitivanja	18
3.2. Izbor materijala praha	18
3.3. 3D print tehnologija	19
3.4. Provedba izrade	20
3.5. Priprema površine	21
3.6. Ispitivanje tvrdoće.....	22
3.6.1. Općenito o Vickers metodi	22
3.6.2. Mjerenja tvrdoće	23
3.7. Metalografska analiza	30
3.7.1. Priprema ispitne površine.....	31
3.7.2. Analiza mikrostrukture	33
4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA	37
4.1. Analiza rezultata mjerenja tvrdoće	37
4.2. Analiza metalografskih ispitivanja.....	41
5. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44

POPIS SLIKA

Slika 1. Oblici etalonskih pločica tvrdoće po Vickersu [2].....	3
Slika 2. Sljedivost mjerenja tvrdoće [1]	4
Slika 3. Područja primjene aditivne proizvodnje u 2017. godini [8]	7
Slika 4. Prikaz proizvodnje 3D dijelova u 2021. godini [9].....	7
Slika 5. Faze 3D proizvodnje [5]	8
Slika 6. Uobičajen proces 3D proizvodnje metala [6]	9
Slika 7. SLS postupak [10].....	10
Slika 8. DMLS postupak [10]	11
Slika 9. SLM postupak [11]	12
Slika 10. ProMetal postupak [10].....	13
Slika 11. LENS postupak [10].....	14
Slika 12. DMD postupak [10]	15
Slika 13. EBM postupak [10]	16
Slika 14. Uređaj EOS M 290 [14].....	20
Slika 15. Etalonske pločice tvrdoće napravljene pomoću EOS M 290 uređaja.....	21
Slika 16. Primjer indentora i otiska kod Vickersove metode [1]	22
Slika 17. Skala tvrdoće po Vickersu [4].....	23
Slika 18. Ispitni tvrdomjer INDENTEC.....	24
Slika 19. Ispitivanje uzorka etalonske pločice tvrdoće	24
Slika 20. Prikaz otiska indentora i rezultata tvrdoće uz veće povećanje.....	25
Slika 21. Tvrdomjer Zwick	27
Slika 22. Uređaj Indentec 5030TKV	29
Slika 23. Uređaj Mecatome T260	30
Slika 24. Uređaj Mecatech 250	31
Slika 25. Prikaz poliranog uzorka	32
Slika 26. Uređaj OLYMPUS GX51	33
Slika 27. Prikaz mikrostrukture u uzdužnom smjeru poliranog uzorka uvećanja 50x.....	34
Slika 28. Prikaz mikrostrukture u poprečnom smjeru poliranog uzorka uvećanja 50x	34
Slika 29. Prikaz mikrostrukture u uzdužnom smjeru nagriženog uzorka uvećanja 50x	35
Slika 30. Prikaz mikrostrukture u uzdužnom smjeru nagriženog uzorka uvećanja 100x	35
Slika 31. Prikaz mikrostrukture u poprečnom smjeru nagriženog uzorka uvećanja 50x	36
Slika 32. Prikaz mikrostrukture u poprečnom smjeru nagriženog uzorka uvećanja 100x	36
Slika 33. Prikaz srednje vrijednosti tvrdoće s obzirom na zadano opterećenje	37
Slika 34. Graf ovisnosti ΔHV o zadanom opterećenju	38
Slika 35. Graf novih vrijednosti srednje tvrdoće s obzirom na zadano opterećenje	39
Slika 36. Graf novog ΔHV u ovisnosti o zadanom opterećenju	40
Slika 37. Prikaz martenzitne mikrostrukture iz literature: a) u poprečnom smjeru; b) u uzdužnom smjeru [15].....	41
Slika 38. Prikaz SEM analize [15]	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci EBM postupka [8].....	17
Tablica 2. Prikaz fizikalnih i kemijskih svojstava [13].....	19
Tablica 3. Rezultati ispitivanja za HV 0,5.....	25
Tablica 4. Rezultati ispitivanja za HV 1.....	26
Tablica 5. Rezultati ispitivanja za HV 2.....	26
Tablica 6. Rezultati ispitivanja za HV 5.....	28
Tablica 7. Rezultati ispitivanja za HV 10.....	28
Tablica 8. Rezultati ispitivanja za HV 20.....	29
Tablica 9. Prikaz rezultata srednje vrijednosti tvrdoće s obzirom na opterećenje.....	37
Tablica 10 Prikaz razlike, minimalne i maksimalne vrijednosti s obzirom na opterećenje.....	38
Tablica 11. Prikaz nove vrijednosti srednje tvrdoće s obzirom na zadano opterećenje.....	39
Tablica 12. Prikaz nove razlike, minimalnih i maksimalnih vrijednosti s obzirom na opterećenje.....	40

.
. .
. .

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
HV	HV	Tvrdoća po Vickersu
<i>F</i>	N	Primjenjena sila
d_1	mm	Dijagonala otisaka
d_2	mm	Dijagonala otisaka
d	mm	Srednja vrijednost dijagonala otisaka
<i>Ra</i>	μm	Hrapavost površine

SAŽETAK

U današnje doba postupak 3D printanja sve više ulazi u svakodnevnu primjenu. Aditivnom proizvodnjom moguće je dobiti kvalitetne i geometrijski izazovne proizvode koji zadovoljavaju zahtjeve tržišta. Pri izradi etalonskih pločica pomoću 3D tehnologije važno je definirati parametre kako bi konačni proizvod zadovoljio standarde propisane normama.

U teorijskom dijelu rada dan je uvid u postupak 3D proizvodnje te zahtjeve i svojstva koja moraju ispunjavati etalonske pločice tvrdoće sukladno normi HRN EN ISO 6507-3:2018.

Metalografska analiza i ispitivanje tvrdoće odrađeno je u polaznom stanju pločice te je detaljno razrađeno u eksperimentalnom dijelu.

Ključne riječi: 3D printanje, etalonske pločice tvrdoće, zahtjevi, tvrdoća

SUMMARY

Nowadays, the process of 3D printing is increasingly becoming an everyday application. With additive manufacturing it is possible to obtain quality and geometrically challenging products that meet market demands. When making reference blocks using 3D technology, it is important to define the parameter in order for the final product to meet the standards of the prescribed norms.

The theoretical part of the paper provides an insight into the 3D production process and the requirements and properties that must meet the standard hardness blocks in accordance with the standard HRN EN ISO 6507-3: 2018.

Metallographic analysis and hardness testing was performed in the initial state of the blocks and was elaborated in detail in the experimental part.

Keywords: 3D printing, hardness reference blocks, requirements, hardness

1. UVOD

Etalonske ili referentne pločice tvrdoće referentni su materijali koji se koriste za održavanje mjerne sljedivosti mjerenja tvrdoće kroz indirektno umjeravanje tvrdomjera. Vrijednost jednog ili više svojstava referentnih materijala prihvaćena je kao dostatno homogena i definirana te takvi materijali služe kao posrednici koji uspostavljaju vezu između više i niže pozicioniranih uređaja u mjernom lancu i time osiguravaju mjernu sljedivost tvrdoće.

Pri umjeravanju indirektnom metodom, provjerava se niz utjecajnih čimbenika poput: geometrije indentora, primjenjenog opterećenja te uređaja za očitavanje i vrijeme opterećivanja. Etalonske pločice također je moguće koristiti kao pokazatelje mogućih devijacija navedenih čimbenika.

Ovisno o zahtjevanoj vrijednosti i mjernoj metodi tvrdoće, etalonske pločice mogu biti različitih dimenzija i oblika te mogu biti izrađene od različitih materijala [1].

1.1. Svojstva etalonskih pločica tvrdoće

Osnovna svojstva koja etalonske pločice tvrdoće moraju zadovoljiti su [2]:

1. Ujednačenost (jednolikost) tvrdoće
2. Postojanost tvrdoće tijekom vremena
3. Pouzdanost referentnih vrijednosti.

Ujednačenost tvrdoće po površini ispitnog uzorka smatra se najvažnijim svojstvom koje etalonska pločica tvrdoće mora zadovoljiti. Način dobivanja, kvaliteta materijala, naknadna toplinska i površinska obrada najviše utječu na jednolikost tvrdoće. Pri umjeravanju pločica potrebno je napraviti najmanje pet različito pozicioniranih otisaka kako bi se odredila ujednačenosti tvrdoće, a vrijednosti tih pet točaka moraju biti reprezentativne za cijelu površinu uzorka.

Da bi se tvrdoća smatrala postojanom tijekom vremena, ona se ne smije mijenjati bez obzira na način dobivanja te površinsku i toplinsku obradu materijala. Kako bi se spriječile takve promjene pločice se podvrgavaju postupku toplinske obrade: čelične pločice duboko se hlade

kako bi se uklonio zaostali austenit, a pločice izrađene od mekih materijala toplinski se obrađuju kako bi se uklonila zaostala naprezanja. Ispitivanja postojanosti tvrdoće tijekom vremena provode na se pločicama koje su izdvojene i prikladno očuvane, jer pločice koje su bile u uporabi imaju promjene u mikrostrukturi uzrokovane raznim mehaničkim i toplinskim utjecajima. Do promjene tvrdoće kao posljedice otvrdnuća dolazi tijekom ispitivanja zbog otisaka koji ostavljaju trajnu deformacijsku zonu na površini uzoraka. Zbog toga svaka mjerna metoda ima propisan minimalni razmak između otisaka, a što je veći broj otisaka vrijednost tvrdoće pločica se povećava.

Postupak lot-by-lot proizvodnje uveden je kako bi se osigurala pouzdanost u kvalitetu i referentne vrijednosti. U jednoj seriji proizvedeno je 20 etalonskih pločica, bez obzira na potražnju. Kako bi smanjili pogreške zbog neujednačenosti tvrdoće, preko cijele ispitne površine etalonske pločice tvrdoće određene su pozicije za mjerenje. Ovisno o obliku pločice, na osnovi srednje vrijednosti najmanje pet otisaka izmjerenih na određenim pozicijama dobiva se referentna vrijednost pločice tvrdoće [2].

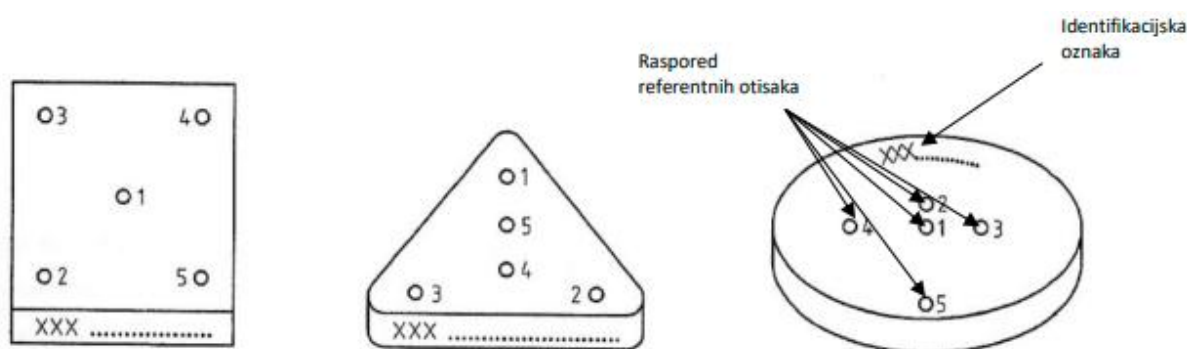
1.2. Zahtjevi na etalonske pločice sukladno normi

Normom HRN EN ISO 6507-3:2018 određeni su zahtjevi koje moraju zadovoljavati etalonske pločice tvrdoće po Vickersu [3]:

- pločica treba biti posebno proizvedena za korištenje kao etalonski blok tvrdoće pomoću procesa koji će joj dati potrebnu homogenost, stabilnost strukture, ujednačenost površinske tvrdoće i stabilnost tvrdoće tijekom vremena
- debljina pločice ne smije biti manja od 5 mm
- površina ispitne površine ne smije biti veća od 40 cm²
- etalonske pločice ne smiju biti magnetične te se preporučuje da, ukoliko su pločice napravljene od čelika, na kraju proizvodnog procesa provede demagnetizacija
- maksimalno odstupanje od ravnosti ispite i donje potporne površine ne smije biti veće od 0,005 mm, a maksimalna pogreška planparalelnosti ne smije biti veća od 0,010 mm na duljini od 50 mm

- ispitna površina ne smije imati oštećenja koja utječu na postupak mjerenja tvrdoće, a hrapavost ispitne površine R_a ne smije biti veća od $0,05 \mu\text{m}$
- kako bi se potvrdilo da nikakav materijal nije uklonjen s referentne pločice, debljina pločice u trenutku umjeravanja treba biti označena na pločici s točnošću $0,01 \text{ mm}$.

Etalonske pločice tvrdoće po Vickersu mogu biti kružnog oblika, trokutastog ili kvadratnog. Prikaz je dan na slici 1.



Slika 1. Oblici etalonskih pločica tvrdoće po Vickersu [2]

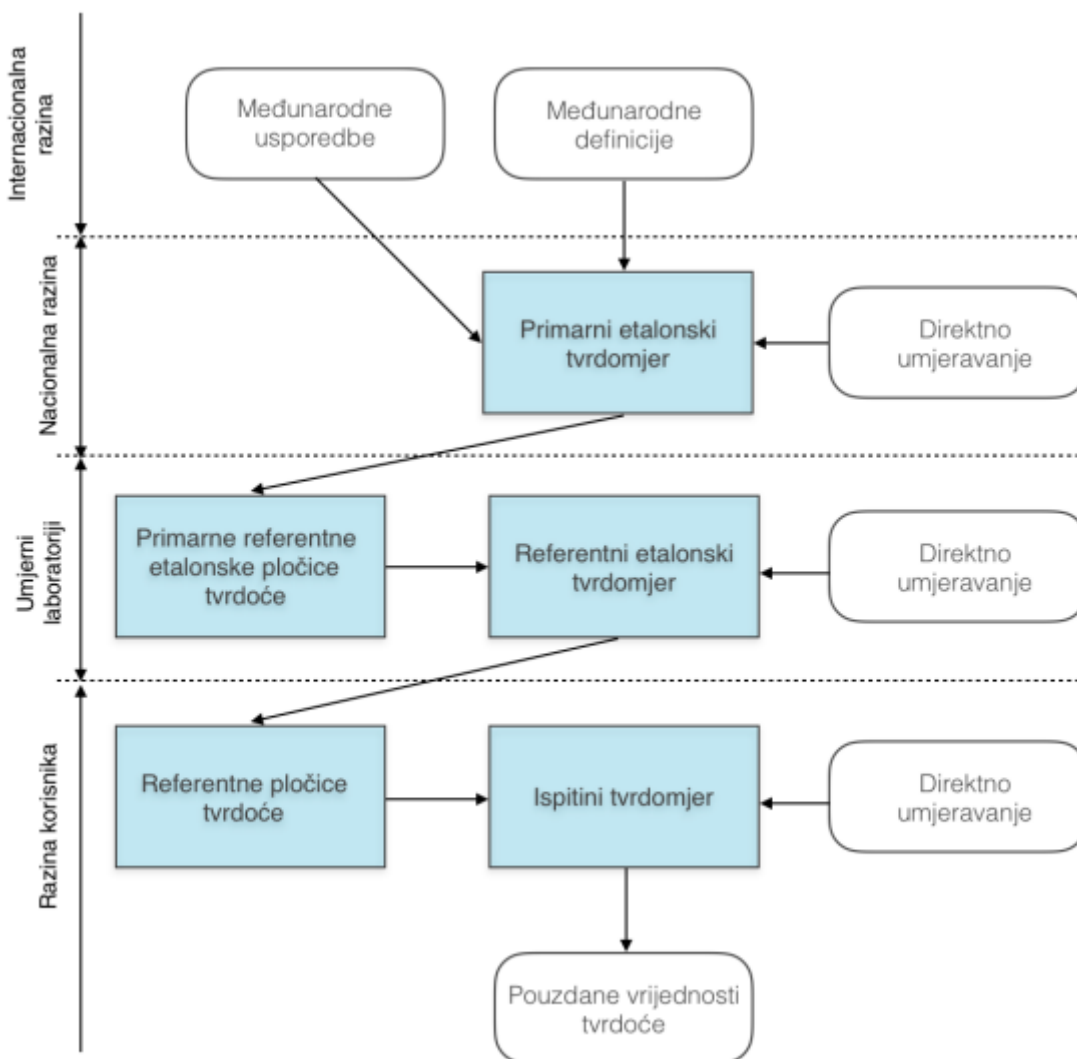
1.3. Utjecaj etalonskih pločica tvrdoće na mjernu sljedivost tvrdoće

Mjerna sljedivost definira se kao svojstvo mjernog rezultata pri čemu se mjerni rezultat može povezati s referentnim etalonom kroz neprekinuti lanac umjeravanja, od kojih svaki doprinosi mjernoj nesigurnosti [4].

Ispitna i mjerna oprema koja služi za umjeravanje treba biti u skladu s nacionalnim mjeriteljskim normama kako bi se ostvarila mjerna sljedivost. Sredstva i metode osiguranja sljedivosti mjerenja tvrdoće dijele se na [1]:

- mjerne skale
- referentne uređaje za mjerenje tvrdoće
- referentne pločice tvrdoće

Sljedivost mjerenja tvrdoće prikazana je na slici 2.



Slika 2. Sljedivost mjerenja tvrdoće [1]

Prema slici 2. vidljivo je da na internacionalnoj razini djeluju međunarodne usporedbe koje utječu na primarni etalonski tvrdomjer koji se upotrebljava na nacionalnoj razini. Primarni etalonski tvrdomjer, referentni etalonski tvrdomjer te ispitni tvrdomjer povezani su s mjernom sljedivosti koja na njih djeluje pomoću primarnih i referentnih etalonskih pločica tvrdoće. Referentni etalonski tvrdomjeri djeluju na razini umjerenih laboratorija, dok ispitni tvrdomjeri djeluju na razini korisnika. Na svakoj razini provodi se indirektno i direktno umjeravanje. Direktnim umjeravanjem uvjetuje se ispravnost uređaja, dok se kod indirektnog umjeravanja uzima u obzir niz karakteristika koje direktnim umjeravanjem nije moguće provjeriti [1].

2. 3D PRINTANJE METALA

Aditivna proizvodnja ili 3D printanje metoda je proizvodnje dijelova izravno iz digitalnog modela, najčešće dodavanjem materijala sloj po sloj. Prednost ove metode je proizvodnja geometrijski složenih modela s visokom preciznošću i to bez upotrebe alata.

Proizvodi napravljeni ovim postupkom mogu imati vrlo kompleksne detalje koje inače nije moguće napraviti klasičnim postupcima proizvodnje. Za razliku od postupaka praoblikovanja ili klasične obrade odvajanjem čestica, zbog svog načina pravljenja proizvoda cijeli proces 3D printanja pozitivno utječe na okoliš smanjenjem emisije ugljičnog dioksida te smanjenom količinom otpada. Mogućnost fleksibilnog dizajna, uštede energije i materijala privukla je veliki interes proizvođača, posebice u automobilskoj i svemirskoj industriji te u biomedicini. Uklanjanjem alata i kalupa, proizvođačima je omogućena isplativa maloserijska proizvodnja na temelju personaliziranih proizvoda. Količina, kvaliteta, veličina i oblik proizvoda osnovni su faktori koji diktiraju troškove proizvodnje.

Postupak aditive proizvodnje najčešće se bazira na uporabi polimernih materijala, no u današnje vrijeme moguća je primjena metalnih materijala poput nehrđajućih čelika, titana i kroma, koji daju izvanredne rezultate.

Budući da je 3D printanje relativno nova tehnologija još uvijek se radi na rješavanju nekih nedostataka poput ograničene veličine komponenata, smanjenju vremena proizvodnje te potrebi naknadnog tretiranja površine [5-6].

2.1. Povijest i razvoj 3D printanja

Ideja o aditivnoj proizvodnji javila se kasnih 1960-ih u institutu Battelle Memorial. Eksperimentom je pokušano očvršćivanje fotopolimerne smole pomoću dviju laserskih zraka različite valne duljine. Ipak, pravi razvoj 3D tehnologije počinje s razvijanjem stereolitografije. Tvrtka 3D Systems komercijalizirala je 1987. godine upotrebu 3D

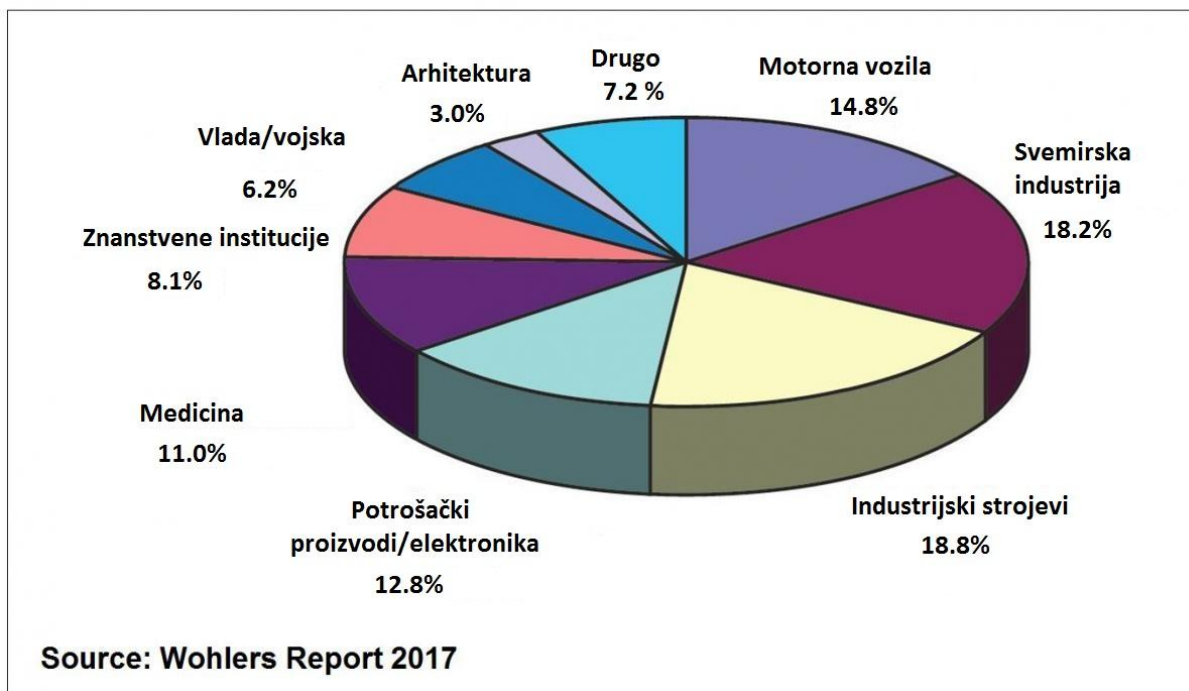
tehnologije s novim postupkom očvrnuća tankih slojeva polimera osjetljivog na ultraljubičasto zračenje pomoću lasera.

Godine 1991. u upotrebu su došla tri nova procesa aditivne proizvodnje koje se nisu zasnivala na stereolitografskoj metodi: FDM proces iz tvrtke Stratasys, SGC proces iz tvrtke Cubital te LOM proces iz tvrtke Helisys. Godinu nakon, tvrtka DTM predstavila je uređaj na principu sinteriranja praha pomoću lasera (SLS metoda). Uređaj ModelMaker iz tvrtke Solidscap (tada zvane Sanders Prototype) plasiran je 1994. godine te se zasnivao na metodi nanošenja materijala na temelju ink-jet tehnologije.

AeroMet, tvrtka osnovana 1997. godine, proizvela je postupak laserske aditivne proizvodnje (LAM) kojim se pomoću lasera velike snage srašćivao prah od titanovih legura. Početak 2000. godine predstavljao je uzbudljivo razdoblje za tvrtku Z Corp, koja je plasirala prvi tržišno dostupan višebojni 3D printer (Z402C). Godinu dana nakon, tvrtka EOS predstavila je prah na osnovi čelika zvan DirectSteel 20-V1, čije čestice su širine 20 mikrometara.

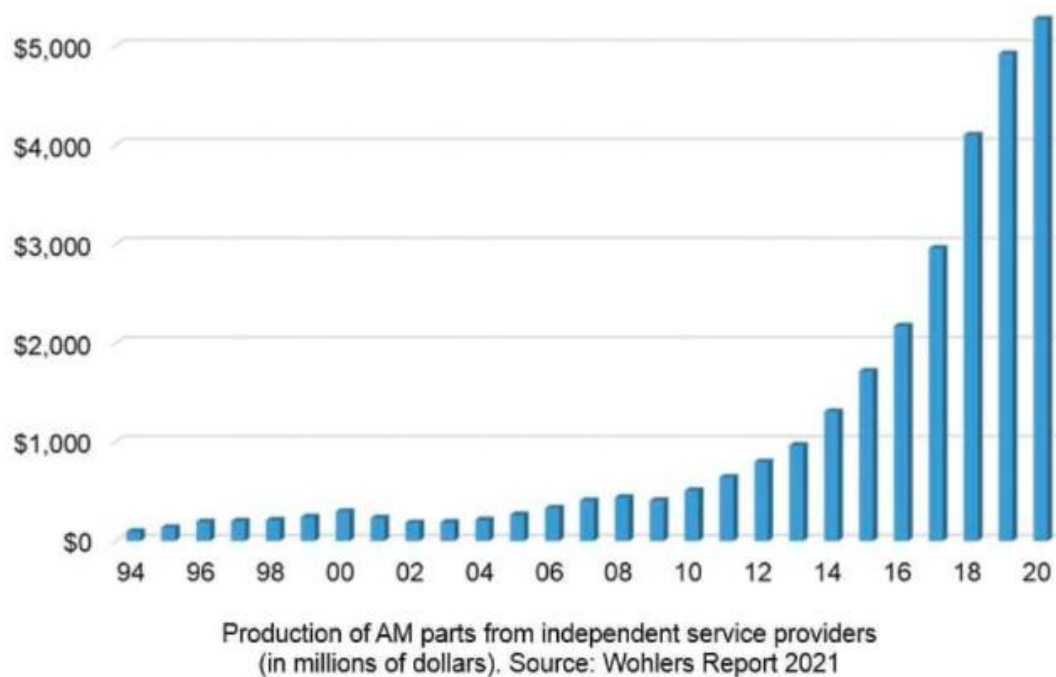
Također, predstavljen je i EOSINT 380, uređaj za lasersko sinteriranje s poboljšanom brzinom. EOSINT M 270 prezentiran je 2003. godine. Za razliku od svog prethodnika, ovaj uređaj za izravno lasersko sinteriranje metala bazirao se na vlaknastom laseru, a ne na CO₂ laseru. 2009. godine osnovana je međunarodna komisija ASTM International Committee F42 za postupke aditivne proizvodnje. Od 2011. godine nekoliko grana industrije usvaja 3D tehnologiju kao glavni način proizvodnje. Proizvođači slušnih pomagala prvi su uvidjeli prednosti aditivne proizvodnje. Zanimanje za tehnologije izravne obrade metala značajno je poraslo te se vjeruje da bi aditivna proizvodnja metala mogla prestići proizvodnju na bazi polimera [5-7].

Na slici broj 3 dan je prikaz područja primjene aditivne proizvodnje u 2017. godini.



Slika 3. Područja primjene aditivne proizvodnje u 2017. godini [8]

Prikaz proizvodnje 3D dijelova u 2021. godini dan je na slici 4.



Slika 4. Prikaz proizvodnje 3D dijelova u 2021.godini [9]

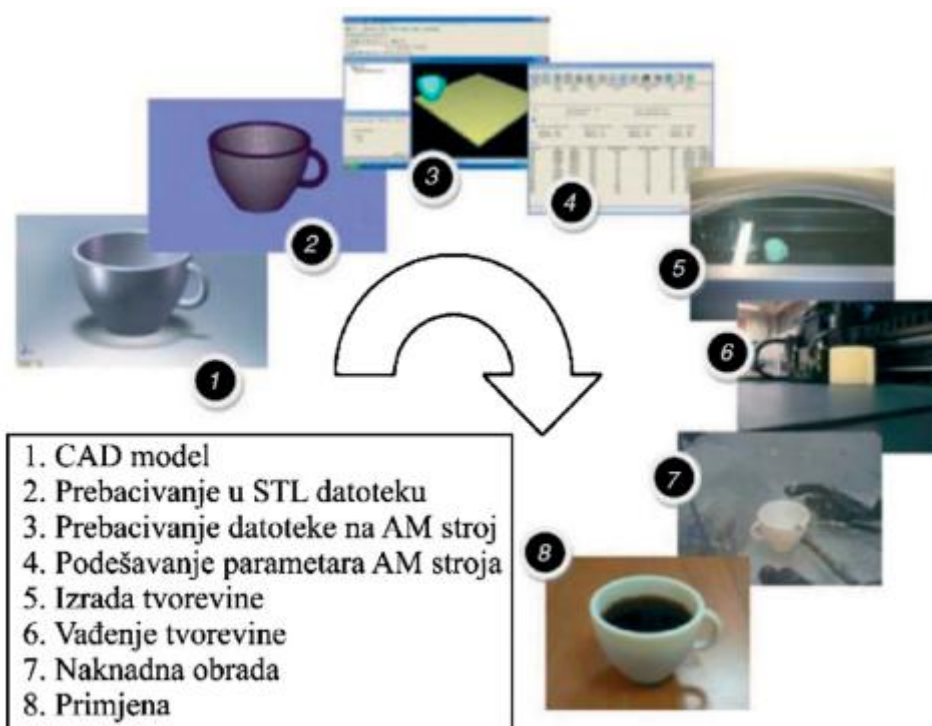
2.2. Postupak izrade 3D tvorevina

Neovisno o načinu proizvodnje, sve faze izrade su iste te se sastoje od : izrade 3D CAD modela, pretvaranja tog modela u STL datoteku (eng. Standard Tessellation Language), prebacivanja STL datoteke u stroj za 3D printanje, podešavanja parametara na stroju, izrade i vađenja tvorevine, ako je potrebno naknadne obrade te primjene.

Nakon izrade 3D modela u CAD programu, model se sprema u STL datoteci koja željeni proizvod prikazuje kao mrežu povezanih trokuta. Pošto STL datoteka nema opciju korištenja boja, od 2009. godine uvodi se i AMF datoteka (Additive Manufacturing File) koja može dati opis boja svakog trokuta u mreži i pojedinog volumena te opis materijala. Zajedno te dvije datoteke čine standard i osnovu za rezanje u slojevima kod 3D printanja.

Podešavanjem parametara stroja najčešće se utječe na debljinu sloja, brzinu izrade i snagu lasera, a nakon izrade potrebno je ustanoviti da je temperatura pri kojoj će se rukovati s proizvodom dovoljno niska. Ako je potrebno tvorevini ćemo naknadno obraditi površinu, obojati je ili očistiti od viška materijala [5].

Slika 5. prikazuje faze 3D proizvodnje:



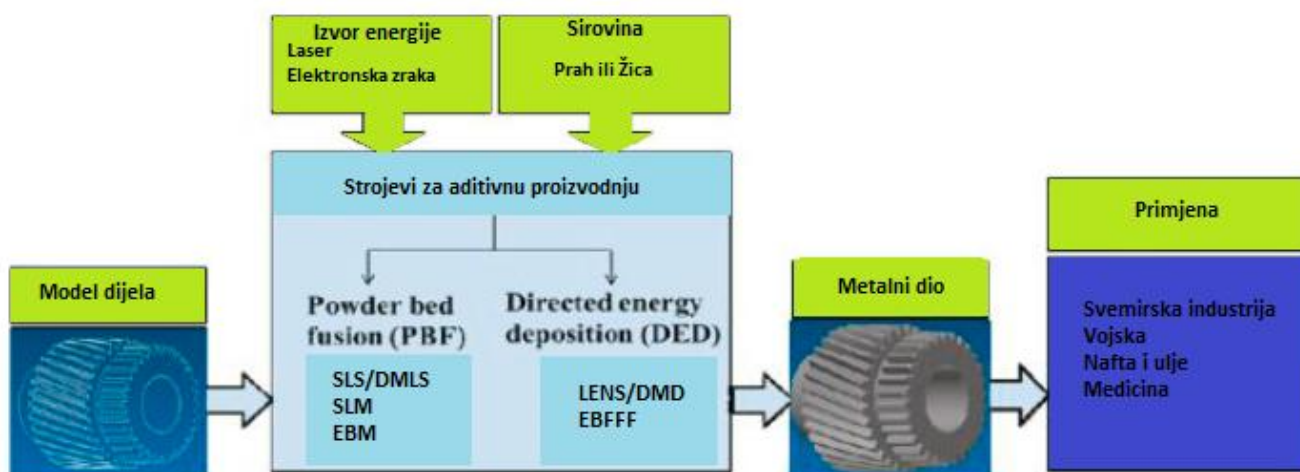
Slika 5. Faze 3D proizvodnje [5]

2.3. Procesi 3D proizvodnje metalnih proizvoda

Najbitniji parametri kod aditivne proizvodnje metalnih proizvoda su vrsta materijala i izvor energije koji se koristi za srašćivanje. Materijal koji se koristi dolazi u obliku metalnog praha ili žice, dok se za izvor energije koristi laser ili elektronska zraka.

3D proizvodnja metalnih proizvoda općenito se dijeli na dvije grupe: tehnologiju temeljenu na fuziji u prahu (eng. Powder Bed Fusion) i tehnologiju temeljenu na usmjerenom taloženju energije (eng. Direct Energy Deposition). Daljnja podjela tih tehnologija temelji se na izvoru energije. Tehnologija na temelju fuzije u prahu vodeća je u aditivnoj proizvodnji te se smatra najbitnijom za metalnu proizvodnju [6]. Neki od postupaka 3D proizvodnje metalnih proizvoda su: SLS, DMLS, SLM, DMD, EBM i mnogi drugi.

Na slici 6. prikazan je uobičajen proces proizvodnje metala.



Slika 6. Uobičajen proces 3D proizvodnje metala [6]

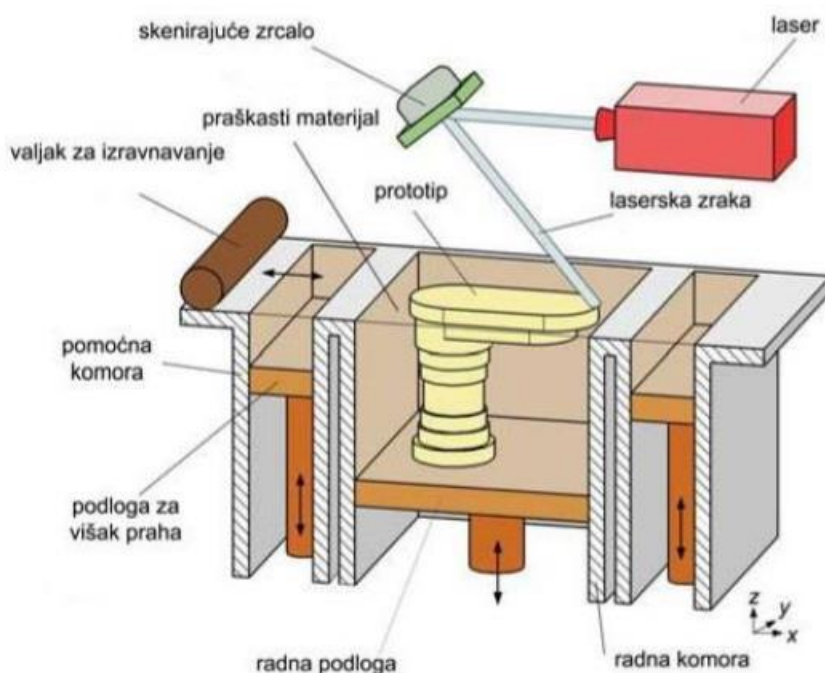
2.3.1. *Selektivno lasersko srašćivanje metala (eng. Selective Laser Sintering - SLS)*

SLS postupak temelji se na srašćivanju čistog praha ili mješavine u čvrstom ili kapljevitom stanju. Ovim postupkom moguće je preraditi materijale na bazi metala, keramike ili polimera. Pri mješavini praha potrebno je paziti da je talište jedne komponente više od druge.

U čvrstom stanju srašćivanje se odvija poprilično spor, a temperatura procesa mora biti niža od tališta praha. Kapljevito srašćivanje brži je proces u kojem dolazi do interakcije čestica praha i lasera od 0,5 do 25 ms. Postupak se odvija u komori ispunjenoj inertnim plinom pri čemu je temperatura plina približna temperaturi taljenja materijala. Laserska zraka spaja slojeve praškastog materijala te tim postupkom smanjuje deformacije i vrijeme izrade proizvoda. Temperatura radnog prostora treba biti niža od temperature nižeg tališta.

Do sniženja tvrdoće i gustoće komponente može doći zbog povećanja poroznosti uslijed veće debljine sloja i udaljenosti između prolaza laserske zrake. Veličina čestica limitira minimalnu debljinu sloja kod koje se već nanešeni slojevi neće razmicati. U SLS postupku najmanja veličina čestice iznosi 0,020 mm, a najveća 0,100 mm. Zbog toga je površina komponente najčešće grube mikrostrukture te je potrebna naknadna obrada [10].

Slika 7. prikazuje SLS postupak.



Slika 7. SLS postupak [10]

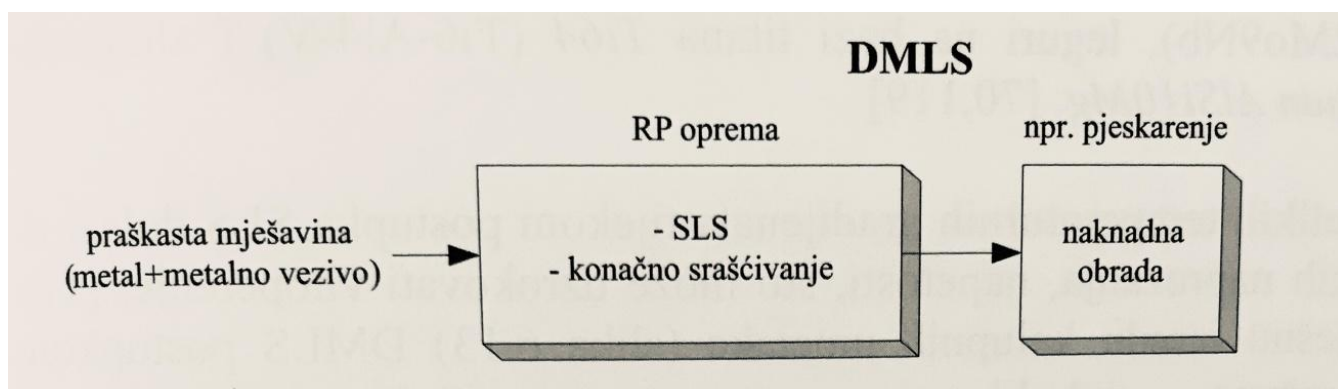
2.3.2. Izravno lasersko srašćivanje metala (eng. Direct Metal Laser Sintering - DMLS)

DMLS jedan je od najbitnijih postupaka tehnologije na temelju fuzije u prahu te u svom procesu obuhvaća i SLS postupak. Zbog kratkog vremena izrade proizvoda, isplative montaže i širokog izbora metalnih materijala, DMLS je postao jedan od najraširenijih načina dobivanja metalnih komponenti [6].

Kalupni umetci izrađeni su na samom početku procesa te u ovom postupku nije potrebna naknadna razgradnja veziva. U samom postupku koristi se praškasta mješavina metala i metalnog veziva te zbog toga nije potrebno naknadno srašćivati kalupne umetke.

Talište jedne komponente niže je od druge te se pomoću laserskih zraka prvi slojevi pričvršćuju na podložnu ploču. Početni slojevi trebaju biti što tanji kako bi se metalne čestice što bolje stisnule. Proces se odvija pri 5 % normalne brzine, a sa svakim novim slojem brzina srašćivanja se povećava. Laserska zraka potpuno tali komponentu s nižim talištem, dok kod komponente višeg tališta dolazi do ovlaživanja i povezivanja čestica. Podložna ploču čini neizostavni dio metalnog proizvoda. Naknadnom obradom površine smanjuje se hrapavost [10].

Slikom 8. dan je prikaz DMLS postupka.

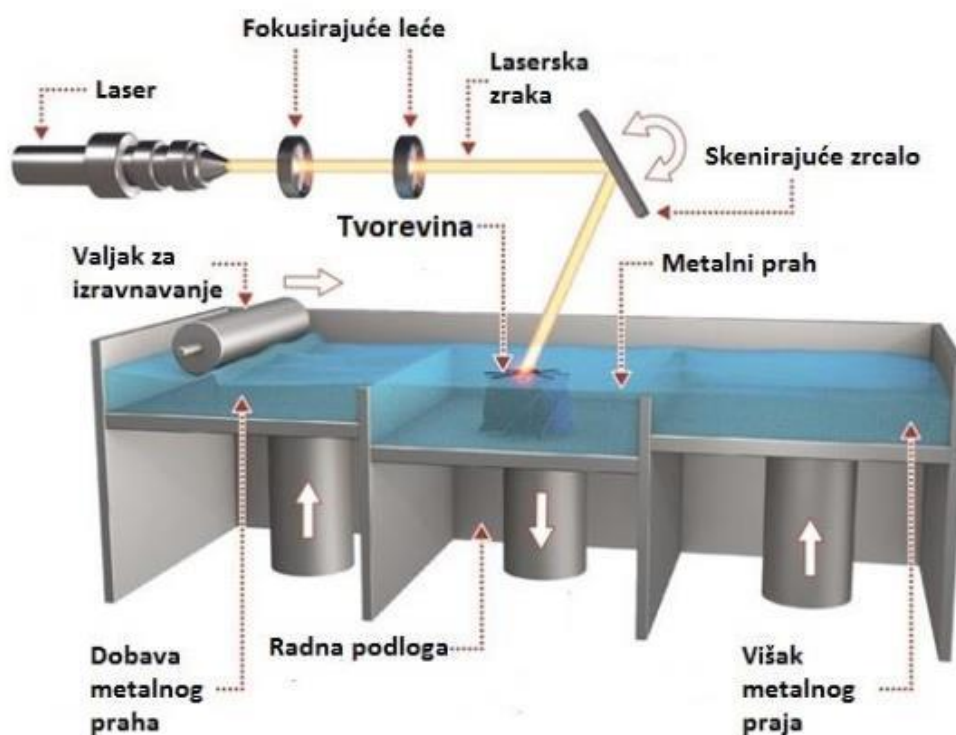


Slika 8. DMLS postupak [10]

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

Za razliku od SLS postupka gdje se prah srašćuje, SLM postupkom prah od metala ili keramike potpuno se tali. Proizvodi dobiveni ovim postupkom visoke su gustoće te daljnje srašćivanje nije potrebno. Dobivena površina proizvoda je hrapava te ju je neophodno obraditi, a točnost izmjera manja je nego kod SLS postupaka. SLM uređajima moguće je obraditi širok spektar materijala poput: legura aluminija, nehrđajućih čelika, titana i mnogih drugih [10].

Na slici 9. vidljiv je SLM postupak.



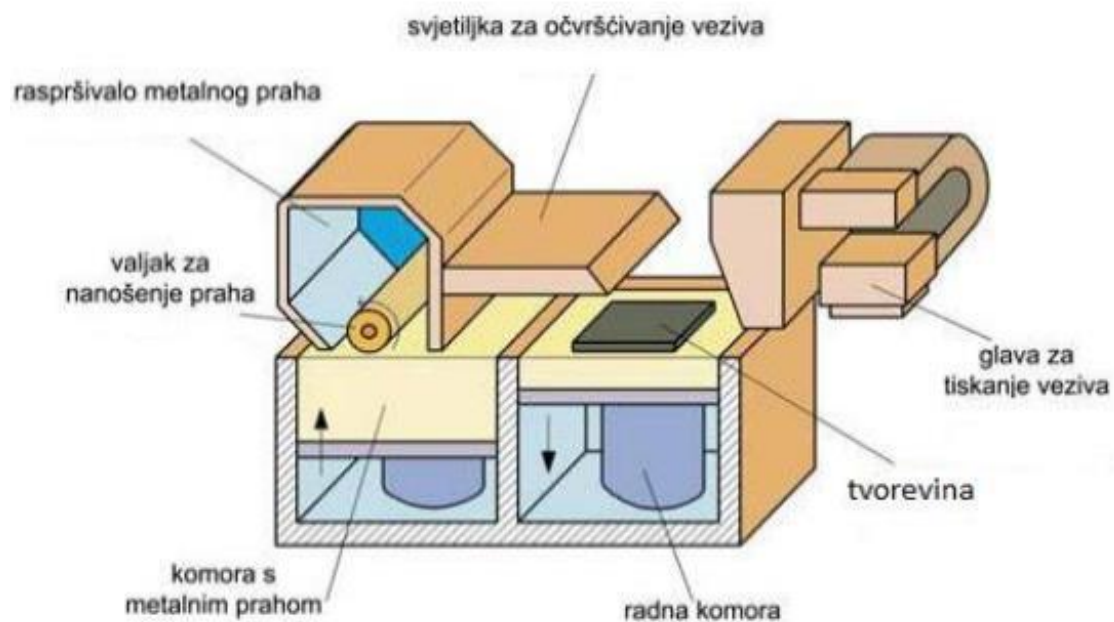
Slika 9. SLM postupak [11]

2.3.4. 3D tiskanje metala (postupak ProMetal)

ProMetal postupak u vlasništvu je tvrtke ExtrudeHone (današnje ExOne) čiji se proces zasniva na ink-jet metodi. Uređaj ima mogućnost gibanja u tri smjera: glave mlaznica gibaju se po x i y osi, dok se spremnik s metalnim prahom giba po osi z [10].

Ovim postupkom najčešće se izrađuju metalni prototipovi i kalupi za injekcijsko prešanje ili tlačno lijevanje. Površina proizvoda malo je lošija u usporedbi sa SLS postupkom, no upotreba praha s česticama manjeg promjera može pridonijeti boljoj kvaliteti površine. ProMetal postupak također obrađuje širok spektar metalnih prahova [10].

Na slici 10. dan je prikaz ProMetal postupka.

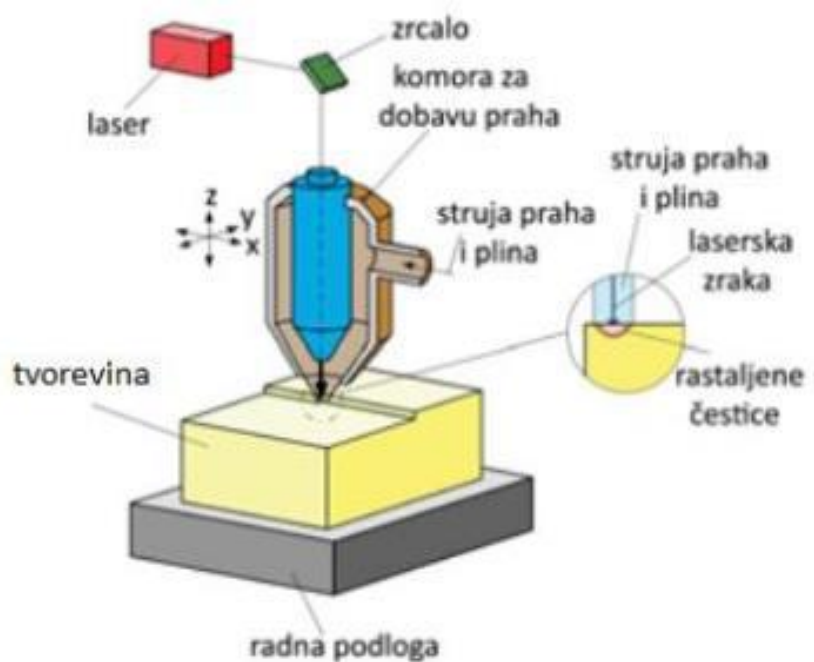


Slika 10. ProMetal postupak [10]

2.3.5. Izravno taloženje metala (eng. Laser Engineering Net Shaping - LENS)

LENS postupak temelji se na navarivanju, tj. taloženju prilikom izrade proizvoda od metala. Laserska zraka rastaljuje vrlo usko područje površine na koje se uporabom mlaznice dodaje određena količina praškastog materijala te se tako stvara novi sloj. Postupak se izvodi u kontroliranim uvjetima u podtlačnoj komori u kojoj je moguće sadržaj kisika smanjiti ispod 10 ppm. To je vrlo važno za proizvodnju s aluminijem, gdje prisutnost kisika utječe na međusobno povezivanje slojeva proizvoda. Ovim postupkom moguće je izraditi kalupe s više materijala u jednom ciklusu [10].

Na slici 11. prikazan je LENS postupak.

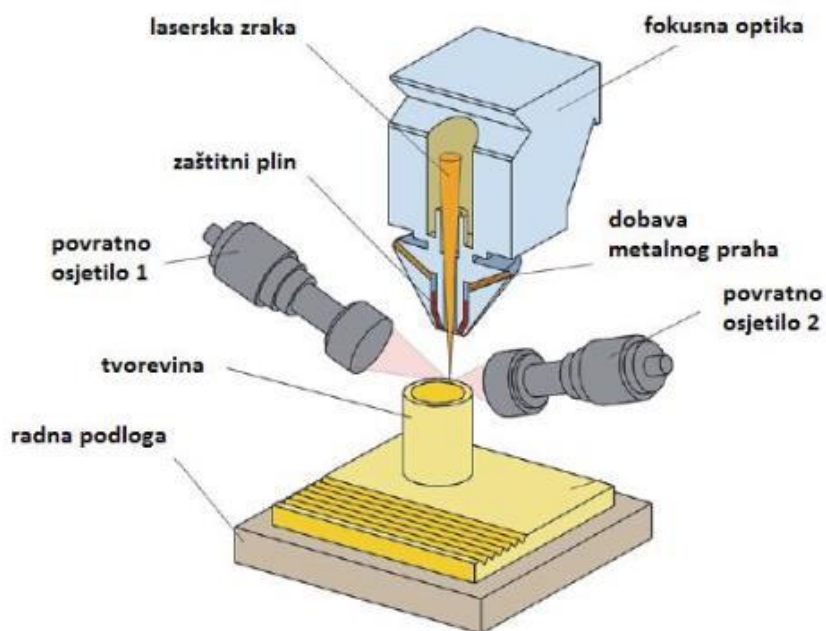


Slika 11. LENS postupak [10]

2.3.6. Izravno taloženje metalnog praha (eng. *Direct Metal Deposition - DMD*)

DMD postupak vrlo je sličan LENS postupku, no razlikuje se u detaljima vezanim za uporabu i upravljanje uređaja za izradu proizvoda od metala. Prednost izravnog taloženja metalnog praha je u sposobnosti izrade proizvoda od više materijala te izrade kanala za temperiranje na optimalnim položajima. Trajanje postupka je dugo, pa je pogodan za izradu složenih detalja na već načinjenom osnovnom modelu. Također moguća je i proizvodnja kalupa koja zbog svoje grube površine zahtjeva daljnju obradu [10].

DMD postupak prikazan je na slici 12.

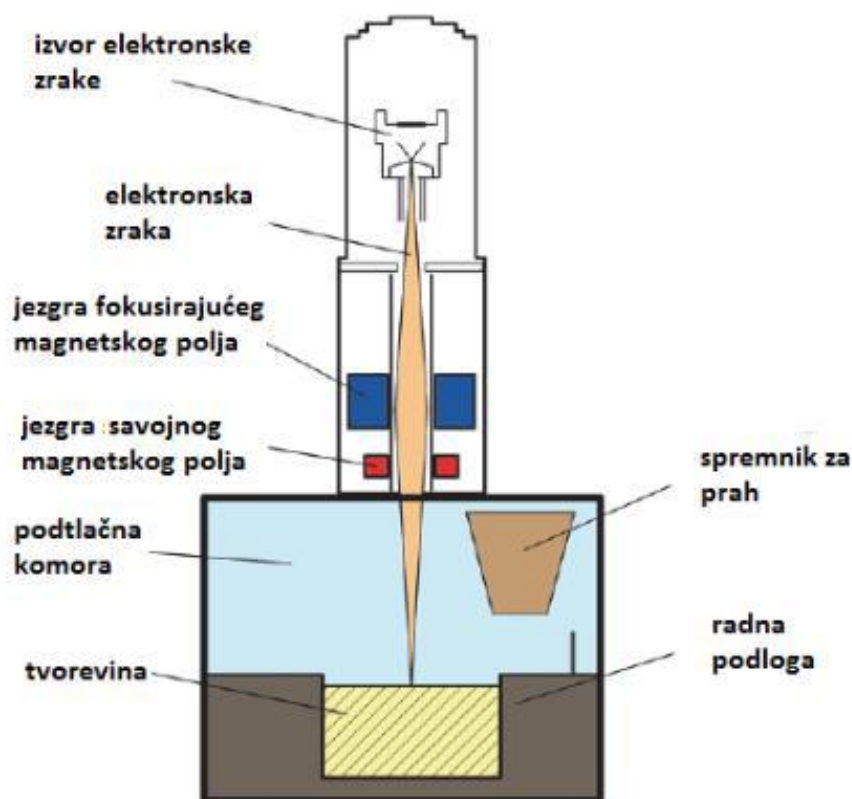


Slika 12. DMD postupak [10]

2.3.7. Taljenje s pomoću snopa elektrona (eng. *Electron Beam Melting - EBM*)

EBM postupak temelji se na snopu elektrona koji tali sloj metalnog praha te tako gradi proizvod sloj po sloj. Pri sudaru elektrona s metalnim prahom dolazi do promjene kinetičke energije sudara u toplinsku, koja utječe na taljenje metalnog praha. Ovaj postupak ima široku primjenu te se koristi za izradu metalnih proizvoda, kalupa za tlačno lijevanje te u biomedicini pri izradi implantata. Nikal, platina, volfram, titan i njegove legure samo su neki od materijala koji se prerađuju ovim postupkom [10].

EBM postupak prikazan je na slici 13.



Slika 13. EBM postupak [10]

Prikaz prednosti i nedostataka EBM postupka dan je u tablici 1.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci EBM postupka [10]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none">• Postizanje visoke razine energije u malom snopu• Pravljenje proizvoda pri podtlaku omogućuje dobra mehanička svojstva• Izostajanje oksida i nitrida na površini proizvoda zbog visoke podtladne atmosfere• Niski troškovi instaliranja i održavanja• Visoka brzina izrade• Mala potrošnja energije pri navarivanju metala	<ul style="list-style-type: none">• Zahtijevana prisutnost dodatnog uređaja u visokoj podtladnoj atmosferi• Prisustvo γ-zračenja tijekom postupka• Proizvodnja je moguća samo s materijalima koji su vodiči električne energije

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Plan ispitivanja

U suradnji s razvojno-edukacijskim centrom za metalsku industriju-Metalska jezgra Čakovec dogovoreno je da se za izbor materijala praha koristi EOS MaragingSteel MS1. Pločice su isprintane na uređaju EOS M 290 te su brušene i polirane kako bi se mogle ispitati. U daljnjem ispitivanju provedeno je mjerenje tvrdoće etalonskih pločica po Vickersu te metalografska analiza.

3.2. Izbor materijala praha

Kao što je već navedeno, materijal korišten pri izradi etalonskih pločica je EOS MaragingSteel MS1. Komponente izrađene od ovog materijala imaju kemijski sastav koji odgovara X3NiCoMoTi 18-9-5 čeliku te vrlo dobra mehanička svojstva. Lako se obrađuju nakon izgradnje, a naknadno očvršnuće na više od 505 HV moguće je postići dozrijevanjem ili starenjem pri temperaturi 490 °C i vremenskom periodu od 6 sati. Ako je potrebno dijelovi se mogu naknadno pobrusiti i polirati te ih je moguće zavariti ili strojno obraditi. Odgovarajućom toplinskom obradom moguće je ukloniti ili smanjiti anizotropiju nastalu zbog slojevite gradnje komponente. U tablici 2. dan je prikaz fizikalnih i kemijskih svojstava komponente izrađene od EOS MaragingSteel MS1 praha [13].

Tablica 2. Prikaz fizikalnih i kemijskih svojstava [13]

Sastav materijala	Fe Ni (17-19 %) Co (8,5-9,5 %) Mo (4,5-5,2 %) Ti (0,6-0,8 %) Al (0,05- 0,15 %) Cr ($\leq 0,5$ %) Cu ($\leq 0,5$ %) C ($\leq 0,03$ %) Mn ($\leq 0,1$ %) Si ($\leq 0,1$ %) P ($\leq 0,01$ %) S ($\leq 0,01$ %)
Relativna gustoća	cca. 100%
Gustoća	8,0-8,1 g/cm ³

3.3. 3D print tehnologija

Pri izradi etalonskih pločica tvrdoće korišten je EOS M 290 uređaj za printanje koji se služi DMLS postupkom za izradu. Ovaj uređaj nudi mogućnost fleksibilne serijske proizvodnje metalnih dijelova te obuhvaća širok spektar materijala koje može koristiti [14]. Na slici 14. prikazan je EOS M 290 uređaj za printanje.

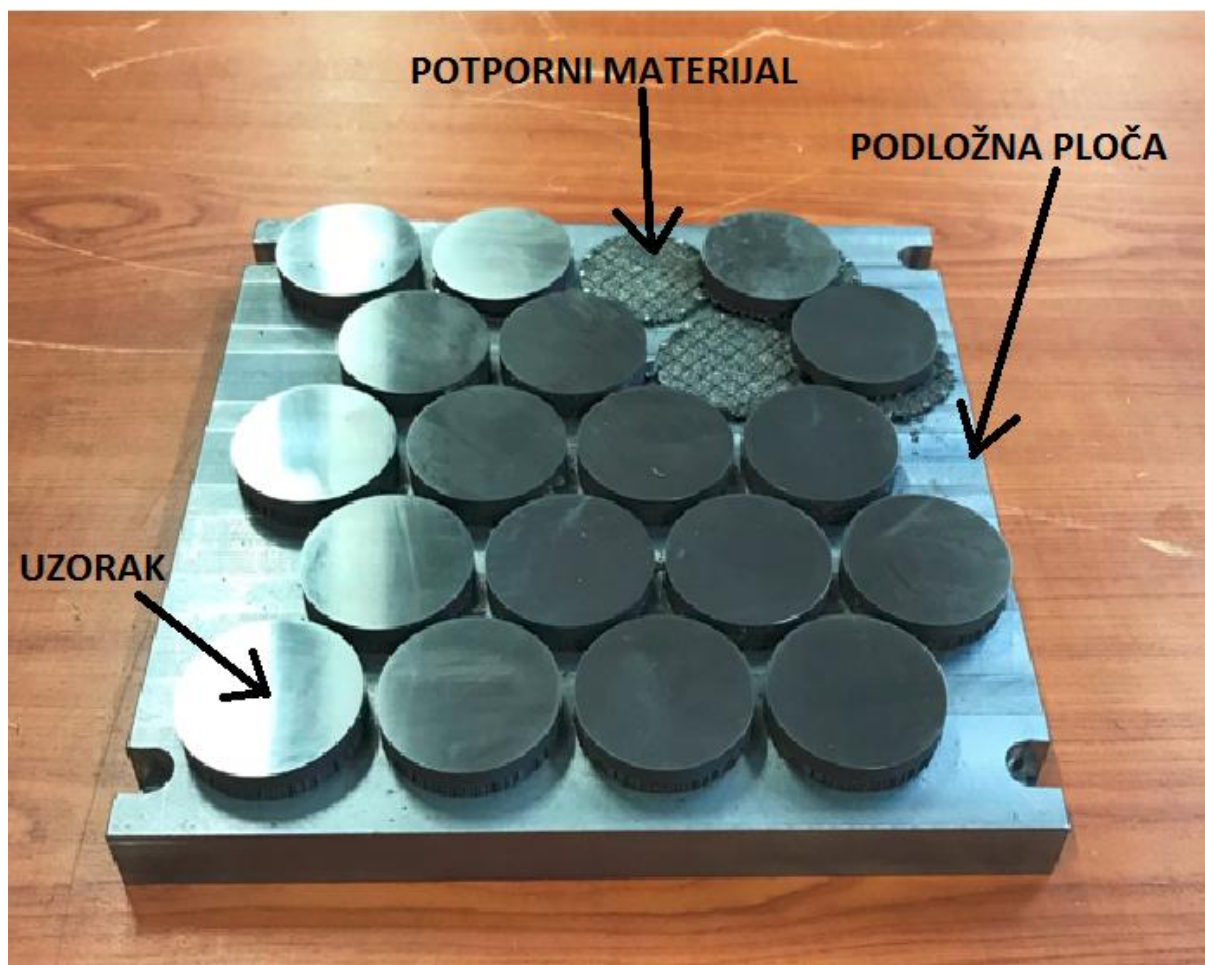


Slika 14. Uređaj EOS M 290 [14]

3.4. Provedba izrade

Na podložnoj ploči isprintano je 20 uzoraka promjera 50 mm i debljine 6 mm. Uzorci su naknadno obrađeni. Između uzoraka i podložne ploče nalazi se potporni materijal.

Na slici 15. prikazane su etalonske pločice tvrdoće napravljene pomoću EOS M 290 uređaja.



Slika 15. Etalonske pločice tvrdoće napravljene pomoću EOS M 290 uređaja

3.5. Priprema površine

Uzorci su odvojeni od metalne pločice, naliježna površina uzorka je samo brušena dok je ispitna površina brušena i polirana kako bi se moglo provesti ispitivanje tvrdoće sukladno normi HRN EN ISO 6507-3:2018.

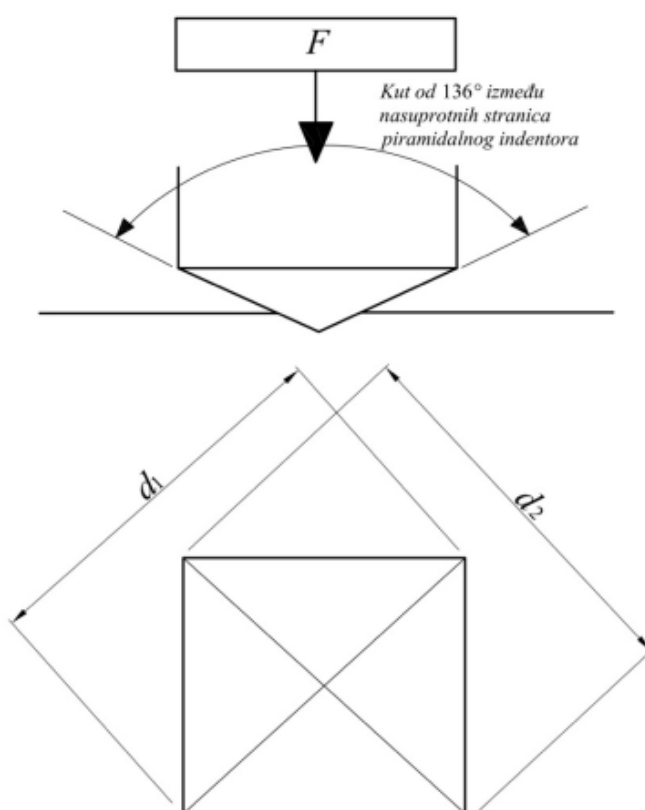
3.6. Ispitivanje tvrdoće

3.6.1. Općenito o Vickers metodi

Vickers metoda kao indenter koristi četverostranu piramidu s kutem između stranica od 136° . Ovom metodom uklonjeni su glavni nedostaci Brinellove metode [12]:

- uvođenjem dijamantnog indentora moguće je mjeriti i najtvrdje materijale
- tvrdoća ne ovisi o primijenjenoj sili zbog geometrije indentora

Primjer indentora i otiska kod Vickers metode prikazan je na slici 16.



Slika 16. Primjer indentora i otiska kod Vickersove metode [1]

Propisanom silom F utiskuje se indenter u površinu ispitnog uzorka te se drži pod opterećenjem 10-15 sekundi. Duljine dijagonala d_1 i d_2 mjere se nakon rasterećenja te se na temelju tih podataka izračunava vrijednost tvrdoće pomoću izraza [2]:

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

F označava primijenjenu silu u N, a d srednju vrijednost d_1 i d_2 dijagonala otisaka u mm.

Osim standardnih mjerenja makrotvrdoće, moguće je ispitati i semitvrdoću i mikrotvrdoću. Slika 17. pokazuje prikaz vrijednosti primijenjenih sila za različite metode:

Metoda makrotvrdoće	Sila utiskivanja F , N	Metoda semitvrdoće	Sila utiskivanja F , N	Metoda mikrotvrdoće	Sila utiskivanja F , N
—	—	—	—	HV 0,001	0,009 807
—	—	—	—	HV 0,002	0,019 61
—	—	—	—	HV 0,003	0,029 42
—	—	—	—	HV 0,005	0,049 03
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,098 07
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147 1
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,196 1
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,245 2
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,490 3
HV 100 ^a	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,980 7

Slika 17. Skala tvrdoće po Vickersu [4]

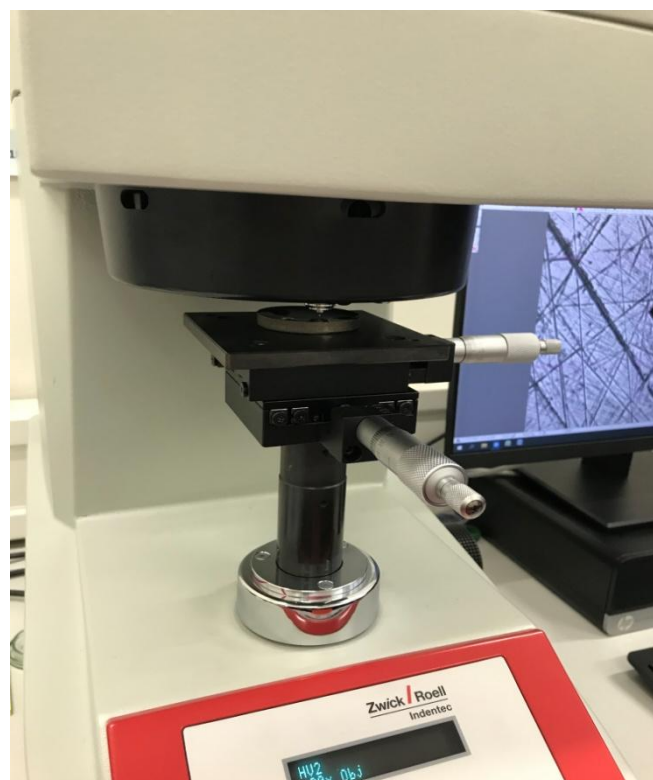
U ovom radu tvrdoća etalonskih pločica mjerila se metodom HV 0,5; HV 1, HV 2, HV 5, HV 10 i HV 20.

3.6.2. Mjerenja tvrdoće

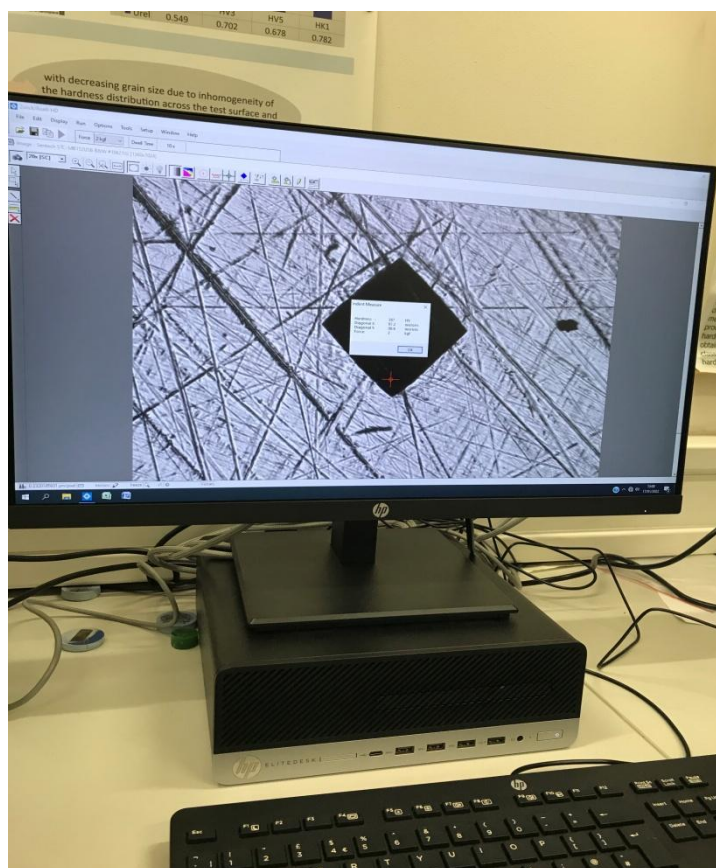
Mjerenja tvrdoće metodom HV 0,5; HV 1, HV 2 provodila su se na ispitnom tvrdomjeru INDENTEC, tipa ZHV μ -ST, serijskog broja 206030 u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Slike 18,19 i 20 prikazuju aparaturu potrebnu za mjerenje:



Slika 18. Ispitni tvrdomjer INDENTEC



Slika 19. Ispitivanje uzorka etalonske pločice tvrdoće



Slika 20. Prikaz otiska indentora i rezultata tvrdoće uz veće povećanje

Indentor je pri zadanom opterećenju utisnut u uzorak etalonske pločice te se slika otiska dobila pomoću mikroskopskog uvećanja. Vrhovi otiska ručno su označeni na računalu te je uređaj izračunao dijagonale otiska te tvrdoću uzorka. U tablicama 3, 4 i 5 dani su rezultati mjerenja:

Tablica 3. Rezultati ispitivanja HV 0,5

Mjerenje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdoća	384	387	391	396	391	399	393	393	395	399
Srednja vrijednost tvrdoće	392,8									
Standardna devijacija tvrdoće	4,58									

Tablica 4. Rezultati ispitivanja za HV 1

Mjerenje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdoća	389	387	391	385	398	385	394	387	396	396
Srednja vrijednost tvrdće	390,8									
Standardna devijacija tvrdće	4,64									

Tablica 5. Rezultati ispitivanja za HV 2

Mjerenje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdoća	391	390	385	386	387	384	395	390	385	387
Srednja vrijednost tvrdće	388									
Standardna devijacija tvrdće	3,26									

Mjerenja tvrdće metodom HV 5 i HV 10 provodila su se na uređaju Zwick kod kojeg se sila utiskivanja ostvarivala pomoću utega. Na slici 21. prikazan je uređaj:



Slika 21. Tvrdomjer Zwick

Na ovom uređaju dijagonale su se određivale ručno te se pomoću njihove srednje vrijednosti očitavala tvrdoća. U tablicama 6 i 7 dani su rezultati mjerenja:

Tablica 6. Rezultati ispitivanja za HV 5

Mjerenje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdoća	396	401	396	386	381	389	386	396	397	396
Srednja vrijednost tvrdće	392,4									
Standardna devijacija tvrdće	6,09									

Tablica 7. Rezultati ispitivanja za HV 10

Mjerenje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdoća	380	383	380	390	390	390	389	388	393	394
Srednja vrijednost tvrdće	387,7									
Standardna devijacija tvrdće	4,75									

Mjerenje tvrdće metodom HV 20 provodilo se na uređaju Indentec 5030TKV. Navedeni uređaj prikazan je na slici 22.



Slika 22. Uređaj Indentec 5030TKV

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 8.

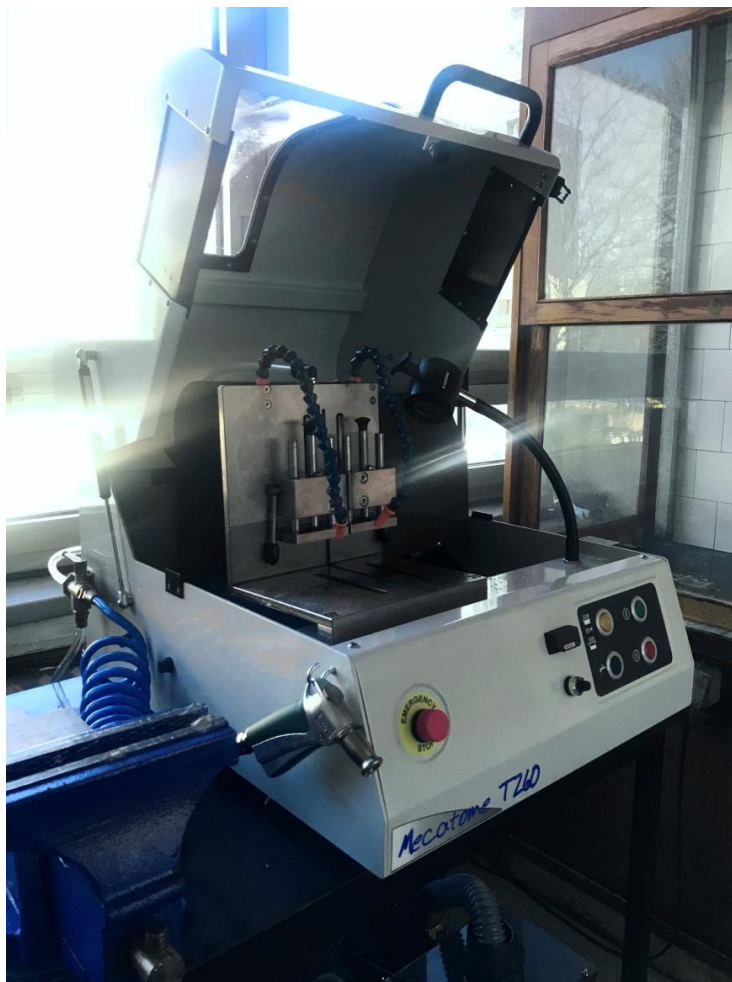
Tablica 8. Rezultati ispitivanja za HV 20

Mjerenje	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdoća	389	385	388	389	391	397	396	389	387	384
Srednja vrijednost tvrdće	389,5									
Standardna devijacija tvrdće	4,01									

Prema podacima proizvođača za materijal EOS MaragingSteel MS1 tvrdoća na poliranoj površini uzorka iznosi između 33 - 37 HRC. Vrijednost tvrdoće jako ovisi o načinu pripreme površine uzorka.

3.7. Metalografska analiza

Prije ispitivanja mikrostrukture etalonska pločica izrezala se poprečno i uzdužno na uređaju Mecatome T260 radi boljeg uviđanja razlika među slojevima. Metalografska analiza provodila se u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Na slici 23. prikazan je uređaj korišten pri rezanju pločica.



Slika 23. Uređaj Mecatome T260

3.7.1. Priprema ispitne površine

Brušenje je precizan postupak obrade odvajanjem čestica te se koristi za završnu i finiju obradu površine. Odošenjem materijala uklanjaju se slojevi prljavštine, odnosno nečistoća u svrhu dolaženja do osnovnog materijala i kvalitetnijeg proučavanja mikrostrukture. Na brušenje utječu razni parametri poput podloge, abraziva, smjera brušenja, primijenjene sile, brzina okretanja i drugih.

Postupak brušenja provodio se na uređaju Mecatech 250. Na podlogu uređaja stavlja se brusni papir, a u samu posudu se preko cijevi dolijeva voda koja hladi uzorak. Brusni papir sastoji se od zrna silicijevog karbida (SiC), a tijekom postupka potrebno je paziti da je uzorak ravnomjerno pobrušen. Nakon brušenja na površini uzorka ostaju tragovi koji se moraju ukloniti sljedećim postupkom brušenja kod kojeg se koristi manje hrapavi brusni papir. Sa svakim novim korakom brušenja uzorak se okreće za 90° . Tijekom postupka koristi se 6 vrsti brusnog papira oznaka: P120, P300, P500, P1000, P2400 i P4000. Na slici 24. prikazan je uređaj Mecatech 250.



Slika 24. Uređaj Mecatech 250

Poliranje je postupak konačne obrade odvajanjem čestica za završnu i finiju obradu površina. Njime se uklanjaju tragovi prethodnog brušenja i oksidacija te se stvara glatka i reflektirajuća površina. Razlika od brušenja je to što je abraziv manji te nije čvrsto vezan za podlogu. U mikrostrukтури poliranog stanja vidljivi su nemetalni uključci, porozitet i pukotine.

Nakon brušenja površina uzorka polirana je na istome uređaju. Poliranje je također ovisno o određenim parametrima poput: vrste i veličine abraziva, brzini vrtnje, vremenu i drugim. Postupak poliranja proveo se u 2 koraka. U prvom koraku kao lubrikant koristila se dijamantna pasta veličine abrazivnih čestica 3 μm na podlozi oznake DAC. Nakon poliranja uzorak i podloga isprani su vodom. U drugom koraku koristila se dijamantna pasta veličine abrazivnih čestica 1 μm na podlozi oznake NAP. Također nakon ovog koraka uzorak i podloga se ispiru.

Prikaz poliranog uzorka nalazi se na slici 25.

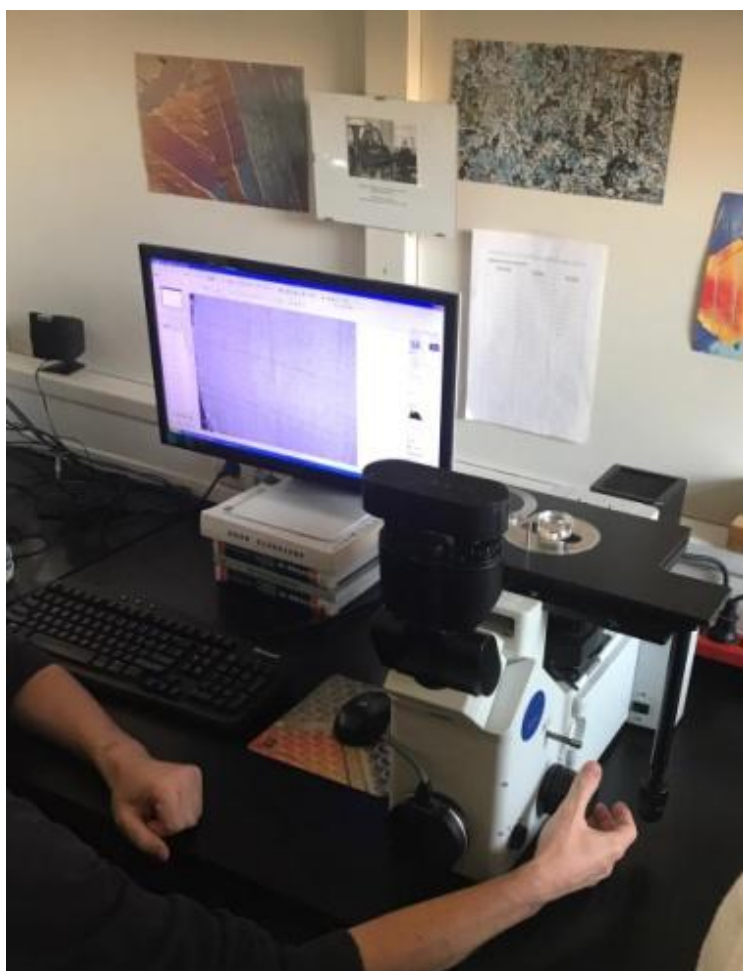


Slika 25. Prikaz poliranog uzorka

Nagrizanje uzorka provedeno je pomoću 5%-tne otopine nitala (smjese HNO_3 i etilnog alkohola). Uzorak je držan u otopini 30 sekundi te potom izvađen i ispran u vodi.

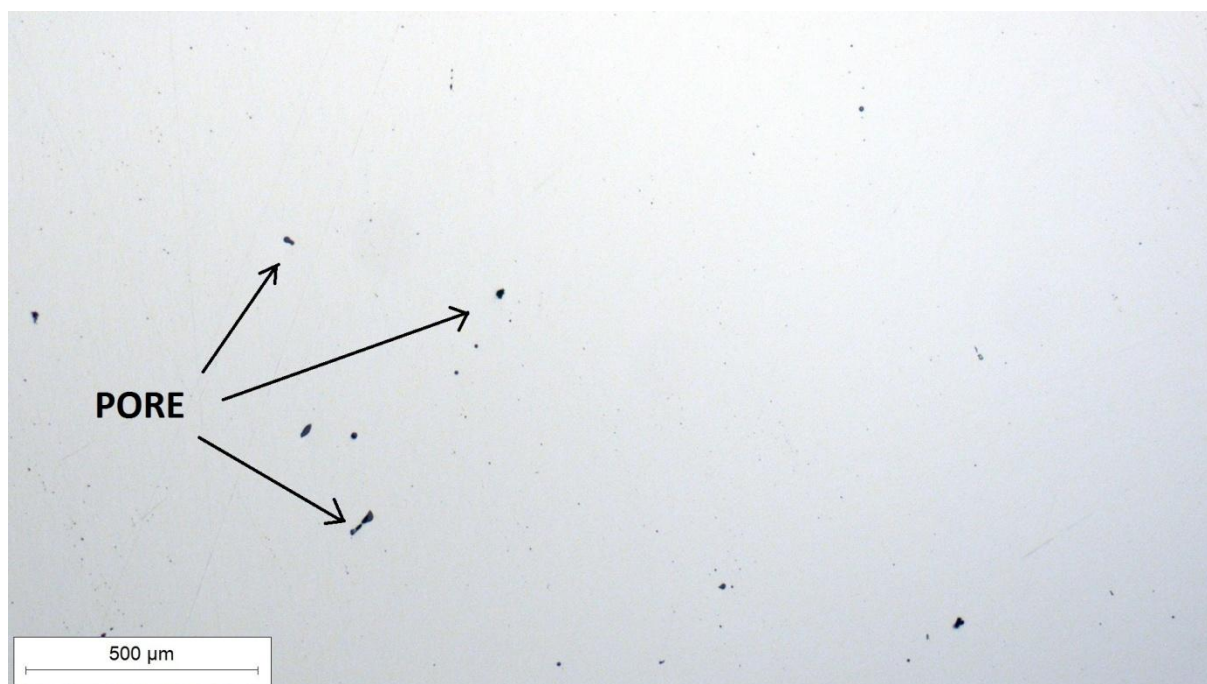
3.7.2. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u poliranom i nagriženom stanju na uređaju OLYMPUS GX51. Prikaz uređaja dan je na slici 26.

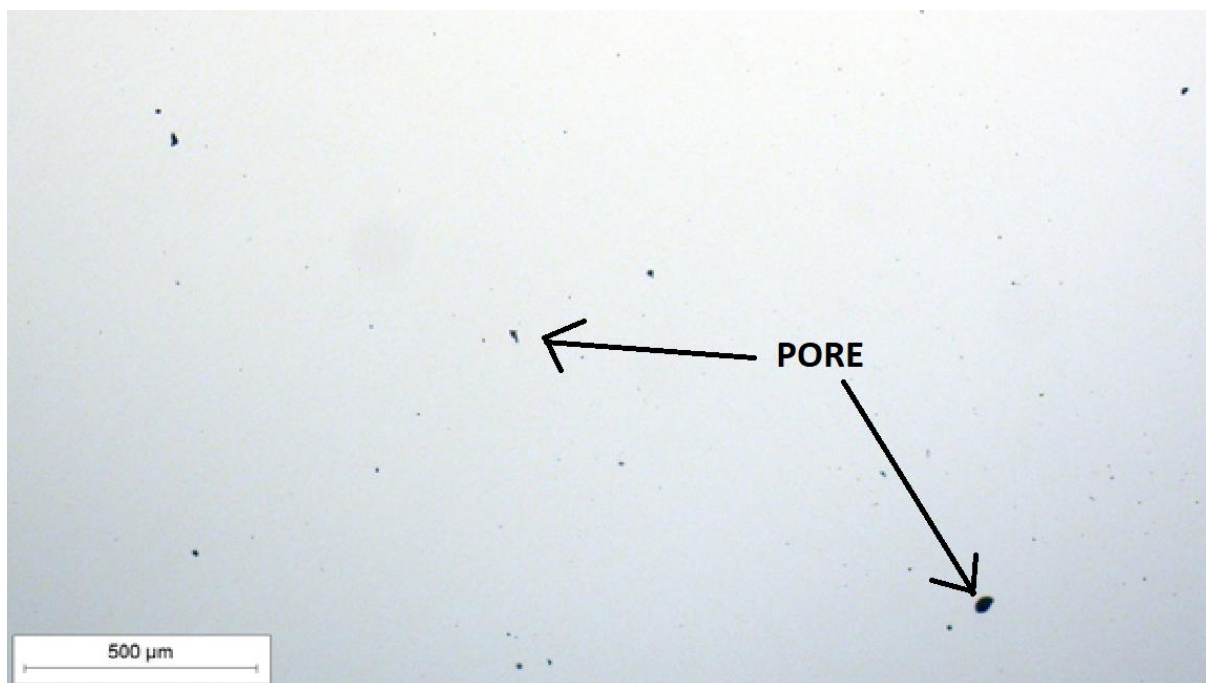


Slika 26. Uređaj OLYMPUS GX51

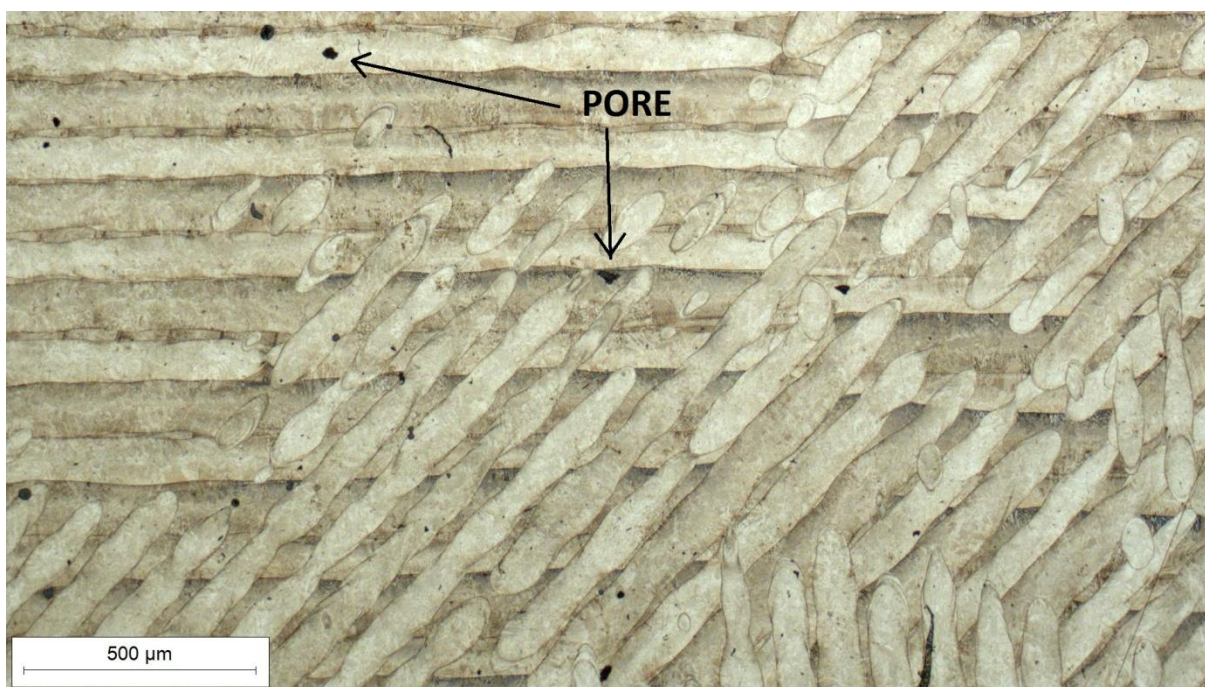
Na slikama 27 i 28 prikazane su mikrostrukture poliranog uzorka u uzdužnom i poprečnom smjeru, na slikama od 29 do 32 prikazana je mikrostruktura u nagriženom stanju pri različitim povećanjima.



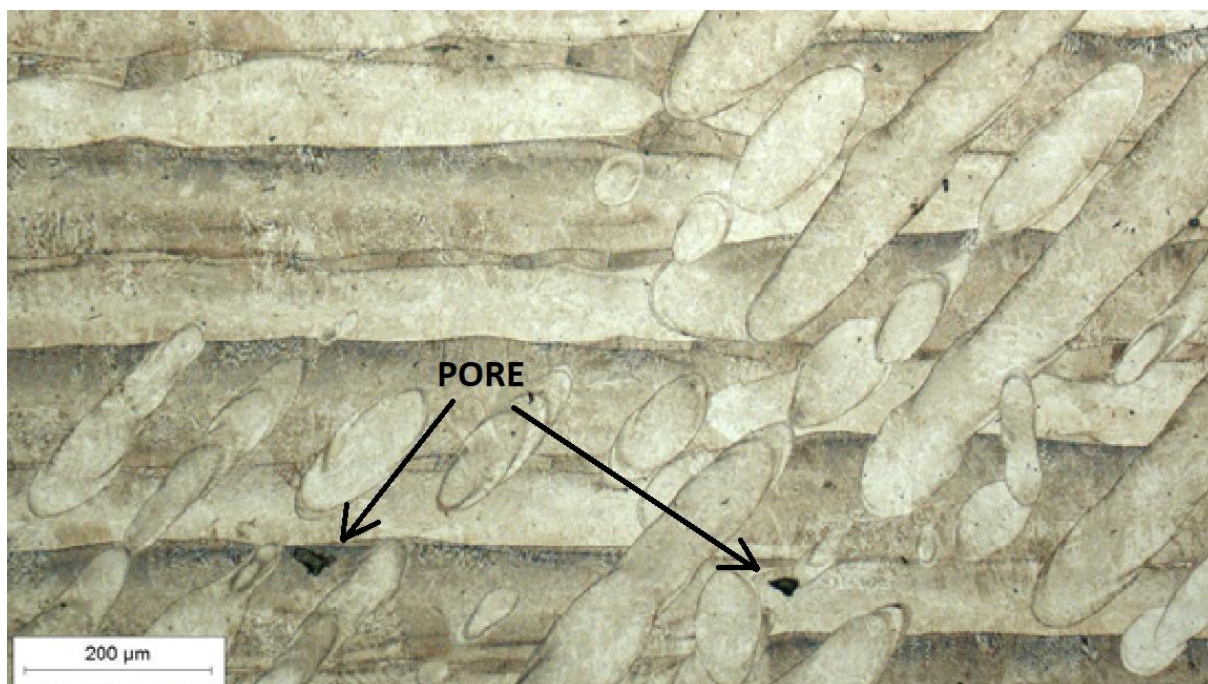
Slika 27. Prikaz mikrostrukture u uzdužnom smjeru poliranog uzorka pri povećanju 50x



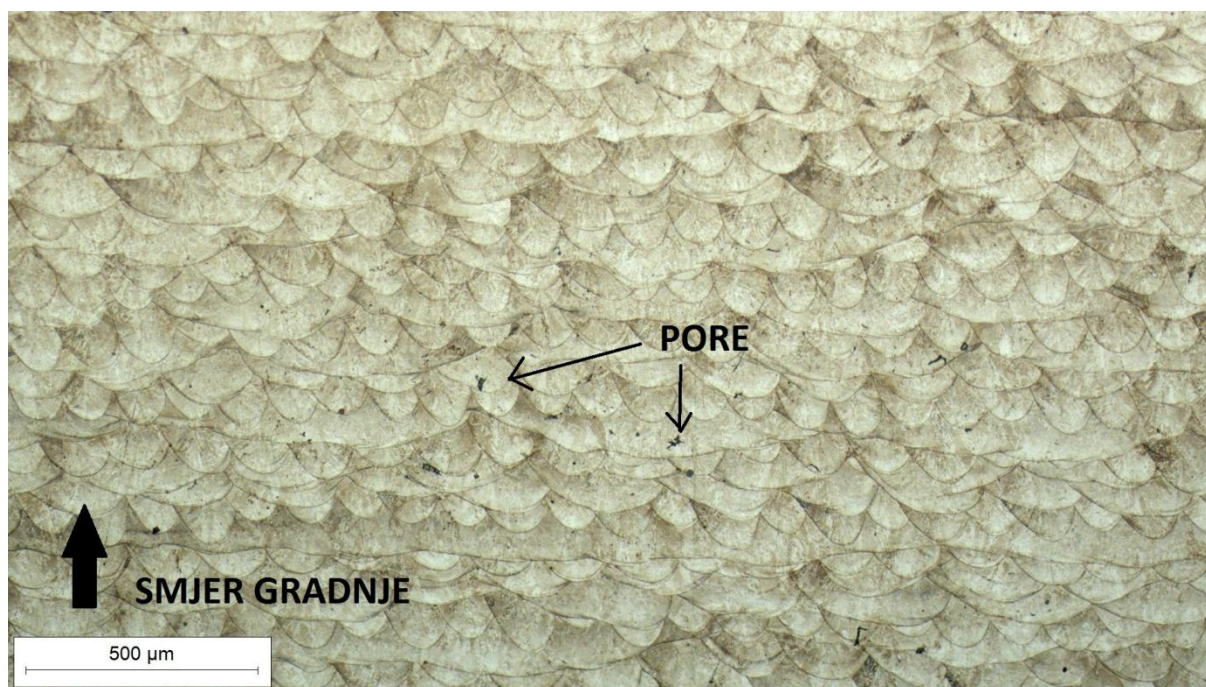
Slika 28. Prikaz mikrostrukture u poprečnom smjeru poliranog uzorka pri povećanju 50x



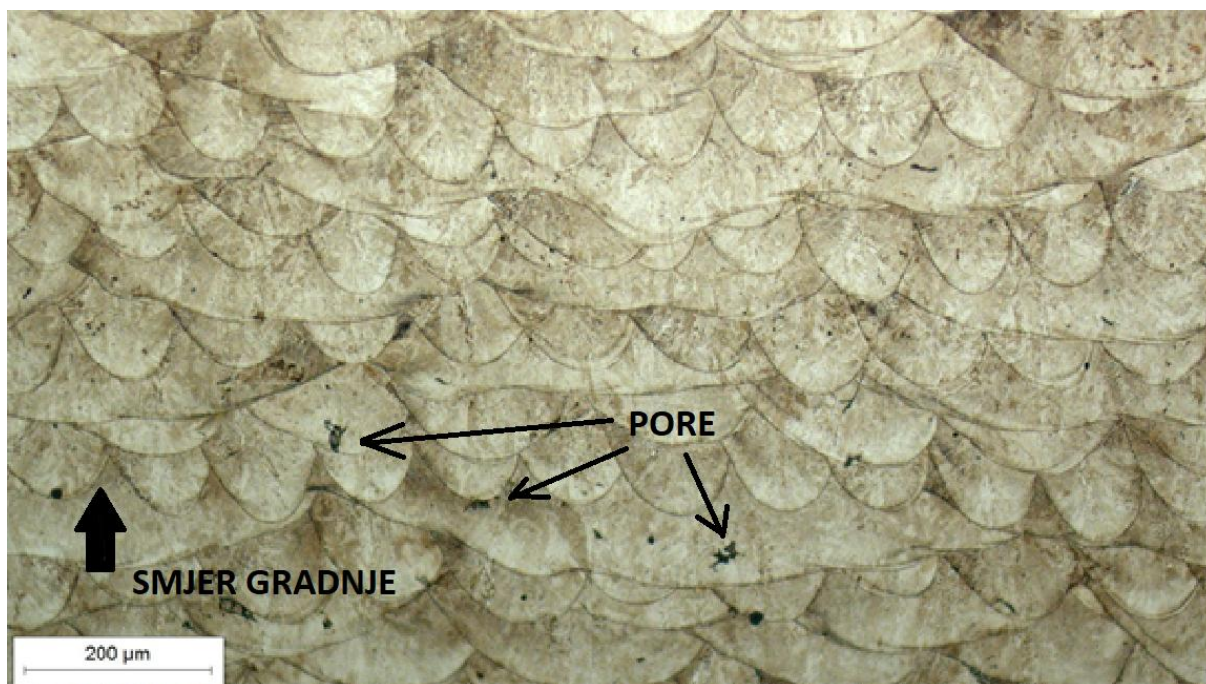
Slika 29. Prikaz mikrostrukture u uzdužnom smjeru nagriženog uzorka pri povećanju 50x



Slika 30. Prikaz mikrostrukture u uzdužnom smjeru nagriženog uzorka pri povećanju 100x



Slika 31. Prikaz mikrostrukture u poprečnom smjeru nagriženog uzorka pri povećanju 50x



Slika 32. Prikaz mikrostrukture u poprečnom smjeru nagriženog uzorka pri povećanju 100x

4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

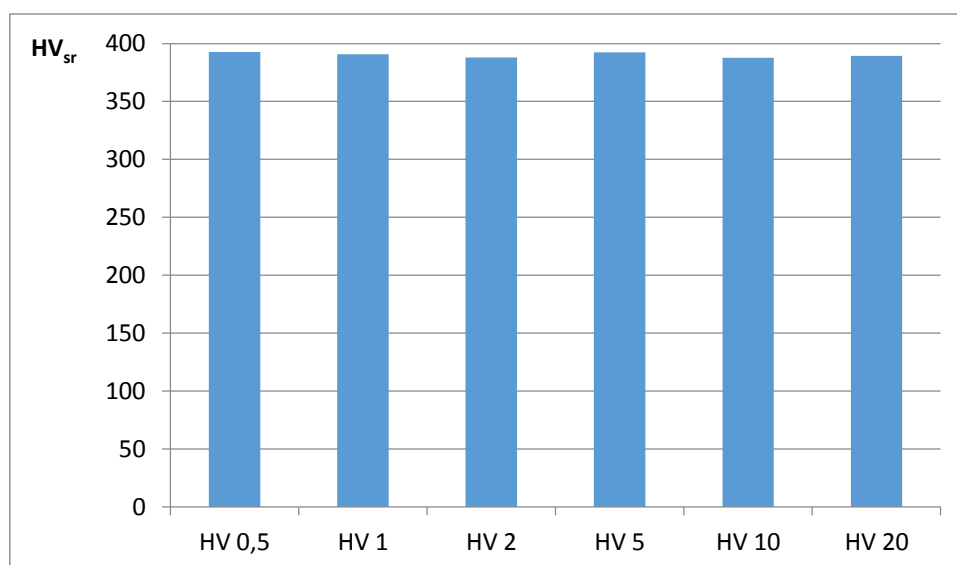
4.1. Analiza rezultata mjerenja tvrdoće

Rezultati dobiveni ispitivanjem tvrdoće po Vickersu nadmašili su vrijednosti tvrdoće koje je proizvođač naveo u brošuri. U tablici 9. prikazana je srednja vrijednost tvrdoće te se može primijetiti ujednačenost rezultata s obzirom na zadano opterećenje.

Tablica 9. Prikaz rezultata srednje vrijednosti tvrdoće s obzirom na opterećenje

	HV_{sr}
HV 0,5	392,8
HV 1	390,8
HV 2	388,0
HV 5	392,4
HV 10	387,7
HV 20	389,5

Na slici 33. prikazan je graf srednje vrijednosti tvrdoće s obzirom na zadano opterećenje.



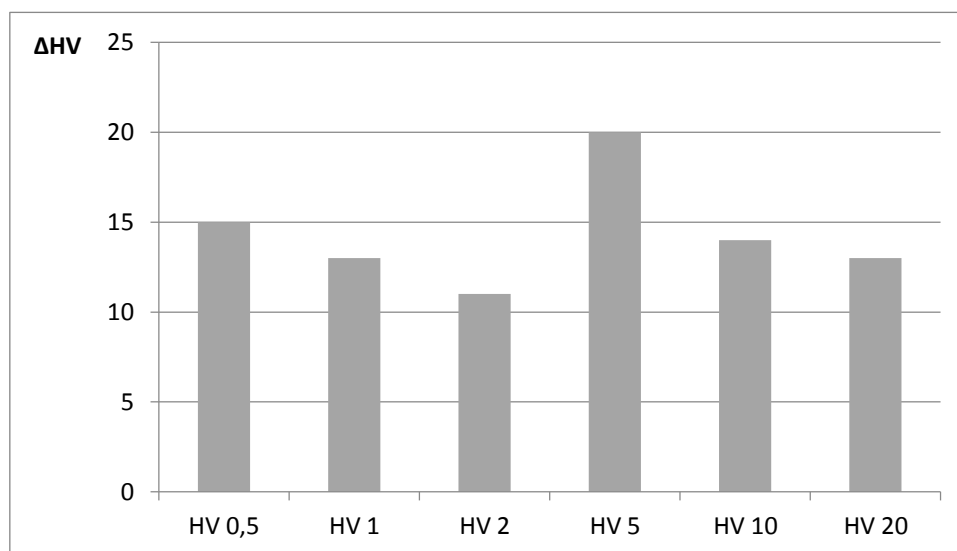
Slika 33. Prikaz srednje vrijednosti tvrdoće s obzirom na zadano opterećenje

U tablici 10. prikazane su najveće i najmanje vrijednosti tvrdoće dobivene pri određenom opterećenju te njihova razlika.

Tablica 10. Prikaz razlike, minimalne i maksimalne vrijednosti s obzirom na opterećenje

	HV_{max}	HV_{min}	ΔHV
HV 0,5	399	384	15
HV 1	398	385	13
HV 2	395	384	11
HV 5	401	381	20
HV 10	394	380	14
HV 20	397	384	13

Na slici 34. nalazi se prikaz grafa ΔHV u ovisnosti o zadanom opterećenju.



Slika 34. Graf ovisnosti ΔHV o zadanom opterećenju

Rasipanje rezultata povećano je s obzirom da je ovo polazno stanje etalonskih pločica tvrdoće. S daljnjom toplinskom obradom rasipanje će se smanjiti, a rezultati još poboljšati.

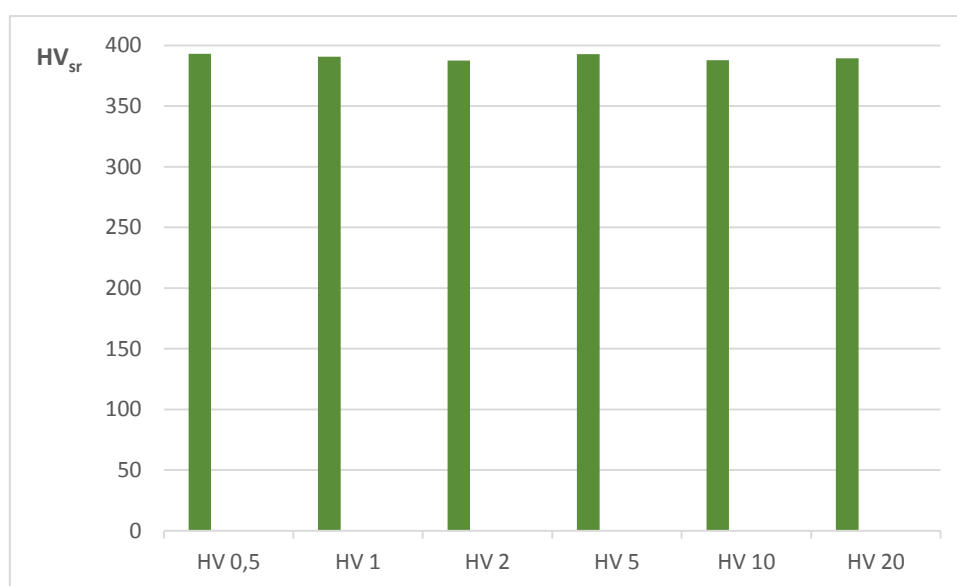
Kod svih opterećenja rasipanje rezultata je u granicama od 10 do 15 HV. Ako bismo odbacili minimalnu i maksimalnu vrijednost i na preostalih 8 mjerenja ponovili obradu rezultata dobili bismo vrijednosti prikazane u sljedećim tablicama i slikama.

U tablici 11. prikazane su nove vrijednosti srednje tvrdoće s obzirom na opterećenja.

Tablica 11. Prikaz nove vrijednosti srednje tvrdoće s obzirom na zadano opterećenje

	HV_{sr}
HV 0,5	393,125
HV 1	390,625
HV 2	387,625
HV 5	392,750
HV 10	387,875
HV 20	389,250

Na slici 35. prikazan je graf novih vrijednosti srednje tvrdoće s obzirom na zadano opterećenje.



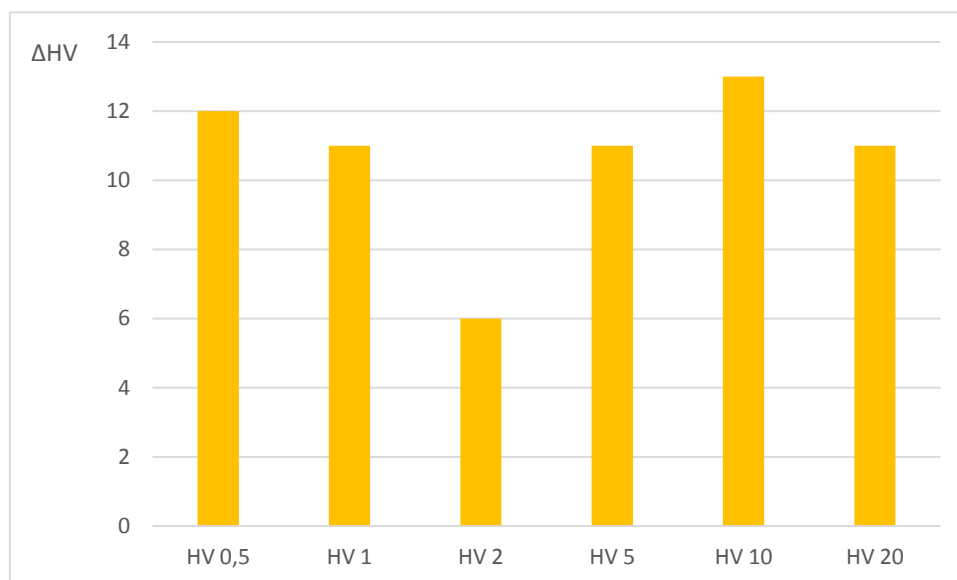
Slika 35. Graf novih vrijednosti srednje tvrdoće s obzirom na zadano opterećenje

U tablici 12. prikazane su nove najveće i najmanje vrijednosti tvrdoće dobivene pri određenom opterećenju te njihova razlika.

Tablica 12. Prikaz nove razlike, minimalnih i maksimalnih vrijednosti s obzirom na opterećenje

	HV_{\max}	HV_{\min}	ΔHV
HV 0,5	399	387	12
HV 1	396	385	11
HV 2	391	385	6
HV 5	397	386	11
HV 10	393	380	13
HV 20	396	385	11

Na slici 36. nalazi se prikaz grafa novog ΔHV u ovisnosti o zadanom opterećenju.



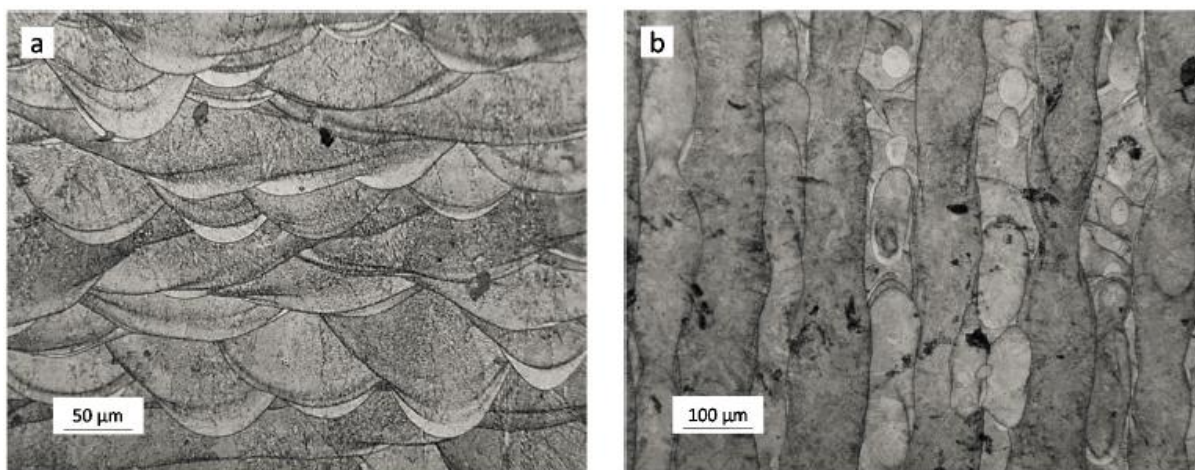
Slika 36. Graf novog ΔHV u ovisnosti o zadanom opterećenju

4.2. Analiza metalografskih ispitivanja

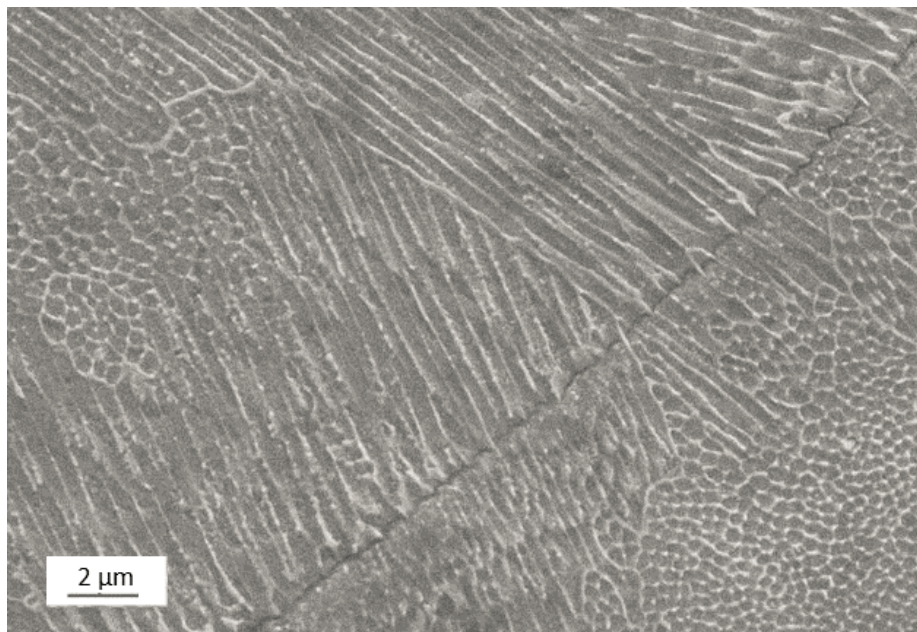
U poliranom stanju uzorka vidljive su nečistoće ili oštećenja veličine nekoliko mikrometara i kao takve ne utječu značajno na tvrdoću. Potrebno je provesti analizu na SEM (eng. Scanning Electron Microscopy) uređaju kako bi se površina i mikrostruktura uzorka još bolje proučile te neke eventualne nepravilnosti lakše zapazile. Također potrebno je utvrditi dolazi li do pojave nečistoća zbog materijala praha ili je uzrok u 3D printeru.

U nagriženom stanju također je moguće vidjeti nečistoće na površini uzorka. Smjer gradnje najizraženiji je u poprečnom smjeru te se javlja kao pojava uredno raspoređenih polukružnih oblika.

U ovome radu nije bio cilj ispitivanje mikrostrukture već raspored tvrdoće. Pomoću literature utvrđeno je da je dobivena mikrostruktura igličasti martenzit [15]. Na slikama 37 i 38 dan je prikaz martenzitne mikrostrukture iz literature koja je poslužila pri usporedbi.



Slika 37. Prikaz martenzitne mikrostrukture iz literature: a) u poprečnom smjeru; b) u uzdužnom smjeru [15]



Slika 38. Prikaz SEM analize [15]

Uspoređeni uzorak iz literature izrađen je od istog materijala kao i uzorak analiziran u ovom radu. Tragovi zaostalog austenita (γ -Fe faza) otkriveni su prilikom faznog mapiranja te se uglavnom nalaze na granicama martenzitnih blokova.

5. ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme 3D printanjem moguće je izraditi proizvode čija kvaliteta neće zaostajati za proizvodima izrađenim konvencionalnim postupcima. Na izbor se nudi mnogo načina proizvodnje te vrsta materijala koje je moguće koristiti pri izradi složenih proizvoda. Nastali proizvodi uz daljnju obradu mogu se upotrebljavati za različite svrhe.

Na temelju dobivenih rezultata provedenih istraživanja te analize, mogu se donijeti sljedeći zaključci.

- Primjenom polaznog praha EOS MaragingSteel MS1 te 3D tehnologijom printanja DMLS postupkom moguće je dobiti polazni materijal za izradu etalonskih pločica tvrdoće.
- Analizom dobivenih vrijednosti tvrdoće uočeno je da su postignute ujednačene vrijednosti tvrdoće s obzirom na primijenjenu silu opterećenja (od HV 0,5 do HV 20).
- Raspodjela tvrdoće po cijeloj ispitnoj površini je dosta ujednačena i rasipanje vrijednosti je unutar 2 %. Uzrok dijela tog rasipanja se može pridodati završnoj obradi ispitne površine koja je dobivena brušenjem i poliranjem, ali odstupanje od planparalelnosti nije bilo dovedeno u stanje koje zahtjeva norma HRN EN ISO 6507-3:2018.
- Analizom stanja polirane površine uočene su određene sitne nepravilnosti, no njihov udio kao i veličina nisu značajnog karaktera. Trebalo bi utvrditi koji su uzroci njihovog nastanka. Analizom mikrostrukture po presjeku također su uočene iste nepravilnosti koje se nalaze u usmjerenj mikrostrukтури uzrokovane samim printanjem. Također se može primijetiti da se radi o ujednačenoj mikrostrukтури po cijelom presjeku.
- S obzirom da se nakon ovog polaznog stanja provode dodatni postupci toplinske obrade moguće je postići još bolju mikrostrukтуру (jednoličniju i homogeniju) te time i bolja svojstva etalonskih pločica.
- Prema saznanjima o cijeni etalonskih pločica tvrdoće dobivenih konvencionalnim metodama te procijeni cijene izrade postupkom 3D printanja može se zaključiti da će ovim postupkom dobivene etalonske pločice tvrdoće biti znatno skuplje.

LITERATURA

- [1] Martinez I. Umjeravanje referentnih etalonskih pločica tvrdoće za metodu Vickers[diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019
- [2] Aleksandrov Fabijanić T. Razvoj referentnih pločica tvrdoće po Vickersu postupkom metalurgije praha [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [3] Norma HRN EN ISO 6507-3:2018; Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu – 3. dio: Umjeravanje etalonskih pločica
- [4] Norma HRN EN ISO 6507-1:2018; Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu – 1. dio: Metoda ispitivanja
- [5] Tehničke znanosti/Engineering Power, Glasnik Akademije tehničkih znanosti Hrvatske/Bulletin of the Croatian Academy of Engineering: Vol. 19(1) 2015 – ISSN 1330-7207
- [6] Duda T, Venkat Raghavan L, 3D Metal Printing Technology, IFAC-PapersOnLine, Volume 49, Issue 29, 2016.
- [7] Wohlers T.;Garnett T.; History of additive manufacturing; Wohlers Associates, INC.; 2014.
- [8] <https://www.cadalyst.com/hardware/3d-printers/wohlers-report-finds-slower-overall-growth-more-competition-3d-printing-space-3> (12.2.2022.)
- [9] <https://www.3dprintingmedia.network/new-wohlers-report-2021-finds-7-5-growth-in-additive-manufacturing-industry/> (12.2.2022.)
- [10] Godec D, Šercer M; Aditivna proizvodnja; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015.
- [11] Videršćak D., Primjena aditivnih postupaka u automobilske industriji, Diplomski rad; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [12] Ivušić V, Franz M, Španiček Đ, Ćurković L; Materijali 1; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb; 2014.
- [13] EOS GmbH - Electro Optical Systems; EOS MaragingSteel MS1/400W; TMS, WEIL / 05.2014
- [14] eos_system_data_sheet_eos_m_290_en.pdf

-
- [15] Aging Behaviour and Mechanical Performance of 18-Ni 300 Steel Processed by Selective Laser Melting; Riccardo Casati , Jannis N. Lemke , Ausonio Tuisi and Maurizio Vedani; *Metals* 2016, 6, 218; doi:10.3390/met6090218