

Empirijska povezanost tvrdoće i vlačne čvrstoće 3D printanih metala

Rnjak, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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:235:629910>

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

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

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nikola Rnjak

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.
Dr. sc. Dalibor Viderščak, mag. ing. mech.

Student:

Nikola Rnjak

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se mentorima prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu i dr. sc. Daliboru Viderščaku na pruženoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem se laborantima Ivanu Vovku i Ivanu Martinku na pomoći oko pripreme i ispitivanja uzoraka.

Također se zahvaljujem Metalskoj jezgri Čakovec i ravnatelju dr. sc. Mariu Šerceru na izradi uzoraka.

Najveća zahvala upućena je mojoj obitelji i prijateljima na podršci i motivaciji tijekom studiranja.

Nikola Rnjak



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 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nikola Rnjak** JMBAG: **0035236435**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Empirijska povezanost tvrdoće i vlačne čvrstoće 3D printanih metala**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Empirical correlation between hardness and tensile strength of 3D-printed metals**

Opis zadatka:

Razvoj aditivnih tehnologija, kao što je 3D printanje metala, omogućilo je izradu složenih geometrija metalnih komponenti s optimiranim svojstvima i strukturom. Istraživanje odnosa između tvrdoće i vlačne čvrstoće kod 3D printanih metala može pridonijeti boljem razumijevanju mehaničkih svojstava ovih materijala te olakšati predviđanje svojstava gotovih dijelova u industrijskoj primjeni.

U teorijskom dijelu rada potrebno je provesti pregled literature o metodama 3D printanja metala, poput LPBF postupka, te analizu postojećih odnosa između tvrdoće i vlačne čvrstoće u 3D printanim i tradicionalno proizvedenim metalima.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti analizu i odrediti empirijsku povezanost između tvrdoće i vlačne čvrstoće za 4 vrste 3D printanih metala: nehrđajućeg čelika 316L, titanove legure, maraging čelika i aluminijske legure. Potrebno je pripremiti uzorke za analizu svjetlosnim mikroskopom i mjerenje tvrdoće. Rezultate mjerenja tvrdoće potrebno je analizirati i empirijski povezati s vrijednostima vlačne čvrstoće unaprijed određene prema tehničkom listu proizvođača za svaki pojedini metal.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauerl

dr. sc. Dalibor Videršćak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA	2
2.1. Aditivna proizvodnja metala.....	4
2.2. Spajanje prahova u komori (PBF).....	6
2.2.1. Selektivno lasersko srašćivanje (SLS)	6
2.2.2. Selektivno lasersko taljenje (SLM).....	7
2.2.3. Taljenje pomoću snopa elektrona (EBM).....	7
2.3. Izravno energijsko taloženje (DED)	8
2.3.1. Izravno taloženje metala (LENS).....	9
2.3.2. Izravno taloženje metalnog praha (DMD)	10
2.4. Spajanje metalnog praha vezivom (MBJ).....	10
2.5. Ekstrudiranje metalnih materijala (MME).....	11
2.6. Laminiranje (LOM).....	12
3. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA.....	13
3.1. Statičko vlačno ispitivanje	13
3.2. Tvrdća	16
3.2.1. Brinellova metoda.....	17
3.2.2. Vickersova metoda.....	18
3.2.3. Rockwellova metoda.....	19
3.3. Povezanost tvrdoće i vlačne čvrstoće.....	20
4. EKSPERIMENTALNI DIO – ODREĐIVANJE EMPIRIJSKE POVEZANOSTI TVRDOĆE I VLAČNE ČVRSTOĆE 3D PRINTANIH METALA.....	21
4.1. Priprema uzoraka	22
4.2. Analiza uzoraka.....	24
4.3. Mjerenje tvrdoće	28
4.4. Regresijska analiza.....	31
5. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36
PRILOZI.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1.	Nastanak 3D proizvoda: a) 3D model, b) slaganje 2D slojeva, c) slojeviti proizvod [5]	3
Slika 2.	Usporedba troškova konvencionalne i aditivne proizvodnje [2].....	3
Slika 3.	Spajanje prahova u komori [10]	6
Slika 4.	Taljenje pomoću snopa elektrona [13]	7
Slika 5.	Izravno energijsko taloženje [15]	8
Slika 6.	Izravno taloženje metala [13]	9
Slika 7.	Izravno taloženje metalnog praha [13]	10
Slika 8.	Spajanje metalnog praha vezivom [16]	11
Slika 9.	Ekstrudiranje metalnih materijala [20].....	11
Slika 10.	Laminiranje [21].....	12
Slika 11.	Epruvete četvrtastog i okruglog poprečnog presjeka [1].....	13
Slika 12.	Dijagram naprezanje-istezanje (σ - ϵ) [23]	14
Slika 13.	Brinellova metoda [24]	17
Slika 14.	Vickersova metoda [22]	18
Slika 15.	Shematski prikaz mjerenja tvrdoće HRC metodom [24]	19
Slika 16.	Ispitni uzorci.....	21
Slika 17.	Uređaj za rezanje <i>Mecatome T260</i> [27]	22
Slika 18.	Uređaj za brušenje i poliranje <i>Mecatech 250 SPI</i> [28].....	23
Slika 19.	3D printer <i>EOS M290</i> [29]	23
Slika 20.	Uzorak 1 uzdužno, polirano stanje	24
Slika 21.	Uzorak 1 poprečno, polirano stanje	24
Slika 22.	Uzorak 2 uzdužno, polirano stanje	25
Slika 23.	Uzorak 2 poprečno, polirano stanje.....	25
Slika 24.	Uzorak 3 uzdužno, polirano stanje	26
Slika 25.	Uzorak 3 poprečno, polirano stanje.....	26
Slika 26.	Uzorak 4 uzdužno, polirano stanje	27
Slika 27.	Uzorak 4 poprečno, polirano stanje.....	27
Slika 28.	<i>ZwickRoell</i> tvrdomjer	28
Slika 29.	Program za obradu podataka	29
Slika 30.	Grafički prikaz regresijske analize za uzorak 1	32
Slika 31.	Grafički prikaz regresijske analize za uzorak 2.....	32
Slika 32.	Grafički prikaz regresijske analize za uzorak 3.....	33
Slika 33.	Grafički prikaz regresijske analize za uzorak 4.....	33

POPIS TABLICA

Tablica 1. Materijali u aditivnoj proizvodnji metala, svojstva i primjena [8].....	5
Tablica 2. Karakteristike uređaja <i>EOS M290</i> [30]	23
Tablica 3. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 1.....	29
Tablica 4. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 2.....	30
Tablica 5. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 3.....	30
Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 4.....	31
Tablica 7. Vrijednosti vlačne čvrstoće R_m	31
Tablica 8. Vrijednosti konstante C	31

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna Jedinica	Opis oznake
A	%	Istezljivost
D	mm	Promjer kuglice
d	mm	Promjer baze kugline kalote
d_1	mm	Dijagonala baze piramide
d_2	mm	Dijagonala baze piramide
d_3	mm	Srednja vrijednost dijagonala baze piramide
E	N/mm ²	Youngov modul elastičnosti
F	N	Sila
F_e	N	Sila tečenja
F_k	N	Konačna sila
F_m	N	Maksimalna sila
HB	---	Tvrdoća po Brinellu
HRB	---	Tvrdoća po Rockwellu ispitana čeličnom kuglicom
HRC	---	Tvrdoća po Rockwellu ispitana dijamantnim stošcem
HV	---	Tvrdoća po Vickersu
L_0	mm	Početna mjerna duljina ispitnog uzorka
l	mm	Produljenje
n	---	Koeficijent deformacijskog očvrnuća
r^2	---	Koeficijent determinacije
R_e	N/mm ²	Granica razvlačenja
R_k	N/mm ²	Konačno naprezanje
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
S_0	mm ²	Površina poprečnog presjeka ispitnog uzorka
S_1	mm ²	Površina kalote kugle
S_2	mm ²	Površina šuplje piramide otisnute u materijalu
S_u	mm ²	Površina konačnog presjeka ispitnog uzorka
Z	%	Kontrakcija

Grčka slova	Mjerna jedinica	Opis oznake
γ	---	Gama zračenje
ΔL	mm	Produljenje ispitnog uzorka
ΔL_u	mm	Konačno produljenje ispitnog uzorka
ε	mm/mm	Istezanje, relativno produljenje
ε_u	mm/mm	Konačno istezanje
σ	N/mm ²	Naprezanje

POPIS KRATICA

Kratice	Opis kratice
2D	Dvodimenzionalno
3D	Trodimenzionalno
ABS	Akrilonitril/butadien/stiren
Ag	Zlato
Al	Aluminij
AM	Aditivna proizvodnja (eng. <i>Additive Manufacturing</i>)
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale (eng. <i>American Society for Testing and Materials</i>)
Au	Srebro
BJ	Mlazno nanošenje veziva (eng. <i>Binder Jetting</i>)
CAD	Konstruiranje pomoću računala (eng. <i>Computer Aided Design</i>)
CNC	Računalno numeričko upravljanje (eng. <i>Computer Numerical Control</i>)
Co	Kobalt
CO ₂	Ugljikov dioksid
Cr	Krom
DED	Izravno energijsko taloženje (eng. <i>Directed Energy Deposition</i>)
DMD	Izravno taloženje metalnog praha (eng. <i>Directed Metal Deposition</i>)
DMLS	Izravno lasersko srašćivanje metala (eng. <i>Directed Metal Laser Sintering</i>)
EBM	Taljenje pomoću snopa elektrona (eng. <i>Electron Beam Melting</i>)
EDS	Energijsko disperzijska spektroskopija (eng. <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>)
FDM	Taložno očvščivanje (eng. <i>Fused Deposition Modelling</i>)
ISO	Međunarodna organizacija za normizaciju (eng. <i>International Organization for Standardization</i>)
LENS	Izravno taloženje metala (eng. <i>Laser Engineering Net Shaping</i>)
LOM	Proizvodnja laminiranih objekata (eng. <i>Laminated Object Manufacturing</i>)
LPBF	Lasersko spajanje prahova u komori (eng. <i>Laser Powder Bed Fusion</i>)
MBJ	Spajanje metalnog praha vezivom (eng. <i>Metal Binder Jetting</i>)

MEX	Ekstruzija materijala (eng. <i>Material extrusion</i>)
Mg	Magnezij
MJ	Mlazno nanošenje materijala (eng. <i>Material Jetting</i>)
MME	Ekstrudiranje metalnih materijala (eng. <i>Metal Material Extrusion</i>)
Nb	Niobij
Nd	Neodim
Ni	Nikal
PBF	Spajanje prahova u komori (eng. <i>Powder Bed Fusion</i>)
Pt	Platina
PUR	Poliuretan
PVC	Poli(vinil-klorid)
RM	Brza proizvodnja (eng. <i>Rapid Manufacturing</i>)
RP	Brza izrada prototipova (eng. <i>Rapid Prototyping</i>)
RT	Brza proizvodnja kalupa i alata (eng. <i>Rapid Tooling</i>)
SEM	Skenirajuća elektronska mikroskopija (eng. <i>Scanning Electron Microscopy</i>)
Si	Silicij
SLM	Selektivno lasersko taljenje (eng. <i>Selective Laser Melting</i>)
SLS	Selektivno lasersko sraščivanje (eng. <i>Selective Laser Sintering</i>)
Ta	Tantal
Ti	Titan
V	Vanadij
VPP	Fotopolimerizacija iz spremnika (eng. <i>Vat Photopolymerisation</i>)
W	Volfram
Yag	Itrij aluminijev granat
Yb	Iterbij

SAŽETAK

U teorijskom dijelu ovog završnog rada opisana je aditivna proizvodnja, najčešći postupci te prednosti i nedostaci u odnosu na konvencionalnu proizvodnju. Detaljno su opisani postupci aditivne proizvodnje metala, princip rada pojedinog postupka te materijali koji se upotrebljavaju. Opisan je postupak određivanja mehaničkih svojstava koji obuhvaća statičko vlačno ispitivanje te mjerenje tvrdoće različitim metodama koje se primjenjuju. Prikazani su dosadašnji rezultati istraživanja u području povezanosti tvrdoće (HV) i vlačne čvrstoće materijala (R_m).

U eksperimentalnom dijelu rada izrađeni su uzorci upotrebom različitih metalnih materijala (Ti-legura, nehrđajući čelik 316L, Al-legura i maraging čelik MS1) DMLS postupkom, provedena je analiza mikrostrukture i izmjerena tvrdoća. Na temelju vrijednosti izmjerene tvrdoće (HV1) i vlačne čvrstoće (R_m) provedena je regresijska analiza te je određena empirijska povezanost tvrdoće i vlačne čvrstoće DMLS proizvedenih metalnih materijala.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja metala, mehanička svojstva, statičko vlačno ispitivanje, vlačna čvrstoća, tvrdoća, regresijska analiza.

SUMMARY

In the theoretical part of this Bachelor thesis, additive manufacturing, the most common processes, their advantages and disadvantages compared to conventional manufacturing are described. The processes of metal additive manufacturing are explained in detail, including the working principles of each process and the materials used. The procedure for determining mechanical properties is described, covering static tensile testing and hardness measurement using various applicable methods. Previous research results in the field of the correlation between hardness (HV) and tensile strength (R_m) of materials are presented.

In the experimental part of the thesis, specimens were produced using different metal materials (Ti alloy, 316L stainless steel, Al alloy, and MS1 maraging steel) through the DMLS process. Microstructure analysis was conducted, and hardness was measured. Based on the measured values of hardness (HV1) and tensile strength (R_m), a regression analysis was performed, and an empirical correlation between the hardness and tensile strength of DMLS-produced metal materials was determined.

Keywords: metal additive manufacturing, mechanical properties, static tensile testing, tensile strength, hardness, regression analysis.

1. UVOD

Mehanička svojstva materijala kao što su granica tečenja R_e (N/mm^2), vlačna čvrstoća R_m (N/mm^2) i modul elastičnosti E (N/mm^2), ključni su parametri za određivanje opterećenja koje materijal može podnijeti u eksploatacijskim uvjetima. Za određivanje mehaničkih svojstava materijala koriste se različita ispitivanja, a najčešće se primjenjuje statičko vlačno ispitivanje. Poznavanjem odnosa između tvrdoće i vlačne čvrstoće materijala moguće je procijeniti čvrstoću materijala na temelju mjerenja tvrdoće što zahtjeva puno manji utrošak vremena i jednostavniju pripremu uzoraka nego pri statičkom vlačnom ispitivanju. Zbog nedestruktivne prirode ispitivanja mjerenja tvrdoće moguće je provesti ispitivanja na strojnim dijelovima tijekom eksploatacije te nije potrebno izrađivati ispitne uzorke što često može biti veoma izazovno kod pojedinih geometrija strojnih elemenata [1].

Aditivne tehnologije proizvodnje metala zauzimaju značajno mjesto u suvremenoj proizvodnji zahvaljujući mogućnosti izrade složenih geometrija, optimizaciji procesa te uštedi proizvodnih resursa. Aditivna proizvodnja metala primjenjuje se u raznim granama industrije poput automobilske industrije, medicine, zrakoplovstva, arhitekture i svemirske industrije [1,2].

U ovom radu određena je empirijska povezanost tvrdoće (HV1) i vlačne čvrstoće (R_m , N/mm^2) metalnih materijala izrađenih DMLS postupkom.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja (eng. *Additive manufacturing* – AM) je proces izrade predmeta nanošenjem metalnog praha u tankim slojevima jedan na drugi te taljenjem prolaskom laserske zrake. Proizvodni proces započinje konstruiranjem trodimenzionalnog modela računalnim CAD programima za modeliranje, ili digitaliziranjem prostornog oblika već postojećeg objekta trodimenzionalnim skenerima. Model se zatim pretvara u niz horizontalnih poprečnih presjeka koji se tiskaju, sloj po sloj, pomoću 3D printera tvoreći složene trodimenzionalne strukture [3]. Aditivne tehnologije su značajno razvijene 1980.-ih. Danas imaju važnu ulogu i primjenu u različitim sektorima kao što su zrakoplovstvo, medicina, građevinarstvo, umjetnost, arhitektura, obrazovanje, automobilska i vojna industrija. Ova tehnologija omogućava proizvodnju komadnih personalnih serija ili malih serija koje mogu biti vrlo složenih oblika, a koje bi tradicionalnim metodama proizvodnje bile teško izvedive ili nemoguće [4].

Aditivnu proizvodnju moguće je ostvariti na tri načina, tj. kao [5]:

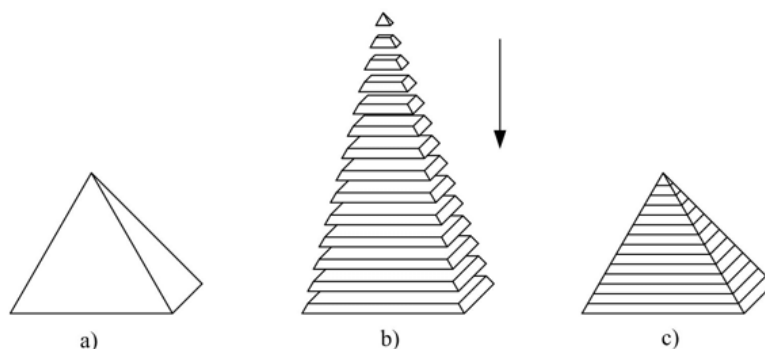
- postupke brze izrade prototipova (eng. *Rapid Prototyping* – RP)
- postupke brze proizvodnje alata i kalupa (eng. *Rapid Tooling* – RT)
- postupke brze (izravne) proizvodnje (eng. *Rapid Manufacturing* – RM)

Ovisno o tehnologiji dobivanja slojeva i materijalima za izradu, koji mogu biti u krutom, tekućem i praškastom stanju, razvijeno je više postupaka aditivne proizvodnje.

Tipovi procesa aditivne proizvodnje ovisno o primijenjenoj tehnologiji (ISO/ASTM 52900) [6]:

- izravno energijsko taloženje (eng. *Directed energy deposition* - DED)
- mlazno nanošenje veziva (eng. *Binder Jetting* - BJ)
- mlazno nanošenje materijala (eng. *Material Jetting* - MJ)
- ekstruzija materijala (eng. *Material extrusion* - MEX)
- spajanje prahova u komori (eng. *Powder bed fusion* - PBF)
- laminiranje (eng. *Laminated object manufacturing* - LOM)
- fotopolimerizacija iz spremnika (eng. *Vat Photopolymerisation* - VPP).

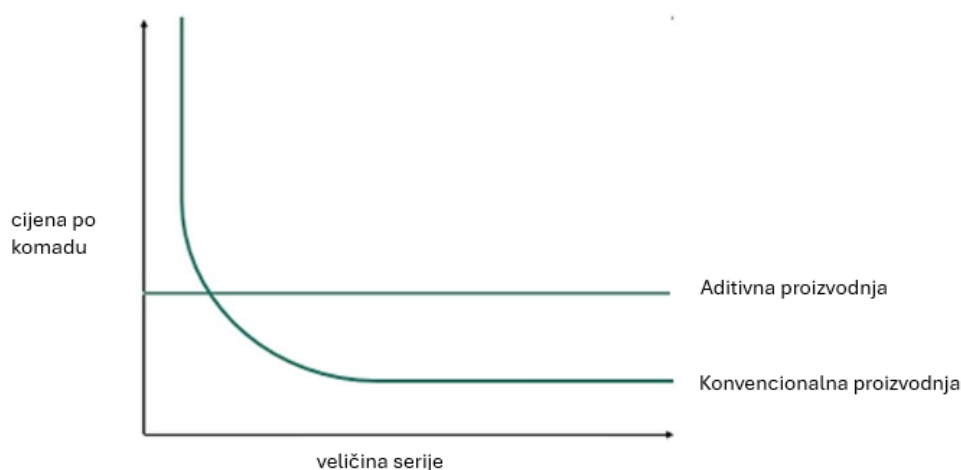
Postupcima aditivne proizvodnje grade se vrlo komplicirani geometrijski oblici proizvoda koji nastaju slaganjem 2D slojeva jedan na drugi i tako se dolazi do treće dimenzije proizvoda (slika 1) [5].



Slika 1. Nastanak 3D proizvoda: a) 3D model, b) slaganje 2D slojeva, c) slojeviti proizvod [5]

Najčešće se upotrebljavaju polimerni materijali, kao akrilonitril butadien stiren (ABS), poli(vinil-klorid) (PVC), poliuretani (PUR), epoksidne smole, zatim kompozitni materijali, keramika, čelik, aluminij, titanij i drugi metali i njihove legure.

Prednosti aditivne proizvodnje su postizanje visoke razine preciznosti i ponovljivosti u proizvodnji, brzina izrade za manje serije, manji utrošak i bolja iskoristivost materijala, izrada kompleksne geometrije te mogućnost personalizacije proizvoda. Moguće je dizajnirati kompleksne geometrije i strukture s manje ograničenja. Tradicionalni proizvodni postupci poput injekcijskog prešanja često zahtijevaju skupe alate i kalupe, dok za 3D printanje nije potreban alat. Aditivne tehnologije koriste samo materijal potreban za izradu proizvoda čime se značajno smanjuje otpad. Nedostaci aditivne proizvodnje su ograničene dimenzije modela, izbor materijala te brzina izrade za veće serije proizvoda [2,3,4].



Slika 2. Usporedba troškova konvencionalne i aditivne proizvodnje [2]

Usporedba troškova konvencionalne i aditivne proizvodnje po jedinici proizvoda prikazana je na slici 2. Kod proizvodnje malih serija proizvoda cijena po komadu kod konvencionalne

proizvodnje je velika dok je cijena kod aditivne proizvodnje konstantna. Povećanjem proizvodne serije cijena po komadu kod konvencionalne proizvodnje opada te postaje isplativija od aditivne proizvodnje. 3D printanje velikih serija proizvoda je sporije od izrade tradicionalnim metodama poput CNC obrade ili lijevanja, kojima se mogu postići visoke stope produktivnosti. Pri proizvodnji većih serija aditivne tehnologije zahtijevaju veću potrošnju energije, posebice laserski sustavi poput laserskog spajanja praha u komori – LPBF [2].

2.1 Aditivna proizvodnja metala

Aditivna proizvodnja metala upotrebljava se za proizvodnju dijelova kompleksne geometrije direktno iz 3D CAD modela. Metalni prah se nanosi uzastopno na radnu podlogu u obliku slojeva unaprijed određene debljine te naknadnim taljenjem snagom laserske zrake se skrućuje dok ne poprimi unaprijed definirani oblik. Aditivna proizvodnja metala je promijenila i nadopunila tradicionalne postupke proizvodnje kao što su lijevanje i glodanje te svakim danom povećava potencijal u proizvodnji metalnih dijelova zbog mogućnosti izrade kompleksnih geometrija uz minimalni otpadni materijal. Vrsta aditivnog postupka, parametri prerade i karakteristike upotrijebljenog metalnog praha utječu na konačni proizvod u pogledu mehaničkih svojstava i završne obrade [7].

Najčešći postupci koji se koriste su [8] :

1. postupci spajanja prahova u komori (PBF) kao što su selektivno lasersko sinteriranje (eng. *Selective laser sintering* – SLS), selektivno lasersko taljenje (eng. *Selective laser melting* – SLM) i taljenje pomoću snopa elektrona (eng. *Electron beam melting* – EBM)
2. postupci izravnog energijskog taloženja (DED) kao što su izravno taloženje metala (eng. *Laser engineering net shaping* – LENS), EBM i izravno taloženje metalnog praha (eng. *Direct metal deposition* – DMD)
3. spajanje metalnog praha vezivom (eng. *Metal binder jetting* – MBJ)
4. ekstrudiranje metalnih materijala (eng. *Metal material extrusion* – MME)
5. laminiranje (eng. *Laminated object manufacturing* - LOM).

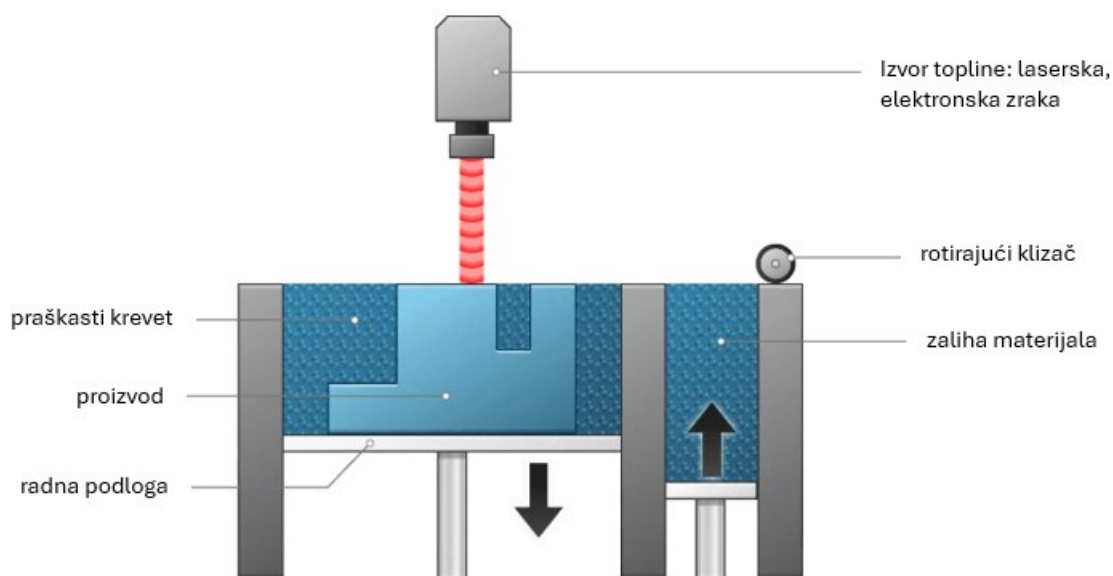
U aditivnoj proizvodnji metala se upotrebljavaju različiti metalni materijali u obliku praha, folija ili ploča, a prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Materijali u aditivnoj proizvodnji metala, svojstva i primjena [8].

Materijal	Svojstva i primjena
Aluminij i njegove legure (AlSi ₁₀ Mg, AlSi ₁₂ , AlSi ₁₂ Mg)	Visoka otpornost na koroziju, visok omjer čvrstoće i težine, otpornost na visoke temperature te dobra toplinska i električna vodljivost. Primjena: proizvodnja laganih, geometrijski složenih dijelova, posebno se koristi u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji.
Titanij i njegove legure (Ti ₆ Al ₄ V)	Izvrсна biokompatibilnost, dobra čvrstoća i žilavost, visoka otpornost na koroziju. Primjena: moto sport, zrakoplovstvo i medicinske/stomatološke primjene.
Nehrđajući čelik (17-4PH i 316L)	Visoka tvrdoća, žilavost i otpornost na koroziju, dobra zavarljivost, visoka duktilnost. Primjena: zrakoplovna industrija, industrija nafte i plina i medicinska industrija.
Kobalt i njegove legure (CoCr ₂₈ Mo ₆)	Izvrсна čvrstoća, visoka otpornost na koroziju, otpornost na temperature, biokompatibilnost. Primjena: medicina (kirurški implantati kao umjetni zglobovi uključujući zglobove koljena i kuka) i stomatologija, proizvodnja dijelova za plinske i vjetroturbine, kao i za komponente motora.
Nikal i njegove legure (HX, IN625, IN718)	Visoka otpornost na koroziju, visoka čvrstoća i žilavost na višim temperaturama, izvrčna zavarljivost. Primjena: u zrakoplovnoj, kemijskoj i energetskej industriji, kao i za lopatice plinskih turbina mlaznih motora.
Bakar i njegove legure	Izvrčna toplinska i električna vodljivost, dobra krutost. Primjena: uređaji za upravljanje toplinom (npr. mikroizmjenjivači topline), elektrotehnika, umetci alata
Martenzitni čelik	Visoka čvrstoća i tvrdoća. Primjena: alati (jezgre i umetci alata za tlačno lijevanje i injekcijsko prešanje), funkcionalni prototipovi
Metali visokog tališta (Ta, Nb, W)	Visoka tvrdoća, otpornost na trošenje, visoka otpornost na koroziju, visoka toplinska stabilnost. Primjena: mlaznice, ventili i razdjelnici za projekte i raketne potisnike; implantati (tantal)
Plemeniti metali (Au, Ag, Pt)	Duktilni, vodljivi. Obično se obrađuju samo s SLM postupkom. Primjena: modni dodaci (nakit i satovi), zubi (krunice, inleji i onleji)

2.2 Spajanje prahova u komori (PBF)

PBF (slika 3) je tehnologija 3D printanja koja omogućuje izradu geometrijski složenih proizvoda korištenjem izvora energije, poput laserske ili elektronske zrake, za spajanje čestica praha. Izvor toplote primjenjuje se na određena područja sloja praha te spaja čestice praha. Nakon završetka prvog sloja radna podloga se spušta prema dolje, nanosi se novi sloj praška pomoću valjka te se postupak spajanja čestica praha ponavlja prema prethodno izrađenom CAD modelu dok se ne dobije željeni predmet [9].



Slika 3. Spajanje prahova u komori [10]

2.2.1 Selektivno lasersko srašćivanje (SLS)

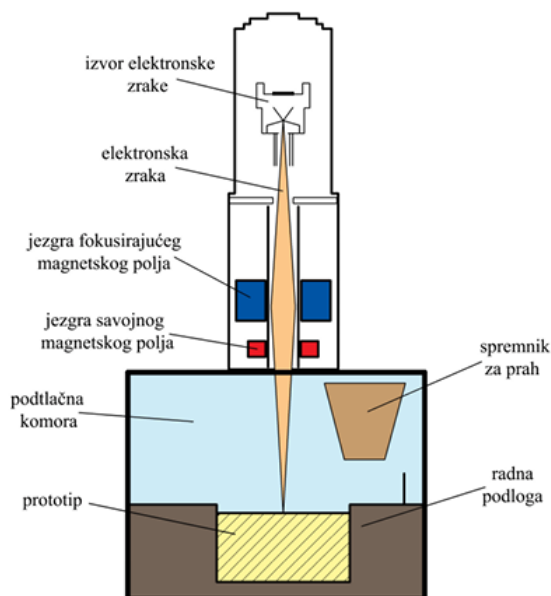
Selektivno lasersko srašćivanje (SLS) je jedan od najčešće korištenih postupaka za proizvodnju metalnih proizvoda aditivnom tehnologijom. Razlikuju se dva tipa srašćivanja prahova: srašćivanje praha u čvrstom stanju i srašćivanje praha u kapljevitom stanju. Srašćivanje u čvrstom stanju je proces koji se odvija pri temperaturama ispod tališta praha. Glavni pokretač povezivanja čestica praha je difuzija jedne čestice u drugu. Brzina takvog mehanizma je najčešće vrlo mala pa je srašćivanje u čvrstom stanju relativno spor proces, dok je srašćivanje u kapljevitom stanju mnogo brži proces. Srašćivanje u kapljevitom stanju temelji se na taljenju komponente praha koja ima niže talište (najčešće je to vezivo) te popunjavanjem prostora između čestica osnovnog materijala [5].

2.2.2 Selektivno lasersko taljenje (SLM)

Postupak je sličan SLS postupku, no pri SLM-u metalni prah se potpuno tali, što rezultira visokom gustoćom izrađenih metalnih proizvoda te nema potrebe za naknadnim koracima kao što su naknadno srašćivanje i prodiranje. Debljina sloja iznosi oko 0,02 mm. SLM postupak poznat je kao LPBF (eng. *Laser powder bed fusion*) ili DMLS (eng. *Direct metal laser sintering*). Utjecajni parametri SLM procesa su snaga lasera, brzina laserske zrake, debljina sloja i temperatura radne podloge. Optimizacijom parametara moguće je mijenjati mikrostrukturu te na taj način dobiti željena svojstva materijala, kao što su visoka gustoća, otpornost na trošenje i mehanička svojstva. Glavni nedostatak postupka je gruba površina proizvoda koju je potrebno dodatno doraditi te manja točnost dimenzija proizvoda u usporedbi s SLS postupkom [5,11,12].

2.2.3 Taljenje pomoću snopa elektrona (EBM)

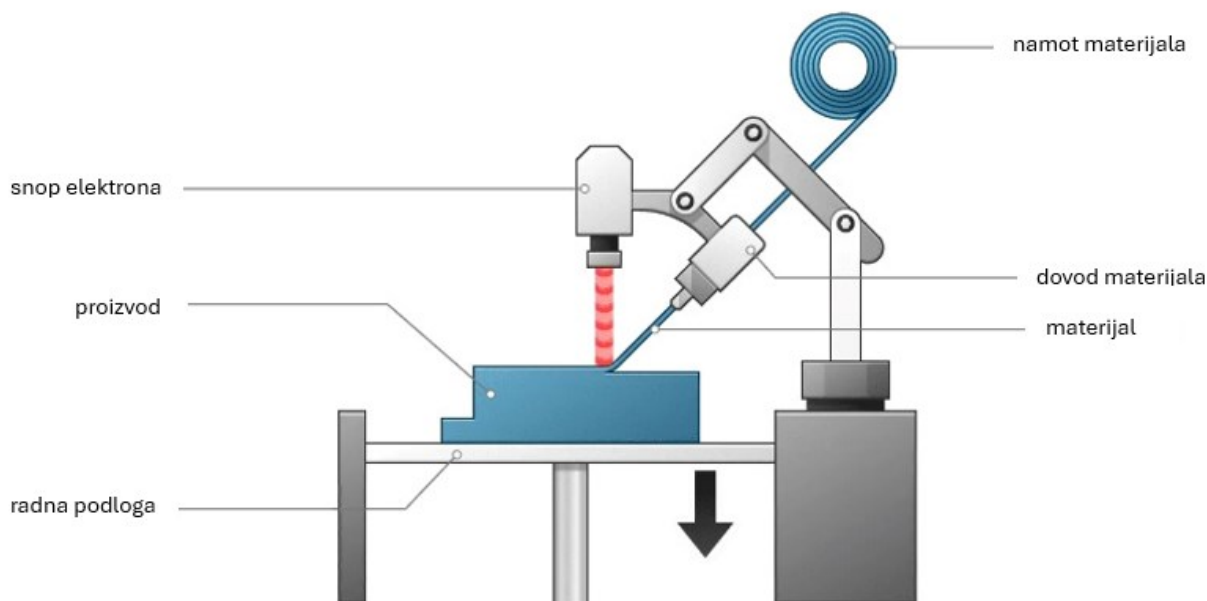
EBM postupkom proizvod nastaje taljenjem sloja metalnog praha snopom elektrona koji se proizvodi pomoću posebne mlaznice učvršćene u komori. Pri sudaru elektrona s metalnim prahom kinetička energija sudara se pretvara u toplinsku energiju, koja lokalno tali metalni prah (slika 4). Materijali koji se koriste za izradu proizvoda EBM postupkom su metali s visokom temperaturom tališta poput titanija, volframa, niobija, nikla, paladija, tantala i iridija. Prednosti EBM-a su: postizanje vrlo dobrih mehaničkih svojstava proizvoda, mogućnost navarivanja istog metala ili kombinaciju različitih metala i visoka brzina izrade proizvoda. Nedostaci su: prisutnost γ – zračenja i mogućnost korištenja samo vodljivih materijala [5].



Slika 4. Taljenje pomoću snopa elektrona [13]

2.3 Izravno energijsko taloženje (DED)

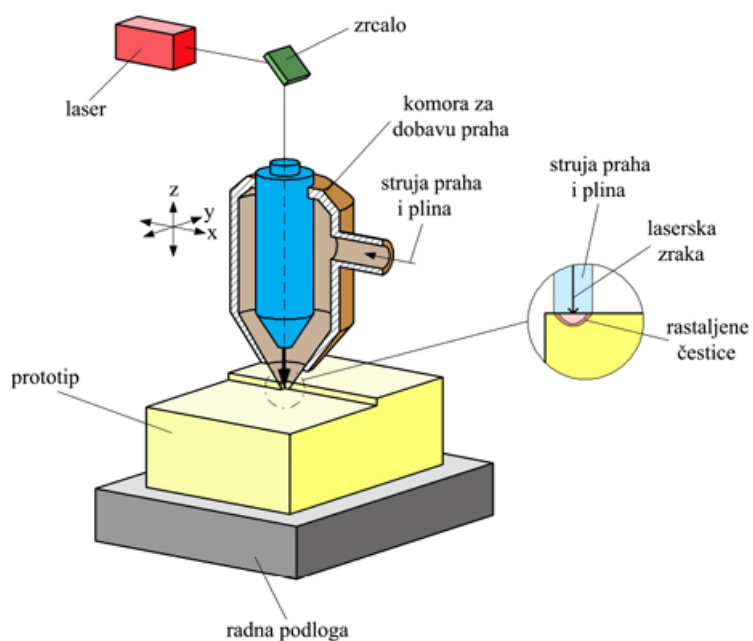
Izravno taloženje energijom (DED) je tehnologija 3D printanja koja koristi izvor energije, kao što je plazmatski luk, laserski ili elektronski snop, za taljenje materijala koji se istovremeno taloži pomoću mlaznice. Materijal u obliku praha ili žice se tali, taloži se na površinu sloj po sloj, te se skrućuje (slika 5). Slojevi su obično debljine 0,25 mm - 0,5 mm. Proces se odvija unutar vakuumske komore, što je posebice važno pri izradi proizvoda od aluminija gdje prisutnost kisika sprječava dobro međusobno povezivanje slojeva. Pri korištenju elektronskog snopa za taljenje materijala proces se izvodi u vakuumu, dok laserski sustavi koriste potpuno inertnu komoru pri radu s reaktivnim metalima. Moguće je koristiti zaštitni plin za sprječavanje kontaminacije dijelova tijekom 3D printanja. DED uređaji obično koriste mlaznicu koja je postavljena na višeosnu ruku koja se može pomicati u više smjerova, omogućujući varijabilno taloženje. DED postupak se koristi za dodavanje materijala na postojeće komponente, izradu novih dijelova ili popravak. Korištenjem praškastog materijala postiže se veća točnost taloženja, a korištenjem žice bolja iskoristivost materijala [5,14].



Slika 5. Izravno energijsko taloženje [15]

2.3.1 Izravno taloženje metala (LENS)

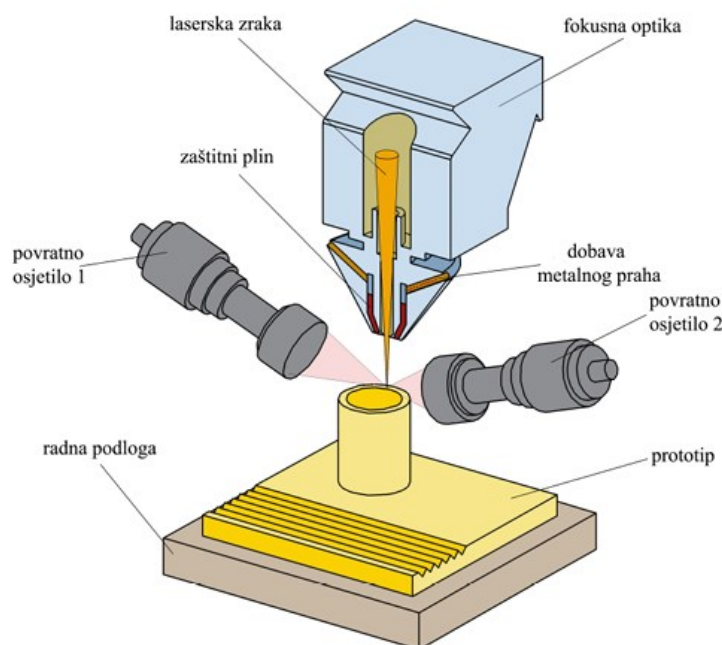
Proces izravnog taloženja metala započinje djelovanjem laserske zrake (Nd:Yag laser) na vrlo usko područje površine, pri čemu nastaje lokalno rastaljeno područje. Pomoću mlaznice se zatim dodaje točno određena količina praškastog materijala, pri čemu nastaje novi sloj metalnog proizvoda (slika 6). Postupak se izvodi u vakuumskoj komori [5].



Slika 6. Izravno taloženje metala [13]

2.3.2 Izravno taloženje metalnog praha (DMD)

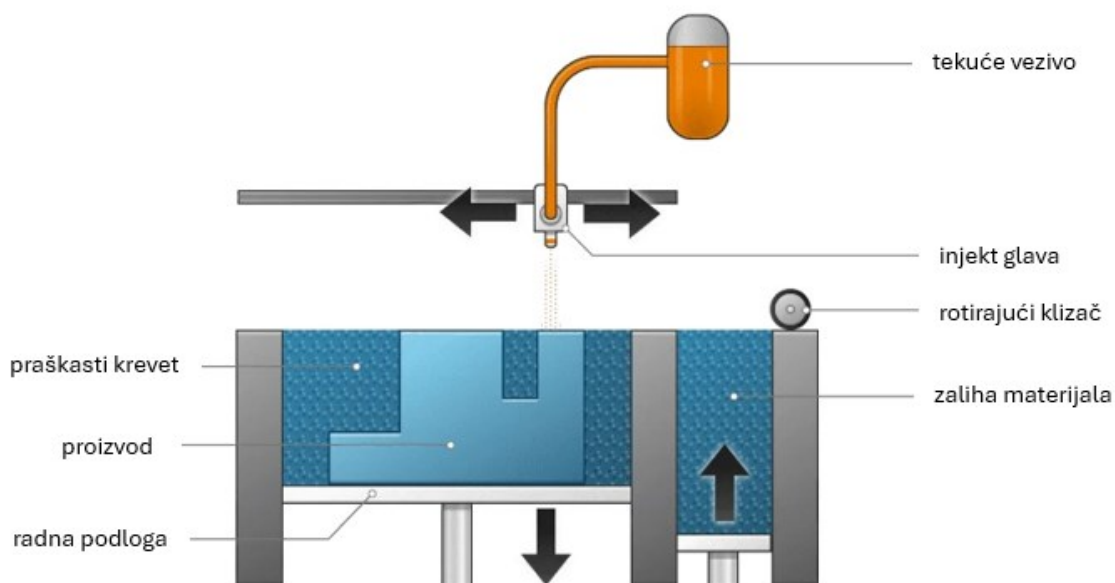
Postupak je sličan LENS postupku, a razlike su u detaljima oko upravljanja i uporabe uređaja za izradu metalnih proizvoda. DMD postupkom moguće je izraditi proizvode od više različitih materijala. Postupak se uglavnom koristi u automobilske industriji i prikazan je prikazan na slici 7 [13].



Slika 7. Izravno taloženje metalnog praha [13]

2.4 Spajanje metalnog praha vezivom (MBJ)

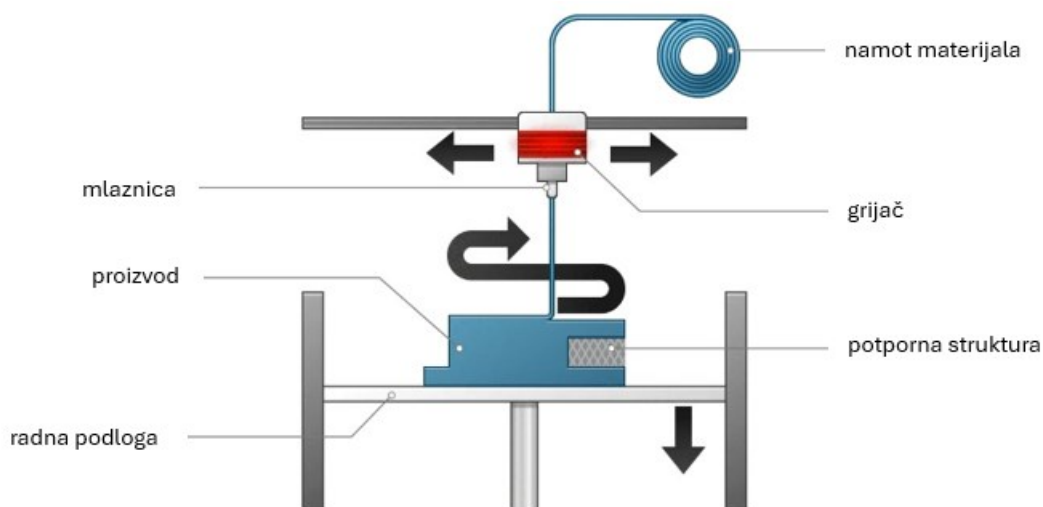
Spajanje metalnog praha vezivom (MBJ) je najbrži aditivni proizvodni postupak koji se sastoji od nanošenja adhezivnog vezivnog sredstva na tanke slojeve praškastog materijala. Tijekom procesa glava printera selektivno nanosi vezivno sredstvo na slojeve praha (slika 8). Nakon što je sloj gotov radna podloga se pomiče prema dolje, a printer nanosi novi spoj praha i vezivnog sredstva. Izrađene dijelove potrebno je podvrgnuti procesu srašćivanja u peći kako bi se uklonilo preostalo organsko vezivo i srasle čestice praha. Povišenje gustoće i poboljšanje mehaničkih svojstava izrađenih dijelova postiže se prodiranjem bronce u pore materijala. Struktura gotovog proizvoda sastoji se od 60% metalnog materijala i 40% bronce. U usporedbi s drugim tehnikama 3D printanja koje tijekom procesa koriste izvor topline, poput LPBF-a, dijelovi izrađeni MBJ tehnikom nemaju toplinskih deformacija [5,16,17].



Slika 8. Spajanje metalnog praha vezivom [16]

2.5 Ekstrudiranje metalnih materijala (MME)

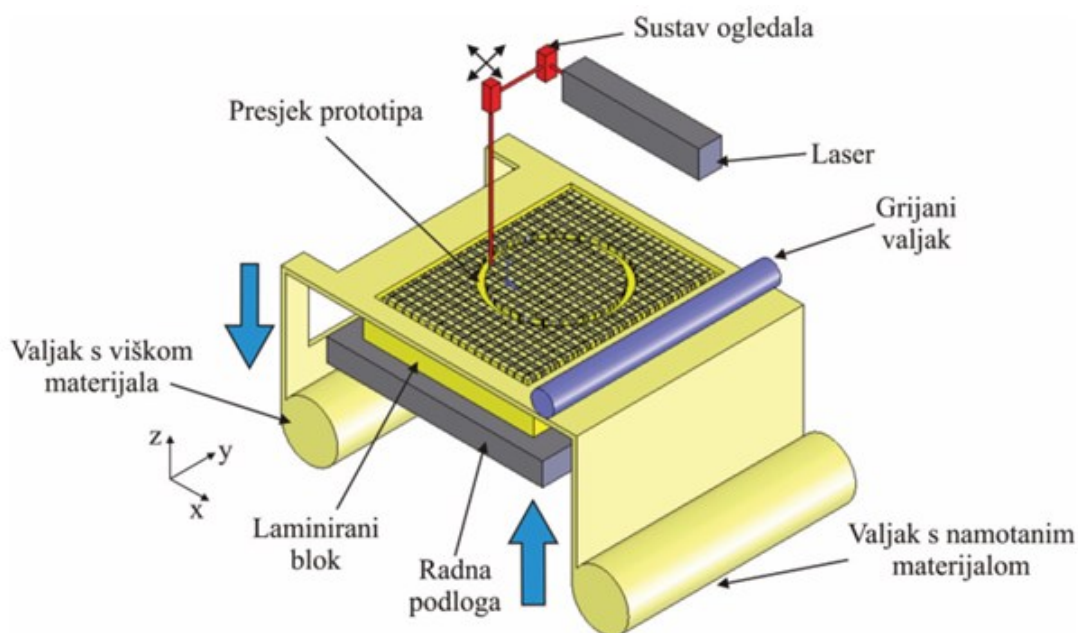
Postupak MME sličan je postupku taložnog očvršćivanja (eng. *Fused deposition modeling – FDM*). MME koristi žicu koja se sastoji od polimernog materijala i čestica metalnog praha. Žica se zagrijava te se mlaznicama nanosi na podlogu i taloži, sloj po sloj (slika 9). Nakon izrade proizvod se stavlja u peć kako bi se metalne čestice sinterirale i uklonio polimerni materijal. Ovaj postupak se najčešće koristi za izradu prototipa zbog kratkog vremena izrade i niskih troškova [18,19].



Slika 9. Ekstruzija metalnih materijala [20]

2.6 Laminiranje (LOM)

Postupak se sastoji od laminiranja i laserskog rezanja metalnih folija ili ploča. Ploče se laminiraju u čvrste blokove povezivanjem slojeva ljepilom, stezanjem i ultrazvučnim zavarivanjem. Primjenjujući toplinu i tlak svaka se ploča spaja na blok i formira novi sloj. Materijal se dobavlja pomoću valjka na jednoj strani stroja i odmotava do druge strane (slika 10). Zagrijani valjak osigurava tlak i temperaturu potrebnu da se novi sloj zalijepi na već izrađeni dio. Radna podloga spušta se za debljinu folije, koja je obično debljine od 0,07 mm do 0,2 mm. Nakon što se sloj (folija) staložio, laserskom zrakom izrezuje se dio materijala u oblik konačnog proizvoda. Obično se primjenjuje CO₂ laser snage 25 W ili 50 W [21].



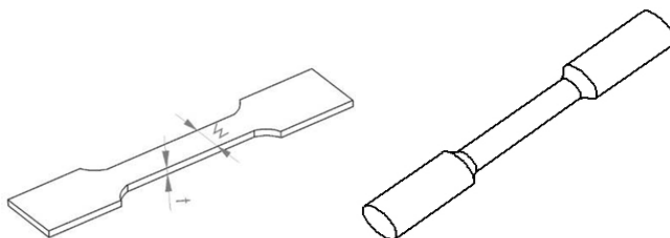
Slika 10. Laminiranje [21]

3. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA

Svojstva materijala proizlaze iz mikrostrukture materijala. Struktura materijala dobiva se obradom materijala određenog kemijskog sastava tehnološkim postupcima. Izborom materijala i odgovarajućeg tehnološkog procesa postiže se željena struktura materijala koja ujedno određuje i svojstva. Zbog nepravilnosti prisutnih kod materijala, koje je nemoguće obuhvatiti proračunom, mehanička svojstva mogu se utvrditi isključivo eksperimentalnim putem. Ispitivanja mehaničkih svojstava materijala provode se na posebno pripremljenim uzorcima koji se nazivaju „epruvete“ ili „ispitni uzorci“, a mogu se provoditi i na gotovim strojnim dijelovima ili sklopovima. Tijekom ispitivanja imitiraju se uvjeti u kakvima će materijal biti izložen tijekom eksploatacije. Mehanička svojstva materijala poput granice tečenja (R_e , N/mm²), vlačne čvrstoće (R_m , N/mm²) i modula elastičnosti (E , N/mm²), ključni su parametri za razumijevanje plastične deformacije materijala tijekom proizvodnje i određivanje opterećenja koje materijal može podnijeti u radnim uvjetima. Najčešća metoda koja se koristi za određivanje mehaničkih svojstava materijala je statičko vlačno ispitivanje [1,22].

3.1 Statičko vlačno ispitivanje

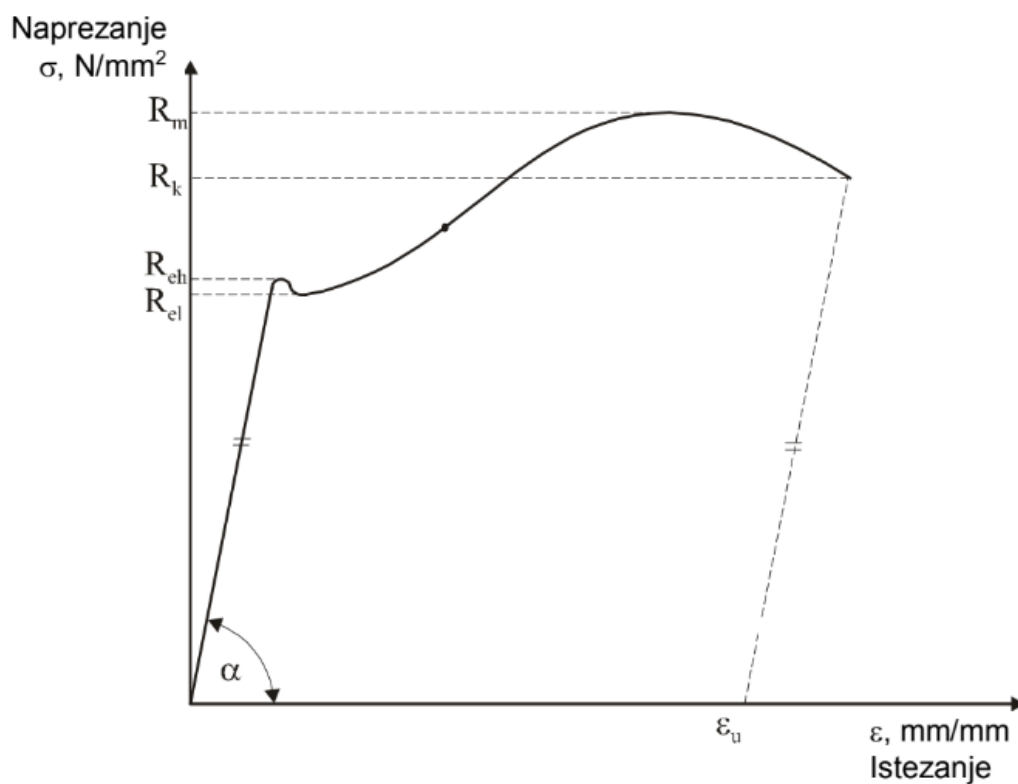
Statičko vlačno ispitivanje je najčešće primjenjivani postupak ispitivanja kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstava. Ispitivanje se provodi na ispitnim uzorcima okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka (slika 11). Ispitni uzorak opterećuje se vlačnim naprežanjem pri čemu prirast sile u jedinici vremena mora biti takav da prirast naprežanja bude ≤ 10 N/mm² u sekundi. Za takvo opterećenje najprikladniji je hidraulični pogon kidalice koji omogućuje rasterećenje ispitnog uzorka u svakom trenutku.



Slika 11. Epruvete četvrtastog i okruglog poprečnog presjeka [1]

Budući da svako naprežanje izaziva deformaciju tijela tako se i pri statičkom vlačnom ispitivanju epruveta deformira tj. produljuje, pa se tijekom ispitivanja pored vrijednosti sile

prati i produljenje epruvete. Na pisaču kidalice ili na monitoru računala za vrijeme ispitivanja crta se dijagram sila – produljenje ($F - l$), koji se naziva i dijagramom kidanja. Vrijednosti sile pri statičkom vlačnom ispitivanju ne daju pravi uvid u ponašanje materijala ukoliko se ne uzme u obzir površina poprečnog presjeka epruvete S_0 . Stoga se uvodi pojam naprezanja (σ) tj. sile po jedinici površine. Svede li se i vrijednost produljenja ΔL na početnu mjernu duljinu epruvete L_0 dobiva se vrijednost istežanja ili relativnog produljenja (ε). Na taj način se iz dijagrama sila-produljenje dobiva „inženjerski“ ili „konvencionalni“ dijagram naprezanje – istežanje (σ - ε) (slika 12).



Slika 12. Dijagram naprezanje-istežanje (σ - ε) [23]

Dijagram počinje iz ishodišta Hookeovim pravcem za koji vrijedi Hookeov zakon (1):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \text{ N/mm}^2. \quad (1)$$

Modul elastičnosti E je elastična konstanta materijala koja ovisi o jakosti veze između atoma u kristalnoj rešetki ili amorfnoj strukturi. Svako naprezanje u području gdje vrijedi Hookeov zakon izaziva samo elastičnu deformaciju. Hookeov pravac ograničen je granicom razvlačenja R_e . Granica razvlačenja R_e je ono naprezanje kod kojeg materijal počinje teći bez povećanja naprezanja, a definirana je omjerom sile tečenja F_e i površine poprečnog presjeka epruvete S_0 (2):

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \text{ N/mm}^2. \quad (2)$$

Granica razvlačenja predstavlja ono naprezanje prema kojem se uz određeni stupanj sigurnosti utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu strojnih dijelova. Naprezanja veća od granice razvlačenja R_e izazivaju pored elastične i plastičnu (trajnu) deformaciju epruvete.

Naprezanje pri maksimalnoj sili naziva se vlačna ili rastezna čvrstoća R_m i jednako je omjeru maksimalne sile F_m i površine poprečnog presjeka epruvete S_0 (3):

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ N/mm}^2. \quad (3)$$

Vlačna čvrstoća predstavlja osnovno mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti. Nakon dostignutog naprezanja R_m deformacija epruvete više nije jednolika po čitavoj duljini već se lokalizira na jednom mjestu, tj. nastaje vrat na epruveti.

Naprezanje pri kojem dolazi do loma epruvete zove se konačno naprezanje R_k i jednako je omjeru konačne sile F_k i površine poprečnog presjeka epruvete S_0 (4):

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \text{ N/mm}^2. \quad (4)$$

Statičkim vlačnim ispitivanjem utvrđuje se i konačno relativno produljenje ε_u koje je jednako omjeru ukupnog produljenja epruvete i početne mjerne duljine (5):

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0}, \text{ mm/mm.} \quad (5)$$

Istezljivost A definirana je izrazom (6):

$$A = \varepsilon_u \cdot 100, \%. \quad (6)$$

Kako se epruveta tijekom statičkog vlačnog ispitivanja istovremeno produljuje i sužava, veličina koja karakterizira deformabilnost materijala u smjeru poprečnom na djelovanje opterećenja naziva se kontrakcija Z . Kontrakcija predstavlja relativno suženje poprečnog presjeka epruvete (S_0-S_u) u odnosu na početnu površinu početnog presjeka S_0 (7) [22,23]:

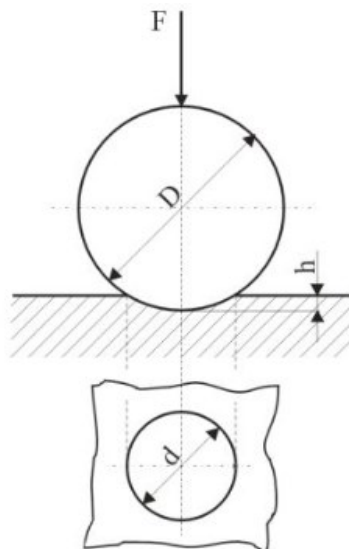
$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100, \%. \quad (7)$$

3.2 Tvrdoća

Tvrdoća predstavlja otpornost na lokalnu plastičnu deformaciju izazvanu prodiranjem penetranta koji je veće tvrdoće od ispitivanog materijala. Otpornost na prodiranje također ukazuje i na otpornost materijala na trošenje. Iako tvrdoća ne predstavlja fizikalno egzaktno definirano mehaničko svojstvo, mjerenje tvrdoće je jedan od najraširenijih postupaka na području ispitivanja mehaničkih svojstava zbog korelacije sa drugim mehaničkim svojstvima (npr. R_m) te jednostavnosti i brzine ispitivanja. U ovisnosti o primijenjenom opterećenju razlikujemo mikro i makrotvrdoću. Kod makrotvrdoće primijenjeno opterećenje je veće od 10N dok se kod mikrotvrdoće primjenjuje opterećenje manje od 10N i uzorci su veoma tanki (do 0,00125 mm). Tri glavne metode mjerenja tvrdoće su metoda po Brinellu, metoda po Vickersu i metoda po Rockwellu [1,22].

3.2.1 Brinellova metoda

Kod metode po Brinellu u metal se utiskuje kuglica od kaljenog čelika koja može biti promjera 1-10 mm (1, 2, 2.5, 5, i 10 mm). Kuglica se utiskuje određenom silom te u materijalu ostavlja otisak u obliku kalote (slika 13). Tvrdoća se određuje na temelju veličine otiska.



Slika 13. Brinellova metoda [24]

Tvrdoća po Brinellu je po definiciji (8):

$$HB = \frac{F}{S_1} \quad (8)$$

gdje su:

F – sila opterećivanja, N

S_1 – površina kalote kugle, mm^2 .

Pomoću mjernog povećala mjeri se promjer baze kugline kalote (d) te se tvrdoća određuje pomoću izraza (9):

$$HB = \frac{0.204 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (9)$$

gdje je:

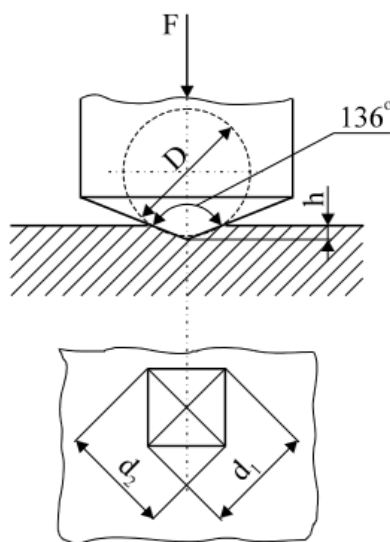
F – sila, N

D – promjer kuglice, mm

d – promjer baze kugline kalote (otiska), mm [22].

3.2.2 Vickersova metoda

Vickersova metoda omogućuje mjerenje tvrdoće najtvrdih materijala, a tvrdoća nije ovisna o primijenjenoj sili. Penetrator je četverostrana piramida s kutem između stranica od 136° , izrađen od dijamanta. Izborom kuta između stranica penetratora od 136° dobivaju se vrijednosti tvrdoće neovisne o primijenjenoj sili. Utiskivanjem penetratora u materijalu ostaje otisak u obliku piramide (slika 14).



Slika 14. Vickersova metoda [22]

Tvrdoća po Vickersu je po definiciji (10):

$$HV = \frac{F}{S_2} \quad (10)$$

gdje je:

F – primijenjena sila, N

S_2 – površina šuplje piramide otisnute u materijalu, mm^2 .

Pomoću mjernog mikroskopa mjere se dijagonale (d_1 , d_2) baze piramide otisnute u materijalu, a tvrdoća se određuje prema izrazu (11):

$$HV = \frac{F \cdot 0,189}{d_3^2} \quad (11)$$

gdje je:

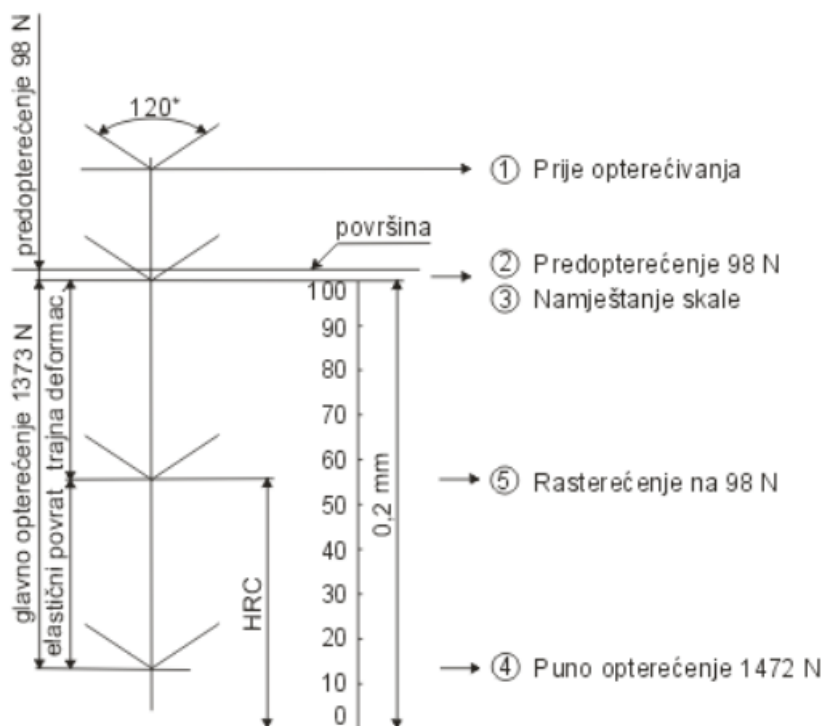
F – primijenjena sila, N

d_3 – srednja vrijednost dijagonala baze piramide, mm

Primijenjena sila (F) varira od 49 – 981 N. Za mjerenje tvrdoće Viskersovom metodom potrebno je fino brušenje i poliranje ispitnog uzorka [22].

3.2.3 Rockwellova metoda

Rockwellovom metodom mjeri se samo tvrdoća metalnih materijala. Tvrdoća se mjeri utiskivanjem dijamantnog stošca (*eng. cone* – HRC metoda) s vršnim kutom od 120° ili kuglica od kaljenog čelika (*eng. ball* – HRB metoda). Kod ove metode mjeri se dubina prodiranja penetratora (slika 15).



Slika 15. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće HRC metodom [24]

U položaju 1 penetrator se predopterećuje silom $F = 98 \text{ N}$ te prodire ispod površine ispitnog uzorka. Ukupna moguća dubina prodiranja iznosi $0,2 \text{ mm}$ i podijeljena je na 100 dijelova pri čemu svaka podjela predstavlja jedan stupanj tvrdoće po HRC metodi. Nakon predopterećenja slijedi glavno opterećenje silom $F = 1373 \text{ N}$, pa je penetrator opterećen ukupnom silom iznosa $F = 1472 \text{ N}$. Zatim slijedi rasterećenje glavnog opterećenja, a penetrator se uslijed elastičnog povrata materijala vraća u položaj 3. Ta dubina predstavlja tvrdoću, tj. u tom položaju se očitava tvrdoća na skali tvrdomjera. HRC metodom uglavnom se mjeri tvrdoća toplinski obrađenih čelika [22].

3.3 Povezanost tvrdoće i vlačne čvrstoće

Odnos između tvrdoće HV i vlačne čvrstoće R_m može se prikazati jednadžbom (12):

$$R_m = C \cdot HV, \quad (12)$$

gdje je :

C – konstanta koja za čelike iznosi 3 [25].

Daljnjim ispitivanjima dobivena je jednadžba (13):

$$R_m = \left(\frac{HV}{C}\right) \cdot (1 - n) \left(\frac{12,5 n}{1-n}\right)^n, \quad (13)$$

gdje je :

n – koeficijent deformacijskog očvrnuća, koji se utvrđuje provođenjem Meyerovog testa tvrdoće.

Jednadžba (13) je dalje proširena i glasi (14) :

$$R_m = \left(\frac{HV}{C}\right) \cdot \left(\frac{n}{0.217}\right)^n. \quad (14)$$

S obzirom da je potrebno određivanje koeficijenta deformacijskog očvrnuća n kako bi se procijenila vlačna čvrstoća na temelju tvrdoće materijala, istraživanja su bila usmjerena prema pronalasku odnosa koji ne zahtjeva dodatna ispitivanja poput Meyerovog testa tvrdoće.

Utvrđena je linearna povezanost tvrdoće i vlačne čvrstoće prikazana jednadžbom (15):

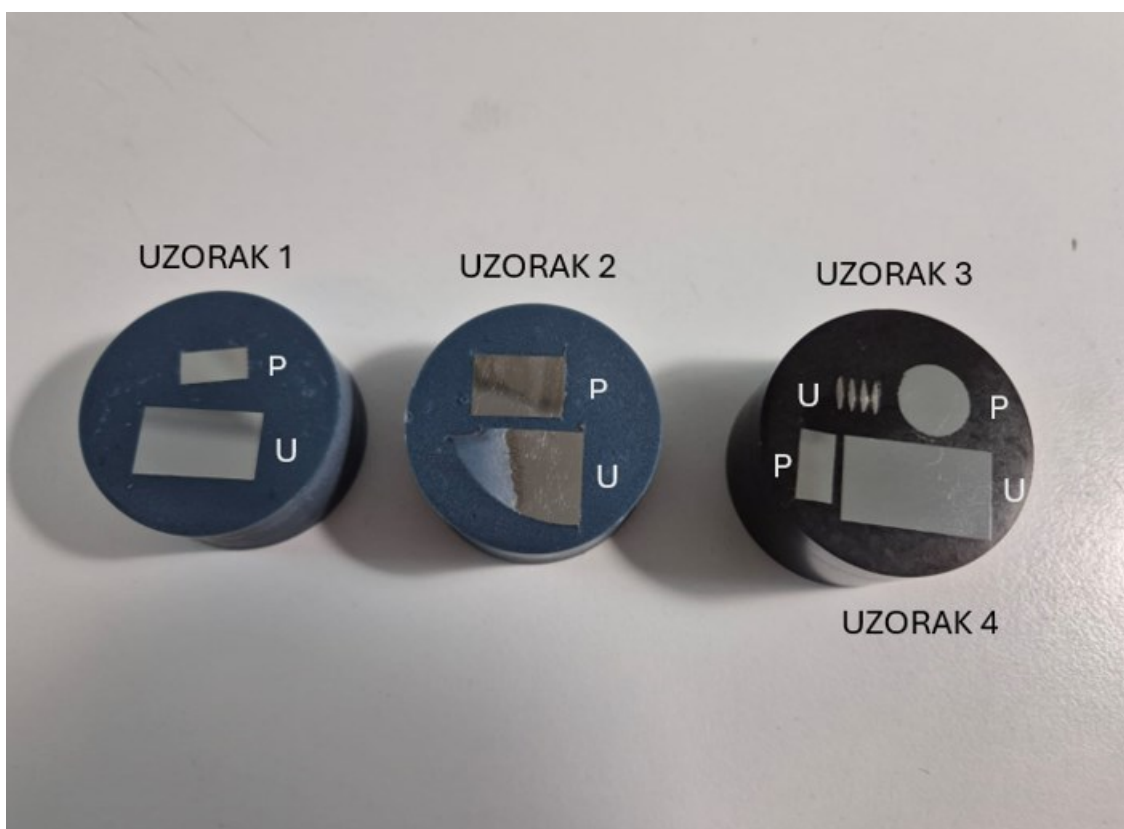
$$R_m = -99,8 + 3,734 \cdot HV, \quad (15)$$

sa standardnom pogreškom od 112 MPa i koeficijentom korelacije $r^2 = 0,9347$.

Korištenjem linearne korelacije tvrdoće i vlačne čvrstoće moguće je mjerenjem tvrdoće materijala procijeniti njegovu vlačnu čvrstoću, što je veoma korisno zbog jednostavnosti i brzine postupka mjerenja tvrdoće [1,26].

4. EKSPERIMENTALNI DIO – ODREĐIVANJE EMPIRIJSKE POVEZANOSTI TVRDOĆE I VLAČNE ČVRSTOĆE 3D PRINTANIH METALA

U eksperimentalnom dijelu ovog završnog rada određena je empirijska povezanost tvrdoće i vlačne čvrstoće DMLS proizvedenih metala. Provedeno je mjerenje tvrdoće HV1 na 4 vrste DMLS proizvedenih metala: nehrđajući čelik 316L, Ti-legura, maraging čelik MS1 i Al-legura. Ispitni uzorci su prikazani na slici 16.



Slika 16. Ispitni uzorci

Uzorak 1 je aluminijeva legura $AlSi_{10}Mg$, uzorak 2 je titanijeva legura Ti_6Al_4V , uzorak 3 je nehrđajući čelik 316L, a uzorak 4 je maraging čelik $X3NiCoMoTi\ 18-9-5$.

4.1 Priprema uzoraka

Ispitni uzorci izrađeni su DMLS tehnologijom na 3D printeru *EOS M290* (slika 19). Karakteristike printera prikazane su u tablici 2. Izvršena je standardna priprema uzoraka koja se sastoji od rezanja, ulijevanja, brušenja i poliranja. Mehanička svojstva DMLS proizvedenih metala ispituju se u horizontalnom (x-y ravnina tiskanja) i vertikalnom (z ravnina tiskanja) smjeru uzorka te su ispitni uzorci izrezani u horizontalnom (oznaka P) i vertikalnom smjeru (oznaka U). Uzorci su izrezani na mehaničkoj rezalici *Mecatome T260* (slika 17), korištena je brzina od 3000 okretaja u minuti i hlađenje vodom. Postupci brušenja i poliranja su provedeni na uređaju *Mecatech 250 SPI* (slika 18). Za brušenje su korišteni brusni papiri različite granulacije: P320, P600, P1200, P2400, P4000. Brzina okretanja brusne ploče je bila 300 okretaja u minuti i tijekom brušenja je kontinuirano tekla voda koja je služila kao medij odvodnje nastalih nečistoća. Tijekom poliranja brzina okretanja iznosila je 150 okretaja u minuti i koristio se lubrikant za poliranje.



Slika 17. Uređaj za rezanje *Mecatome T260* [27]



Slika 18. Uređaj za brušenje i poliranje *Mecatech 250 SPI* [28]



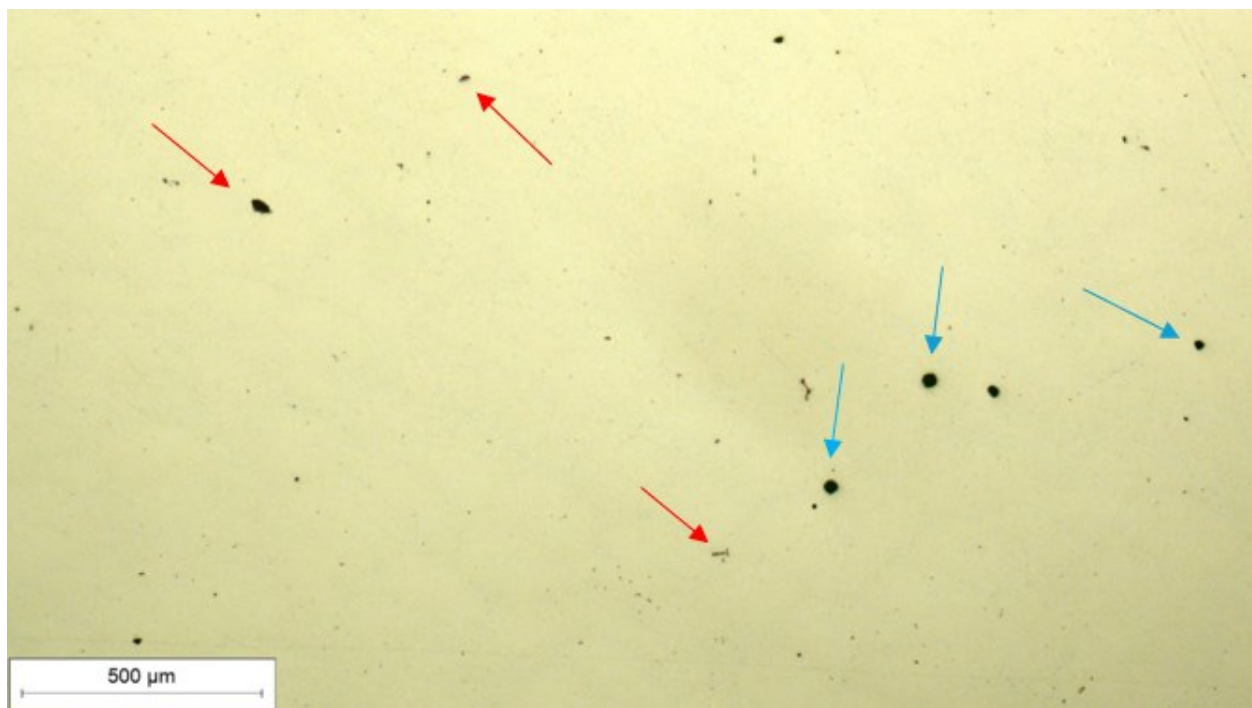
Slika 19. 3D printer *EOS M290* [29]

Tablica 2. Karakteristike uređaja *EOS M290* [30]

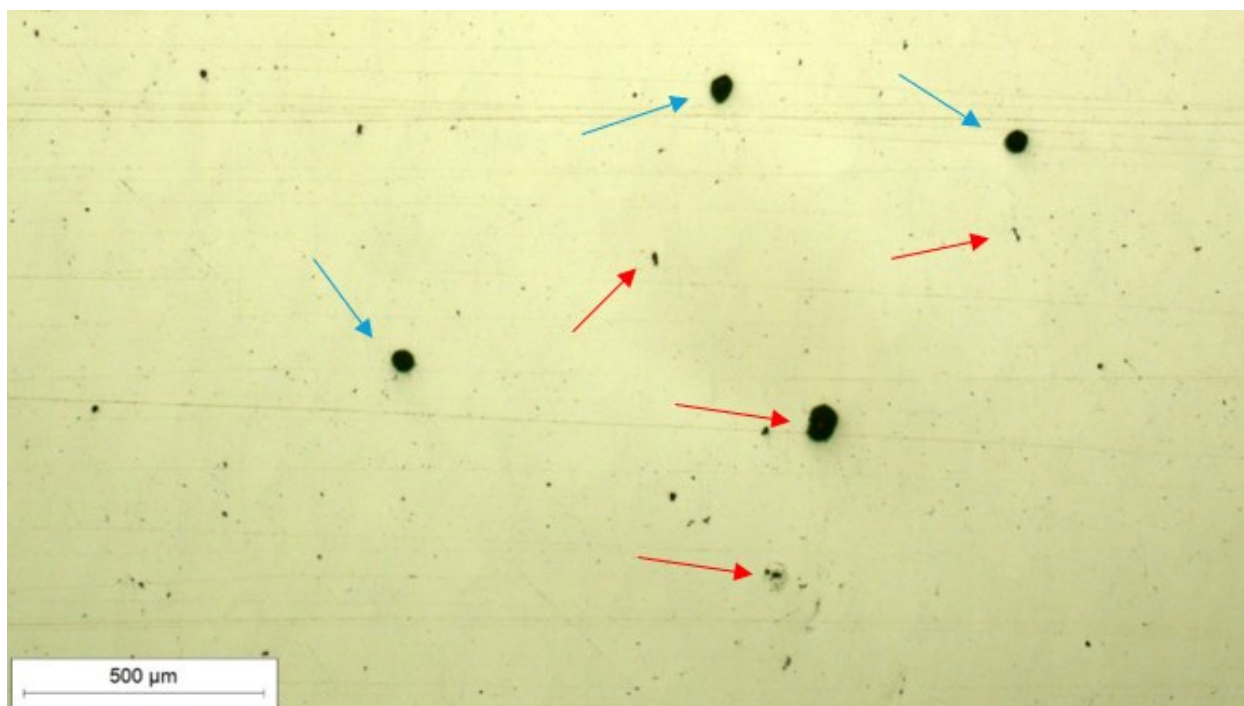
Radni volumen (Š x D x V)	250 mm x 250 mm x 325 mm
Vrsta lasera	Yb fibre laser 400W
Brzina laserske zrake	7 m/s
Promjer fokusa	100 μm

4.2 Analiza uzoraka

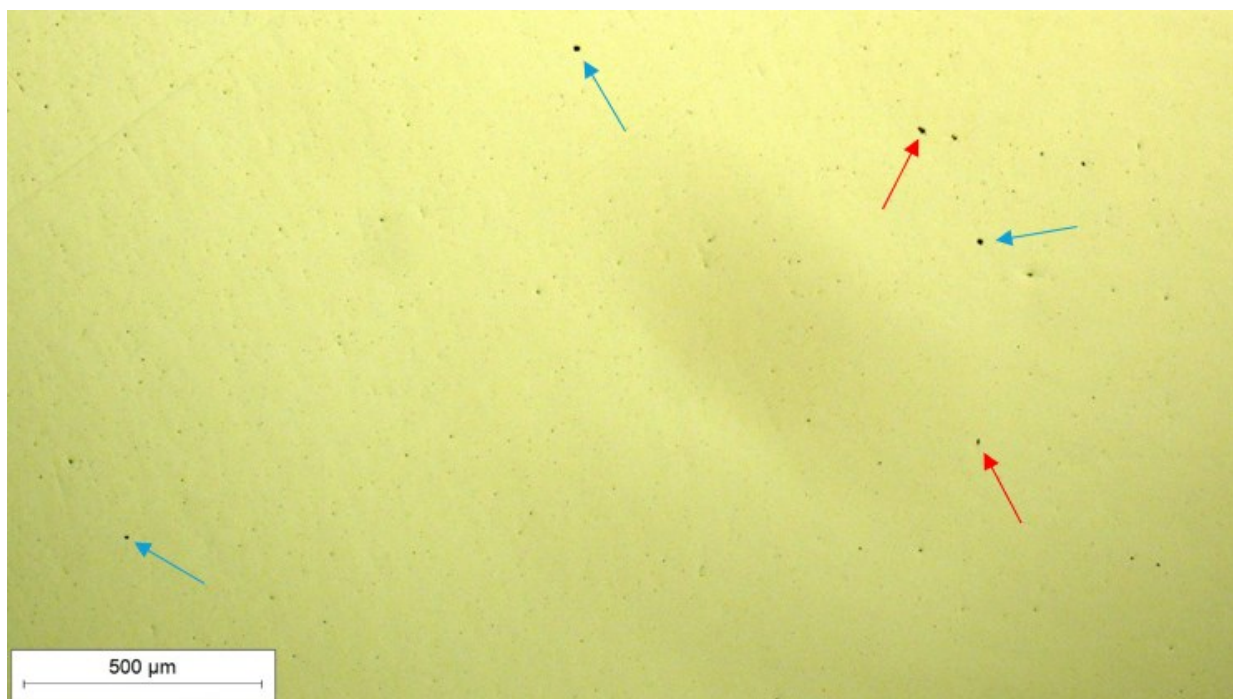
Mikrostruktura je analizirana na svjetlosnom mikroskopu *OLYMPUS GX51-F5* u poliranom stanju u uzdužnom i poprečnom presjeku uzoraka, prikazano na slikama 20 - 27.



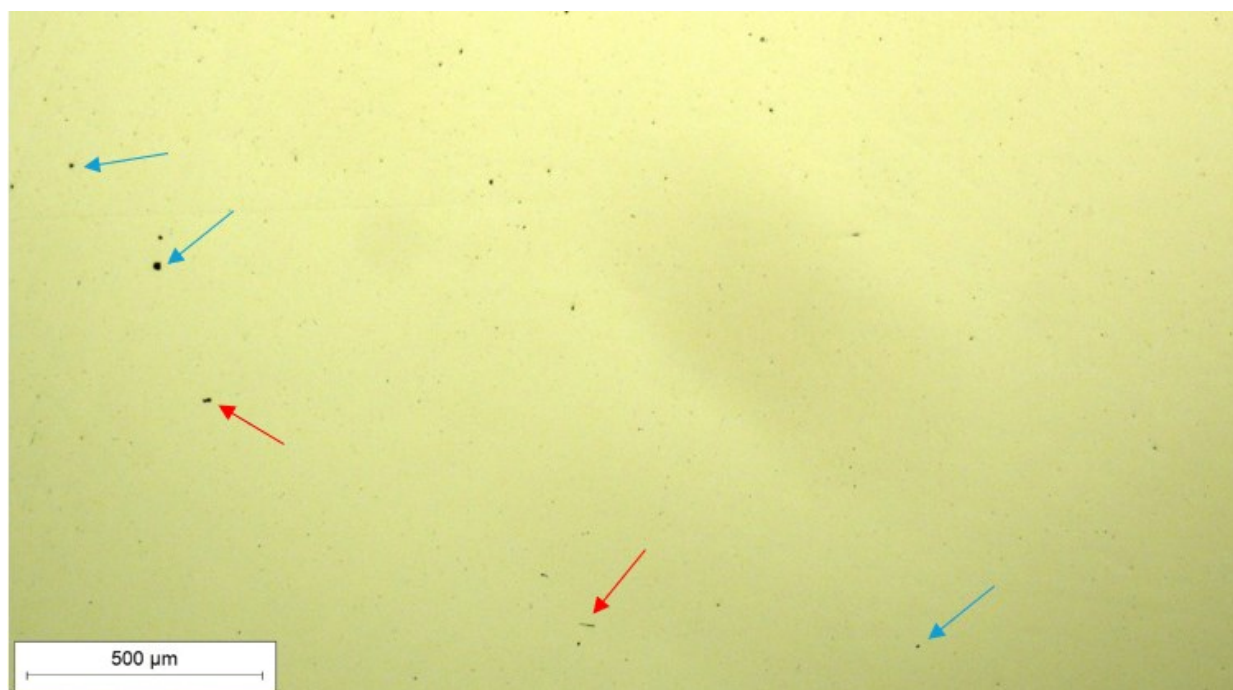
Slika 20. Uzorak 1 uzdužno, polirano stanje.



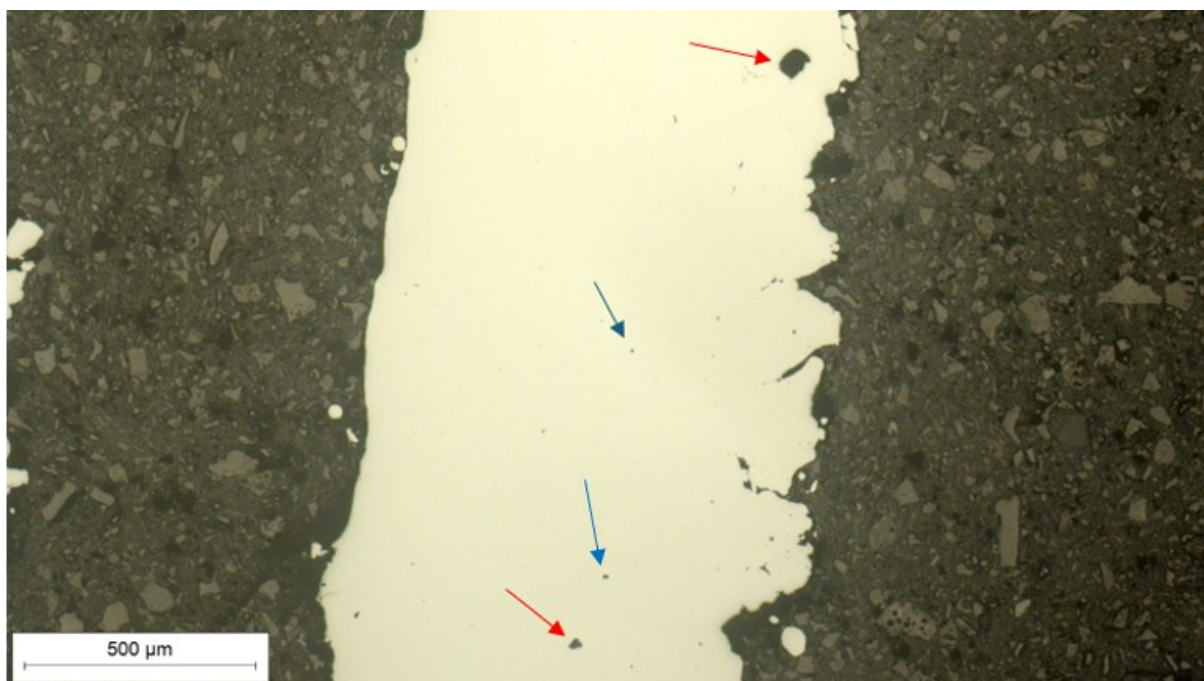
Slika 21. Uzorak 1 poprečno, polirano stanje



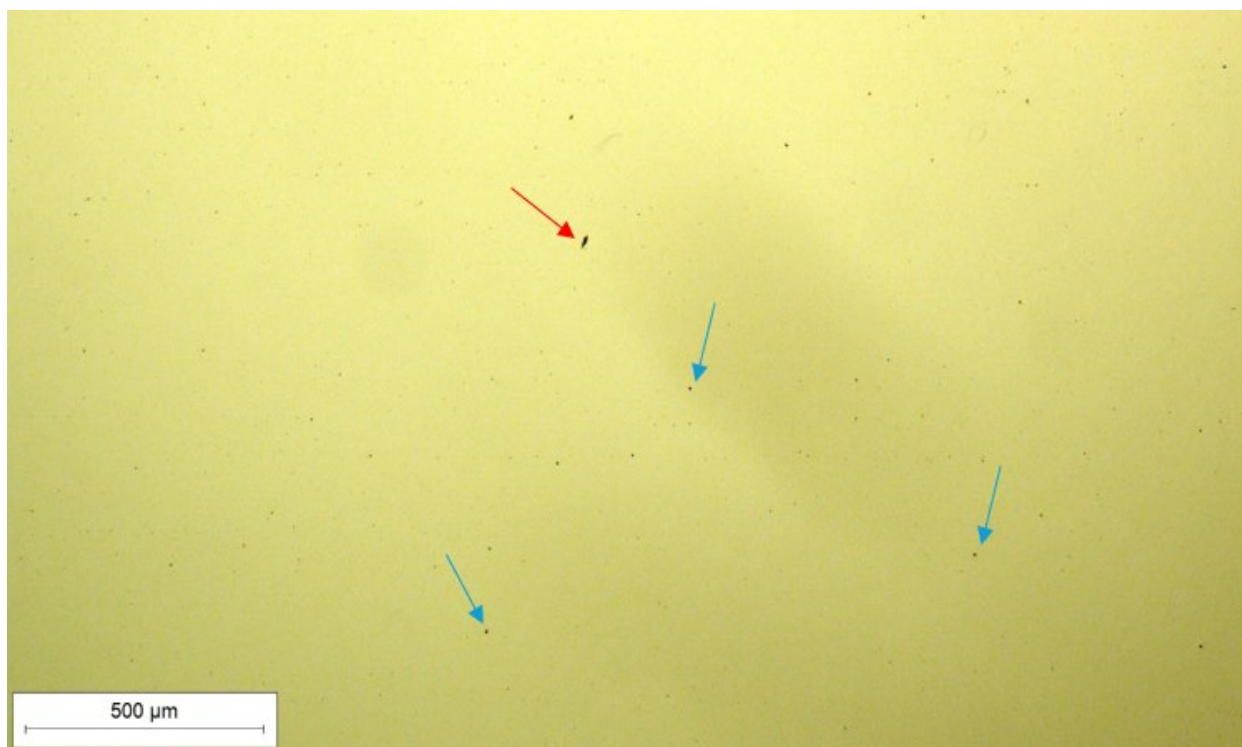
Slika 22. Uzorak 2 uzdužno, polirano stanje



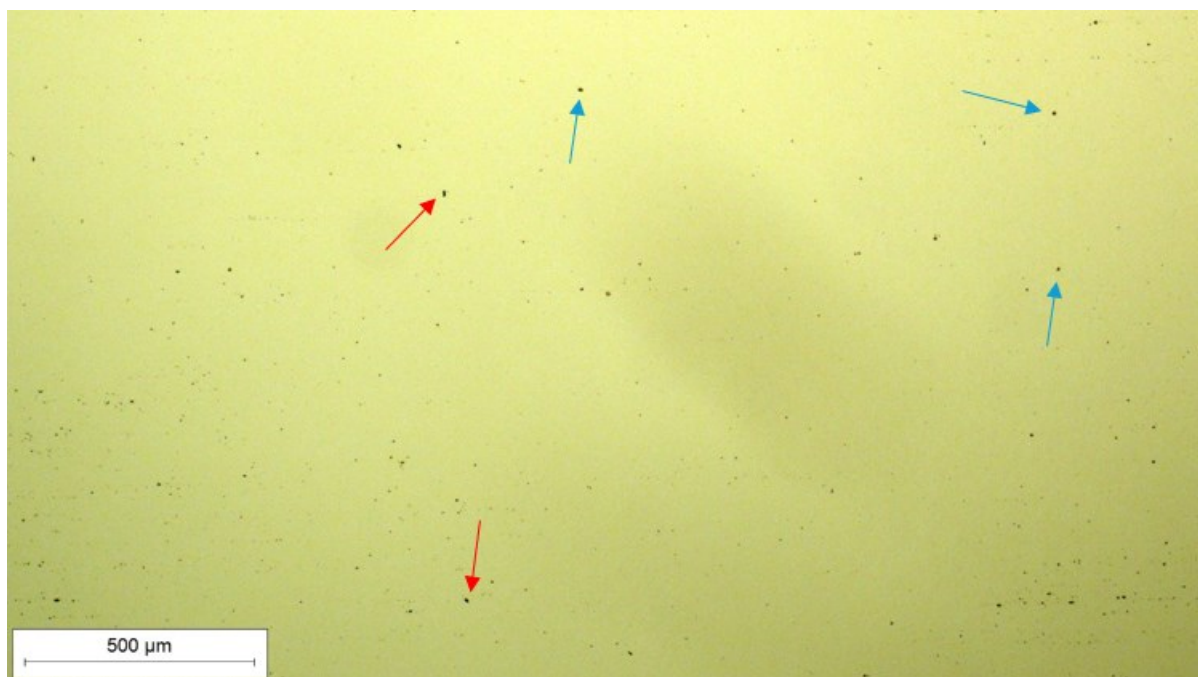
Slika 23. Uzorak 2 poprečno, polirano stanje.



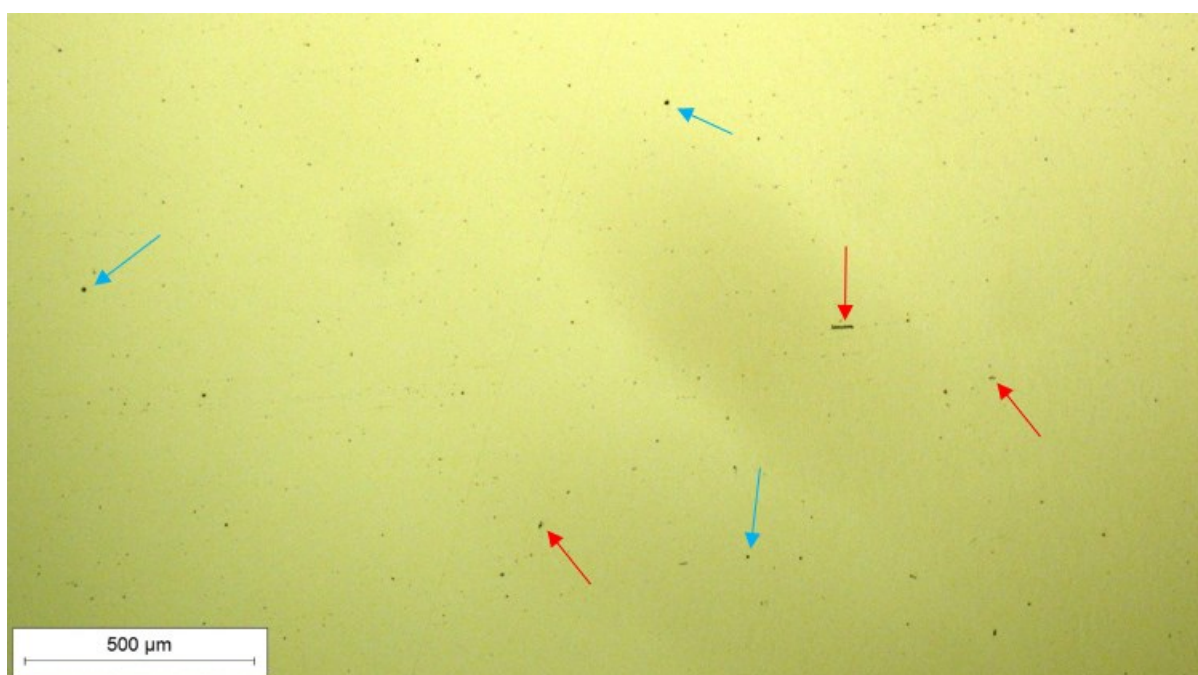
Slika 24. Uzorak 3 uzdužno, polirano stanje.



Slika 25. Uzorak 3 poprečno, polirano stanje.



Slika 26. Uzorak 4 uzdužno, polirano stanje.



Slika 27. Uzorak 4 poprečno, polirano stanje.

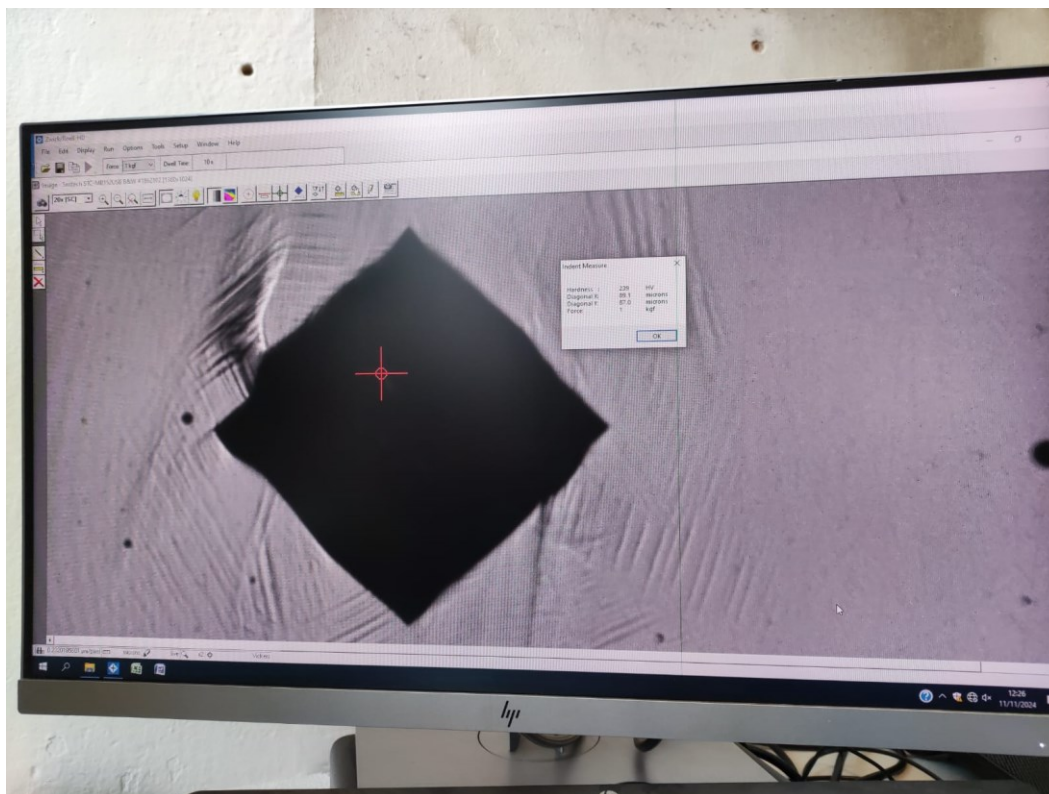
Analizom mikrostrukture u poliranom stanju uočena je pojava poroziteta i nečistoća pravilnog (plavo) i nepravilnog oblika (crveno) na svim uzorcima.

4.3 Mjerenje tvrdoće

Tvrdoća je mjerena na tvrdomjeru ZwickRoell (slika 28) metodom HV1. Primijenjena sila utiskivanja iznosila je 10 N. Na svakom uzorku provedeno je po 10 mjerenja. Izmjerene vrijednosti tvrdoće očitane su iz programa za obradu podataka (slika 29).



Slika 28. ZwickRoell tvrdomjer



Slika 29. Program za obradu podataka

U tablici 3 prikazane su vrijednosti tvrdoće za uzorak 1 u poprečnom i uzdužnom smjeru.

Tablica 3. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 1.

Mjerenje	Tvrdoća HV1	
	Poprečno	Uzdužno
1.	117	108
2.	118	117
3.	115	113
4.	119	114
5.	117	110
6.	119	108
7.	117	111
8.	116	114
9.	117	111
10.	120	102
Srednja vrijednost	114	
Standardna devijacija	5	

U tablici 4 i tablici 5 prikazane su vrijednosti tvrdoće za uzorke 2 i 3 u poprečnom i uzdužnom smjeru.

Tablica 4. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 2.

Mjerenje	Tvrdoća HV1	
	Poprečno	Uzdužno
1.	351	381
2.	360	371
3.	368	377
4.	332	378
5.	345	369
6.	357	373
7.	346	366
8.	323	367
9.	324	371
10.	359	379
Srednja vrijednost	360	
Standardna devijacija	17	

Tablica 5. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 3.

Mjerenje	Tvrdoća HV1	
	Poprečno	Uzdužno
1.	229	225
2.	230	227
3.	225	226
4.	223	228
5.	228	226
6.	232	232
7.	232	230
8.	234	231
9.	231	232
10.	231	230
Srednja vrijednost	229	
Standardna devijacija	3	

U tablici 6 prikazane su vrijednosti tvrdoće za uzorak 4 u poprečnom i uzdužnom smjeru.

Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće za uzorak 4.

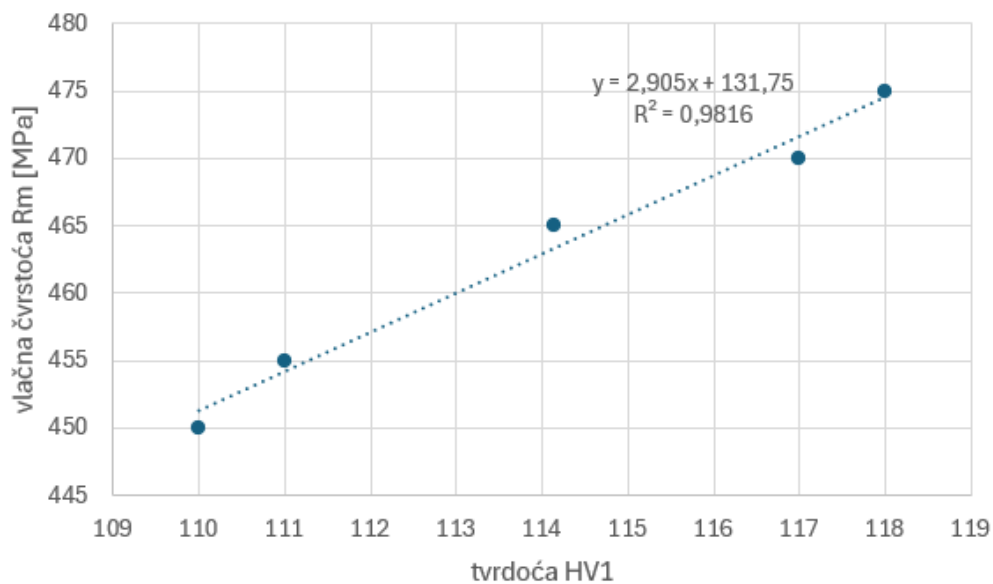
Mjerenje	Tvrdoća HV1	
	Poprečno	Uzdužno
1.	401	349
2.	405	354
3.	404	365
4.	399	363
5.	401	358
6.	403	374
7.	408	473
8.	399	353
9.	387	372
10.	387	361
Srednja vrijednost	381	
Standardna devijacija	20	

4.4 Regresijska analiza

Na temelju podataka o izmjerenoj tvrdoći i vlačnoj čvrstoći iz tehničkog lista proizvođača metalnog materijala (tablica 7) provedena je regresijska analiza. Dobiveni rezultati prikazani su grafički na slikama 30, 31, 32 i 33.

Tablica 7. Vrijednosti vlačne čvrstoće R_m

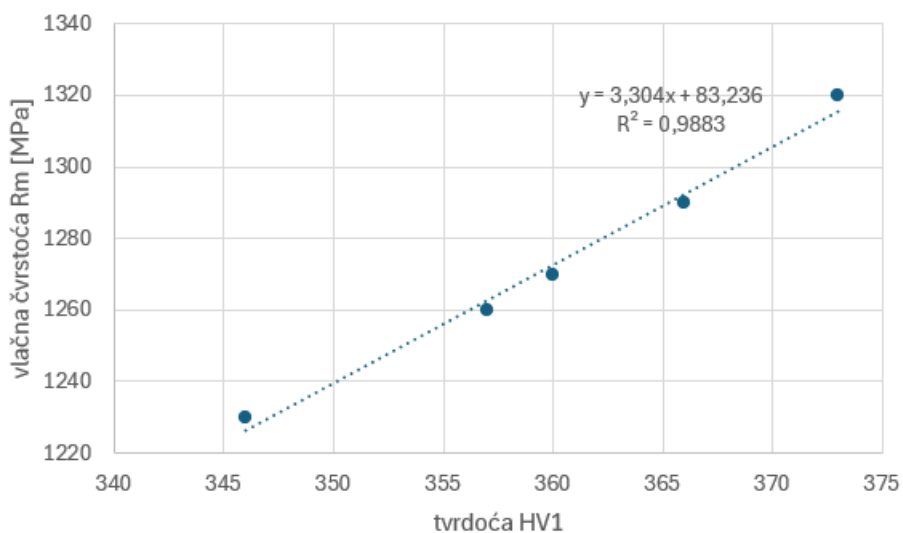
Materijal	Vlačna čvrstoća R_m (N/mm ²)
Aluminijeva legura AlSi ₁₀ Mg	460 ± 20
Titanijeva legura Ti6Al4V	1290 ± 50
Nehrđajući čelik 316L	590 ± 30
Maraging čelik X3NiCoMoTi 18-9-5	1200 ± 100



Slika 30. Grafički prikaz regresijske analize za uzorak 1.

Jednadžba povezanosti tvrdoće i vlačne čvrstoće za aluminij (16):

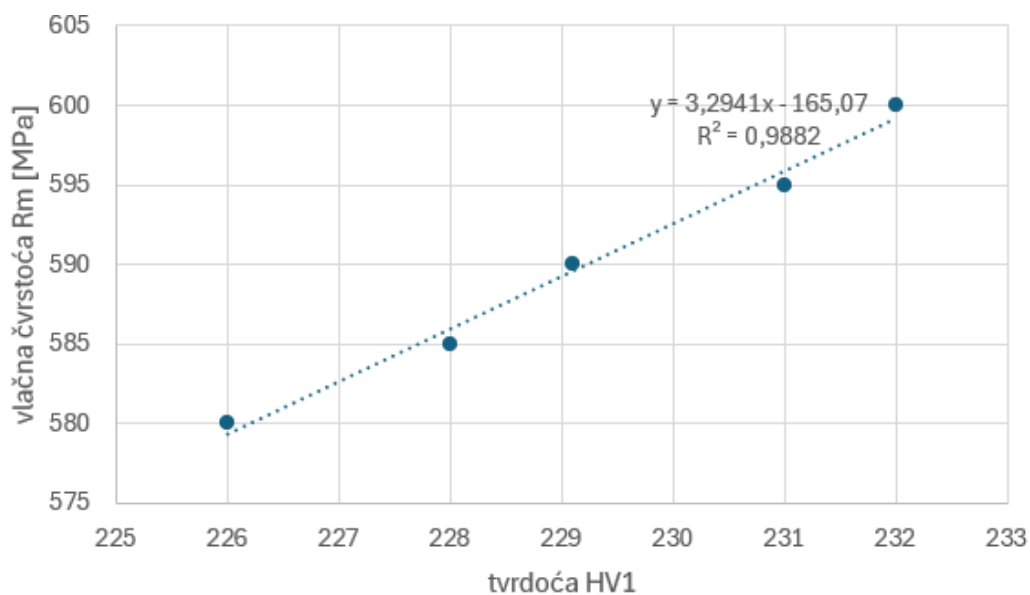
$$R_m = 2,905 \text{ HV} + 131,75. \quad (16)$$



Slika 31. Grafički prikaz regresijske analize za uzorak 2.

Jednadžba povezanosti tvrdoće i vlačne čvrstoće za titanij (17):

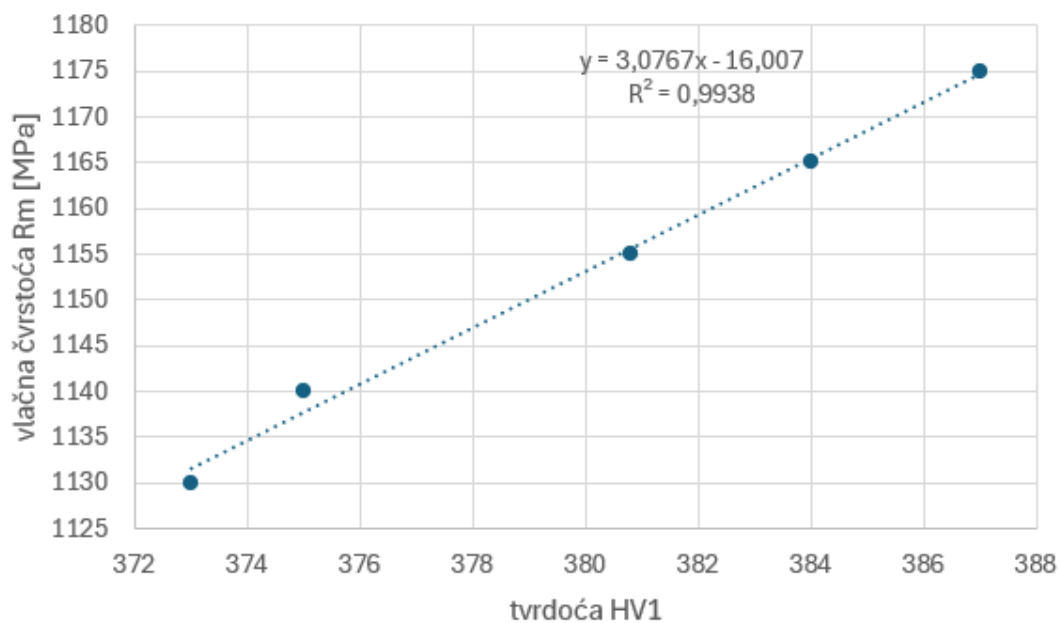
$$R_m = 3,304 \text{ HV} + 83,236. \quad (17)$$



Slika 32. Grafički prikaz regresijske analize za uzorak 3.

Jednadžba povezanosti tvrdoće i vlačne čvrstoće za čelik 316L (18):

$$R_m = 3,2941 \text{ HV} - 165,07. \quad (18)$$



Slika 33. Grafički prikaz regresijske analize za uzorak 4.

Jednadžba povezanosti tvrdoće i vlačne čvrstoće za maraging čelik (19):

$$R_m = 3,0767 \text{ HV} - 16,007. \quad (19)$$

Provedenom analizom utvrđeno je da se konstanta C za DMLS proizvedene metalne materijale kreće u rasponu između 2,9 do 3,3 (tablica 8).

Tablica 8. Vrijednosti konstante C .

Materijal	Konstanta C
Aluminij	2,905
Titanij	3,304
Čelik 316L	3,294
Maraging čelik MS1	3,077

ZAKLJUČAK

Analizom mikrostrukture uzoraka uočene su greške u materijalu u obliku poroziteta i nečistoća pravilnog i nepravilnog oblika nastalih u procesu izrade uzoraka DMLS tehnologijom. Provedenom regresijskom analizom određena je empirijska povezanost tvrdoće i vlačne čvrstoće DMLS proizvedenih metalnih materijala s koeficijentom determinacije $r^2 > 0,95$ što potvrđuje postojanost korelacije između ova dva svojstva. Rezultati ovog rada pokazuju da je moguće precizno procijeniti vlačnu čvrstoću (R_m) temeljem izmjerene tvrdoće (HV1) uz visoku korelaciju. To znači da postoji mogućnost da se u industrijskoj praksi ova metoda koristi za brzu i nedestruktivnu karakterizaciju materijala bez potrebe za provođenjem statičkog vlačnog ispitivanja. Međutim, prisutnost poroziteta i nečistoća u mikrostrukтури može utjecati na konačne mehaničke osobine, što ukazuje na važnost optimizacije parametara DMLS postupka. Također, dokazana anizotropija mehaničkih svojstava kod različitih orijentacija uzoraka može biti ključan faktor pri dizajniranju komponenti izrađenih aditivnim postupcima.

Prijedlog mogućih smjerova istraživanja:

- Eksperimentalna provjera modela - Izraditi epruvete za statičko vlačno ispitivanje DMLS metodom te provesti ispitivanje kako bi se dodatno potvrdila dobivena regresijska korelacija između tvrdoće i vlačne čvrstoće
- Utjecaj parametara DMLS postupka – Analizirati kako različite vrijednosti snage lasera, temperature predgrijavanja i brzine skeniranja utječu na tvrdoću i čvrstoću materijala
- Ispitivanje mikrostrukture – Koristiti napredne metode kao što su SEM (eng. *Scanning Electron Microscopy*) i EDS (eng. *Energy Dispersive Spectroscopy*) analiza kao bi se detaljnije karakterizirali prisutni poroziteti i nečistoće
- Usporedba s konvencionalno proizvedenim materijalima – Usporediti rezultate DMLS uzoraka s uzorcima istih materijala izrađenih konvencionalnim metodama (npr. lijevanjem ili kovanjem) kako bi se utvrdile razlike u mehaničkim svojstvima.

Ovaj rad pruža temelj za daljnja istraživanja, posebice u kontekstu optimizacije parametara DMLS postupka i boljeg razumijevanja anizotropije mehaničkih svojstava aditivno proizvedenih metala.

LITERATURA

- [1] Alkilani, Nuri Alssid . Prediction of Tensile Mechanical Properties of Tin-Bismuth Alloys by Vickers Hardness Test [Master's thesis]. Graduate School of Natural and Applied Sciences, Atılım University; 2018.
- [2] MakerVerse. 5 pros of 3d printing [Internet]. MakerVerse. 2024 [pristupljeno 20.12.2024.]. Dostupno na: <https://www.makerverse.com/resources/3d-printing/5-pros-and-cons-of-3d-printing/>
- [3] Hrvatska E. Hrvatska enciklopedija. Aditivna proizvodnja. [pristupljeno 20.12.2024.] Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/>
- [4] IZIT. 3D print – što je to i kako funkcionira? [Internet]. 2024. [pristupljeno 20.12.2024.] Dostupno na: <https://izit.hr/blog/3d-print-sto-je-to-i-kako-funkcionira/>
- [5] Godec D, Šercer M. Aditivna proizvodnja. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2015.
- [6] Aditivna proizvodnja - Više od samo 3D printa [Internet]. Protosfera. 2024 [pristupljeno 21.12.2024.]. Dostupno na: <https://protosfera.hr/aditivna-proizvodnja-vise-od-samo-3d-printa/>
- [7] Viderščak, D. (2023). 'Utjecaj parametara selektivnoga laserskoga taljenja na strukturu i svojstva dentalne Co-Cr legure', Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:976681>
- [8] Metalni 3d ispis: konačan vodič (2021.) - facfox 3d printing service [Internet]. [pristupljeno 21.12.2024.]. Dostupno na: <http://hr.insta3dp.com/info/metal-3d-printing-a-definitive-guide-79278113.html>
- [9] Powder bed fusion (Sls vs slm vs ebm vs mjf) – additive manufacturing. 2022. [pristupljeno 23.12.2024.]. Dostupno na: <https://immensa.io/powder-bed-fusion-sls-vs-slm-vs-ebm-vs-mjf-additive-manufacturing/>.
- [10] Dassault Systèmes [Internet]. 2021. Powder bed fusion. [pristupljeno 23.12.2024.] Dostupno na: <https://www.3ds.com/make/guide/process/powder-bed-fusion>
- [11] Viderščak, D., Schauerl, Z., Šolić, S., Čatić, A., Godec, M., Kocijan, A., Paulin, I., & Donik, Č. (2021). Additively Manufactured Commercial Co-Cr Dental Alloys: Comparison of Microstructure and Mechanical Properties. *Materials*, 14(23), 7350. Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/ma14237350>

- [12] Viderščak, D., Schauperl, Z., Runje, B., Šolić, S., Ćatić, A., Godec, M., Paulin, I., & Donik, Č. (2024). Laser Powder Bed Fusion Parameters Optimization for Enhanced Mechanical Properties of EOS Co-Cr Dental Alloy. *Materials*, 17(20), 4993. Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/ma17204993>
- [13] Godec D. Utjecaj hibridnog kalupa na svojstva injekcijski prešanog plastomernog otpreska [Disertacija]. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2005.
- [14] What is directed energy deposition (Ded)? [Internet]. [pristupljeno 26.12.2024.]. Dostupno na: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/directed-energy-deposition.aspx>
- [15] Dassault Systèmes [Internet]. 2021. Directed energy deposition. [pristupljeno 28.12.2024.] Dostupno na: <https://www.3ds.com/make/guide/process/directed-energy-deposition>
- [16] Dassault Systèmes [Internet]. 2021. Binder jetting. [pristupljeno 28.12.2024.] Dostupno na: <https://www.3ds.com/make/guide/process/binder-jetting>
- [17] TWI. What is Binder Jetting? [pristupljeno 28.12.2024.] Dostupno na: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-binder-jetting#HowdoesitWork>
- [18] 3D Printing [Internet]. 2019. Metal 3d printing: an overview of the most common types. [pristupljeno 30.12.2024.] Dostupno na: <https://3dprinting.com/metal/types-of-metal-3d-printing/>
- [19] 3DEO. An introductory overview of metal extrusion 3d printing [Internet]. 3DEO - Metal Additive Manufacturing. 2018. [pristupljeno 30.12.2024.]. Dostupno na: <https://www.3deo.co/featured/metal-3d-printing-processes-metal-extrusion-3d-printing/>
- [20] Dassault Systèmes [Internet]. 2021. Material extrusion. [pristupljeno 30.12.2024.] Dostupno na: <https://www.3ds.com/make/guide/process/material-extrusion>
- [21] Pilipović A. Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa [Disertacija]. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2012.
- [22] Ivušić V, Franz M, Španiček Đ, Ćurković L. Materijali 1. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2019.
- [23] Ćorić D, Alar Ž. Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala. 2016; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [24] Alar Ž. Mehanička svojstva materijala. 2019; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [25] Ocheri C, Okuu J, Nnamchi P. Empirical Relationship between Hardness and Tensile Strength for Medium Carbon Steel Quenched in Different Media. *Journal of Material Sciences & Engineering* . 2019.

- [26] Pavlina EJ, Van Tyne CJ. Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels. J of Materi Eng and Perform [Internet]. 2008.
- [27] Mecatome t260 - heavy duty cutting machine - [Internet]. [pristupljeno 20.1.2025.]. Dostupno na: <https://www.eutktoid.com/en/product/mecatome-t260>
- [28] Mecatech 250 psi - automatic polishing machine - [Internet]. [pristupljeno 20.1.2025.]. Dostupno na: <https://www.eutktoid.com/en/product/mecatech-250-spi>
- [29] EOS GmbH [Internet]. Eos m 290 - mid-size 3d printing. [pristupljeno 20.1.2025.] Dostupno na: <https://www.eos.info/metal-solutions/metal-printers/eos-m-290>
- [30] EOS M 290 | Metalska jezgra Čakovec [Internet]. [pristupljeno 22.1.2025.]. Dostupno na: <https://metalskajezgra.hr/eos-m-290/>

PRILOZI

I. Tehnički podaci EOS AlSi₁₀Mg legure.



Material data sheet - FlexLine

Tensile data at room temperature [5, 6, 7]

As-manufactured

	Horizontal	Vertical
Ultimate tensile strength, Rm	460 ± 20 MPa (67 ± 3 ksi)	470 ± 20 MPa (68 ± 3 ksi)
Yield strength, Rp0.2	270 ± 20 MPa (39 ± 3 ksi)	230 ± 20 MPa (32 ± 3 ksi)
Elongation at break, A	10 ± 2 %	6 ± 2 %

Heat treated [7]

	Horizontal	Vertical
Ultimate tensile strength, Rm	340 MPa (49 ksi)	350 MPa (51 ksi)
Yield strength, Rp0.2	220 MPa (32 ksi)	225 MPa (33 ksi)
Elongation at break, A	12 %	9 %

[5] The numbers are typical values and are determined from samples with horizontal and vertical orientation.

[6] Tensile testing according to ISO 6892-1 B10, proportional test pieces, diameter of the neck area 5 mm (0.2 inch), original gauge length 25 mm (1 inch).

[7] Stress relieve: anneal for 90 minutes at 270 °C (518 °F). Oven type Et configuration may have impact on the mechanical properties: longer holding time and higher temperature can lead to decreased strength and increased elongation properties and vice versa. Values given in above table were obtained by inserting parts to preheated oven; annealing time calculation started when part temperature reached 6 °C below target temperature; maximum overheating was < 5 °C.

II. Tehnički podaci za EOS Ti₆Al₄V leguru.

Material data sheet

Mechanical properties of parts [8]

	As built	Heat treated [6]
Tensile strength [5]		
- in horizontal direction (XY)	typ. 1290 ± 50 MPa typ. 187 ± 7 ksi	min. 930 MPa (134.8 ksi) typ. 1100 ± 40 MPa (160 ± 6 ksi)
- in vertical direction (Z)	typ. 1240 ± 50 MPa typ. 187 ± 7 ksi	min. 930 MPa (134.8 ksi) typ. 1100 ± 40 MPa (160 ± 6 ksi)
Yield strength (R_{p0.2}) [5]		
- in horizontal direction (XY)	typ. 1140 ± 50 MPa typ. 165 ± 7 ksi	min. 860 MPa (124.7 ksi) typ. 1000 ± 50 MPa (145 ± 7 ksi)
- in vertical direction (Z)	typ. 1120 ± 80 MPa typ. 162 ± 12 ksi	min. 860 MPa (124.7 ksi) typ. 1000 ± 60 MPa (145 ± 9 ksi)
Elongation at break [5]		
- in horizontal direction (XY)	typ. (7 ± 3) %	min. 10 % typ. (13.5 ± 2) %
- in vertical direction (Z)	typ. (10 ± 3) %	min. 10 % typ. (14.5 ± 2) %
Modulus of elasticity [5]		
- in horizontal direction (XY)	typ. 110 ± 15 GPa typ. 16 ± 2 Msi	typ. 110 ± 15 GPa typ. 16 ± 2 Msi
- in vertical direction (Z)	typ. 110 ± 15 GPa typ. 16 ± 2 Msi	typ. 110 ± 15 GPa typ. 16 ± 2 Msi
Hardness [7]	typ. 320 ± 12 HV5	

[5] Tensile testing according to ISO 6892-1:2009 (B) Annex D, proportional test pieces, diameter of the neck area 5 mm (0.2 inch), original gauge length 25 mm (1 inch).

[6] Specimens were treated at 800 °C (1470 °F) for 4 hours in argon inert atmosphere. Mechanical properties are expressed as minimum values to indicate that mechanical properties exceed the minimum requirements of material specification standards. ASTM F1472-08. By fulfilling these minimum values, also the specifications of standards ASTM B348-09 and ISO 5832-3:2000 are met.

[7] Vickers hardness measurement (HV) according to EN ISO 6507-1 on polished surface. Note that measured hardness can vary significantly depending on how the specimen has been prepared.

[8] Hint: these properties were determined for Ti64_Performance 1.0 on an EOSINT M 280-400W and EOSINT M 290-400W. Test parts from Ti64_Speed 1.0 were determined on machine types EOSINT M 280-400W and correspond with data from an EOS M 290-400W.

III. Tehnički podaci za EOS 316L nehrđajući čelik.



Material data sheet - FlexLine

General process data

Layer thickness	40 μm
Volume rate [2]	3.7 mm^3/s (13.3 cm^3/h)

[2] The volume rate is a measure of build speed during laser exposure of the skin area. The total build speed depends on this volume rate and many other factors such as exposure parameters of contours, supports, up and downskin, recoating time, Home-In or LPM settings.

Physical and chemical properties of parts

Part density [3]	7.9 g/cm^3
Surface roughness after shot peening [4]	R_a 4 μm ; R_z 20 μm

[3] Weighing in air and water according to ISO 3369.

[4] Measurement according to ISO 4287. The numbers were measured at the horizontal (up-facing) and all vertical surfaces of test cubes. Due to the layerwise building the roughness strongly depends on the orientation of the surface, for example sloping and curved surfaces exhibit a stair-step effect.

Tensile data at room temperature [5, 6]

	As built	Heat treated
Ultimate tensile strength, R_m	590 MPa	n.a.
Yield strength, $R_{p0.2}$	500 MPa	n.a.
Elongation at break, A	46.7 %	n.a.

[5] The numbers are average values and are determined from samples with horizontal and vertical orientation.

[6] Tensile testing according to ISO 6892 / ASTM E8M, proportional test pieces, diameter of the neck area 5mm (0.2 inch), gauge length $4D = 20.0\text{mm}$ (0.79 inch), stress rate 10MPa/s, strain speed in plastic region 0.375 1/min.

IV. Tehnički podaci za EOS M1 maraging čelik.



 Material data sheet

Mechanical properties of parts at 20 °C (68°F) [8]

	As built
Tensile strength [6]	
- in horizontal direction (XY)	typ. 1200 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 1100 ± 150 MPa typ. 160 ± 22 ksi
Yield strength (Rp 0.2 %) [6]	
- in horizontal direction (XY)	typ. 1100 ± 100 MPa typ. 1xx ± 22 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 930 ± 150 MPa typ. 145 ± 22 ksi
Elongation at break [6]	
- in horizontal direction (XY)	typ. (12 ± 4) %
- in vertical direction (Z)	x
Modulus of elasticity [6]	
- in horizontal direction (XY)	typ. 150 ± 25 GPa typ. 22 ± 4 Msi
- in vertical direction (Z)	typ. 140 ± 25 GPa typ. 20 ± 4 Msi
Hardness [7]	typ. 33 - 37 HRC

[6] Tensile testing according to ISO 6892-1:2009 (B) Annex D, proportional test pieces, diameter of the neck area 5mm (0.2 inch), original gauge length 25mm (1 inch).

[7] Rockwell C (HRC) hardness measurement according to EN ISO 6508-1 on polished surface. Note that measured hardness can vary significantly depending on how the specimen has been prepared.

[8] Hint: these properties were determined on an EOSINT M 280-400W. Test parts from machine type EOS M 290-400W correspond with these data.
