

Analiza utjecaja oblika rešetkaste strukture na masu i mehanička svojstva 3D ispisane komponente

Čamber, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:845063>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-27**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Čamber

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Ivan Čamber

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se profesoru Damiru Godecu na savjetima, utrošenom trudu i vremenu prilikom pisanja rada.

Zahvaljujem se asistentu Mislavu Tujmeru na pomoći i savjetima prilikom izrade eksperimentalnog dijela.

Posebno bih se zahvalio svojoj obitelji na podršci i razumijevanju tijekom studija.

Ivan Čamber



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Čamber** JMBAG: 0035221906

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza utjecaja oblika rešetkastih struktura na masu i mehanička svojstva 3D ispisane komponente**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of lattice structures geometry on mass and mechanical properties of 3D printed component**

Opis zadatka:

Aditivna proizvodnja omogućuje izradu vrlo kompleksnih oblika proizvoda koje je vrlo teško ili nemoguće načiniti tradicionalnim tehnologijama. Rešetkaste strukture mogu se definirati kao ponavljajući konstrukcijski elementi na mezo-razini u 3D modelu proizvoda. Iako je oblik proizvoda s rešetkastom strukturom bitno kompleksniji od tradicionalnog oblika s punom stijenkama, takav oblik donosi brojne prednosti kao što su manji utrošak materijala (manja masa proizvoda) te poboljšana mehanička svojstva (primjerice čvrstoća i elastičnost). S druge strane, nedostatak takve strukture je otežana izrada čak i nekim od aditivnih tehnologija, a za tehnologije koje uključuju primjenu potpornih struktura, taj nedostatak je još veći zbog otežanog uklanjanja potporne strukture nakon 3D ispisa.

U okviru rada potrebno je:

1. Detaljno opisati i sistematizirati najčešće vrste rešetkastih struktura s njihovim prednostima i nedostacima.
2. Opisati potencijalne aditivne tehnologije za izradu proizvoda s rešetkastom strukturom.
3. U praktičnom dijelu rada potrebno je s pomoću odgovarajućeg računalnog programa generirati najčešće oblike rešetkastih struktura na komponenti jednostavnog oblika te ih 3D ispisati.
4. 3D ispisane komponente analizirati s aspekta mase i specifičnih mehaničkih svojstava.
5. U konačnici donijeti odgovarajuće zaključke.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

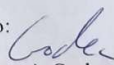
7. ožujka 2024.

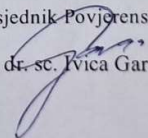
9. svibnja 2024.

13. – 17. svibnja 2024.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc.  Damir Godec

Prof. dr. sc.  Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. REŠETKASTE STRUKTURE.....	2
2.1. Štapne rešetke	3
2.2. TPMS rešetke.....	4
2.3. Saće i pločaste rešetke.....	5
3. ADITIVNA PROIZVODNJA	6
4. ADITIVNE TEHNOLOGIJE	8
4.1. <i>Polyet</i> pisači (MJT postupak AM).....	8
4.2. MEX (<i>Material Extrusion</i>) pisači	9
4.3. SLA (<i>Stereolitografski</i>) pisači	10
4.4. SLS (<i>Selective laser sintering</i>) pisači	11
4.5. BJT (<i>Binder jetting</i>) pisači.....	12
4.6. MJF (<i>Multi Jet Fusion</i>) pisači.....	13
4.7. DED (<i>Directed Energy Deposition</i>) pisači	14
5. MATERIJALI ZA 3D ISPIS	16
5.1. PLA - Polilaktid	16
5.2. ABS-Akronitril/butadien/stirenska plastika.....	17
5.3. PETG Poli(etilen-tereftalat glikol).....	17
5.4. PA- Poliamid (<i>Nylon</i>).....	18
5.5. VeroClear	18
6. EKSPERIMENTALNI DIO	20

6.1. Modeliranje u nTopology.....	20
6.2. Ispis loptica	25
6.3. Ispitivanje elastičnosti odbijanjem od podloge	32
6.4. Norma za određivanje pritisnih svojstava plastike (ISO 604:2002; EN ISO 604:2003) 37	
6.5. Ispitivanje pritisnih svojstava.....	39
6.6. Analiza i usporedba rezultata	43
7. ZAKLJUČAK.....	46
LITERATURA.....	47
PRILOZI.....	49

POPIS SLIKA

Slika 1. Vrste rešetkastih struktura [2]	2
Slika 2. Štapna rešetkasta struktura [4]	3
Slika 3. TPMS (<i>Triply Periodic Minimal Surface</i>) rešetke [7]	4
Slika 4. Sačasta rešetka [9]	5
Slika 5. Aditivna proizvodnja - MEX postupak [12]	7
Slika 6. <i>Polyjet</i> postupak [13]	8
Slika 7. MEX postupak aditivne proizvodnje [15]	9
Slika 8. SLA pisač [17]	10
Slika 9. SLS pisač [19]	11
Slika 10. BJT pisač [21]	12
Slika 11. MJF pisač [22]	14
Slika 12. DED pisač [24]	15
Slika 13. ABS filament [27]	17
Slika 14. VeroClear [31]	19
Slika 15. Odabir oblika ispitnog uzorka	21
Slika 16. Polumjer sfere	21
Slika 17. Rešetkasta struktura	22
Slika 18. Loptica nakon pretvaranja u <i>Mesh</i>	23
Slika 19. Loptica nakon uklanjanja viškova	23
Slika 20 Izvoz datoteke u STL format	24
Slika 21. Stratasys CONNEX350	25
Slika 22. Ispisana loptica	26
Slika 23. Water-jet uređaj za čišćenje suportne strukture	27
Slika 24. Ultrazvučna kada	28
Slika 25. Loptica 1 nakon uklanjanja suportne strukture	29
Slika 26. Loptica 2 nakon uklanjanja suportne strukture	30
Slika 27. Loptica 3 nakon uklanjanja suportne strukture	31
Slika 28. Ispitivanje elastičnosti loptice odbijanjem od podloge	33
Slika 29. Loptica 1 - ispitivanje elastičnosti odbijanjem od podloge	34
Slika 30. Loptica 2 - ispitivanje elastičnosti odbijanjem od podloge	35
Slika 31. Loptica 3 - ispitivanje elastičnosti odbijanjem od podloge	36
Slika 32. Dijagram naprezanje pomak	37

Slika 33.. Loptica 1 – ispitivanje pritisnih svojstava na kidalici.....	39
Slika 34. Loptica 1 nakon ispitivanja pritisnih svojstava na kidalici	40
Slika 35. Loptice nakon ispitivanja pritisnih svojstava na kidalici	40
Slika 36. Dijagram pritisna sila – pomak – loptica 1	41
Slika 37. Dijagram pritisna sila – pomak – loptica 2	42
Slika 38. Dijagram pritisna sila – pomak – loptica 3	42
Slika 39. Usporedba srednje visina odskoka.....	44
Slika 40. Usporedba maksimalne sile	44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Masa loptica	31
Tablica 2. Promjer loptica	32
Tablica 3. Vrijednosti ispitivanja elastičnosti odbijanjem od podloge - loptica 1	33
Tablica 4. Vrijednosti ispitivanja elastičnosti odbijanjem od podloge - loptica 2	34
Tablica 5. Vrijednosti ispitivanja elastičnosti odbijanjem od podloge - loptica 3	35
Tablica 6. Sažetak srednjih visina odbijanja i standardnih devijacija.....	36
Tablica 7. Preporučene brzine	38
Tablica 8. Sažetak Maksimalnih sila i pomaka (deformacije)	43
Tablica 9. Sažetak ispitivanih svojstava ispitnih tijela.....	43

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
3D	Three-Dimensional - trodimenzionalno
TPMS	Triply Periodic Minimal Surface- trostruko periodična minimalna površina
CAD	Computer-Aided Design - računalno potpomognuto konstruiranje
AM	Additive Manufacturing - aditivna proizvodnja
3DP	Three-Dimensional Printing - trodimenzionalno ispisivanje
RP	Rapid Prototyping - brzo prototipiziranje
DDM	Direct Digital Manufacturing - izravna digitalna proizvodnja
RM	Rapid Manufacturing - brza proizvodnja
SFF	Solid Freeform Fabrication - proizvodnja slobodnog oblika
STL	Standard Triangle Language format - Standardna trokutna jezična datoteka
CNC	Computer Numerical Control - računalno numerička kontrola
BJT	Binder Jetting Technology - tehnologija vezivnog prskanja
DED	Directed Energy Deposition – izravno usmjerena energija
MEX	Material Extrusion - ekstruzija materijala
MJF	Multi Jet Fusion – višestruka mlazna fuzija
MJT	Material Jetting – prskanje materijala
PBF	Powder Bed Fusion - fuzija u prahu
SHL	Sheet Lamination - laminiranje slojeva
VPP	Vat Photopolimerisation - polimerizacija u spremiku
ISO	International Organization for Standardization - međunarodna organizacija za standardizaciju
SLA	Stereolithography - stereolitografija
UV	Ultraviolet – ultraljubičasto zračenje
SLS	Selective Laser Sintering - selektivno lasersko sinteriranje
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene - akrilonitril butadien stiren
PA	Polyamide – poliamid
PC	Polycarbonate – polikarbonat
FFF	Fused Filament Fabrication - fuzijska izrada s filamenatom
EBM	Electron Beam Melting - taljenje elektronskim snopom
PLA	Polylactic Acid - polilaktična kiselina
FDM	Fused Deposition Modeling - taložno očvršćivanje

PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol - polietilentereftalat glikol
PET	Polyethylene Terephthalate - polietilentereftalat
PMMA	Polymethyl Methacrylate - polimetil metakrilat
NaOH	Sodium Hydroxide - natrijev hidroksid
FCC	Face-Centered Cubic - plošno centrirana kubična rešetka

SAŽETAK

Razvojem aditivnih tehnologija kompleksne geometrije koje je nekada bilo nemoguće proizvesti postaju stvar koja postaje normalna.

Problemi koji se javljaju prilikom izrade dijelova kompleksne geometrije su otežano uklanjanje potporne strukture, koja ne postoji kod konvencionalnih načina izrade.

Rešetkaste strukture imaju oblik koji je uvelike kompleksniji od oblika koji imaju punu stijenku, nosi sa sobom i karakteristike koje su s vremenom sve bitnije, a to su smanjenje materijala koji je potreban za izradu dijela, poboljšana mehanička svojstva poput čvrstoće i elastičnosti.

U ovom radu su opisane vrste rešetki, te su odabrane rešetke podvrgnute mehaničkim ispitivanjima i doneseni su određeni zaključci.

Ključne riječi: rešetkaste strukture, 3D ispis, aditivna tehnologija, polimeri, nTopology

SUMMARY

With the development of additive technologies, complex geometries that were once impossible to produce are becoming a thing that is becoming normal.

Problems that arise when manufacturing parts with complex geometry are difficult removal of the support structure, which does not exist with conventional manufacturing methods.

Lattice structures have a shape that is much more complex than the shape that has a solid wall, it also carries with it characteristics that are increasingly important over time, namely the reduction of the material needed to make the part, improved mechanical properties such as strength and elasticity.

In this paper, the types of gratings are described, and the selected gratings were subjected to mechanical tests and certain conclusions were drawn.

Key words: lattice structures, 3D print, additive manufacturing, polymers, nTopology

1. UVOD

Užurbani način života diktira trendove koji se danas primjenjuju u svim industrijama, također u životu čovjeka općenito. Ljudi u industrijama su u potrazi za boljim, jeftinijim i ekološki održivim rješenjima, kako bi zadovoljili zahtjeve u životu modernog čovjeka. Pod ekološkim se podrazumijeva ušteda materijala, da je materijal reciklabilan nakon što prođe životni vijek proizvoda, da materijal zadovoljava kriterije čvrstoće i otpornosti na određene zahtjeve koji proizvod mora imati.

U tom okruženju dolazi do razvoja aditivnih tehnologija, koje omogućavaju upravo to, uštedu materijala, materijale koje je moguće reciklirati, moguće jeftino proizvesti prototip i lakše ga vizualizirati, čime smanjujemo konceptualne greške. U sklopu ovog rada predstavljene su rešetkaste strukture koje zamjenjuju tradicionalne vrste materijala, koje su teže i imaju lošija mehanička svojstva. Opisani su postupci aditivnih tehnologija i materijali koje se najčešće koriste, također su provedena ispitivanja elastičnosti i ispitivanja pritisnih svojstava proizvoda koji se sastoji od rešetkastih struktura. Uspoređena su svojstva triju različitih oblika rešetki.

Problemi na koje se nailazi kod rešetkastih struktura su vezane za složenu strukturu i uklanjanje potpornog materijal, zbog toga se treba posebna pažnja obratiti prilikom oblikovanja komponente za 3D ispis.

Na kraju samog rada su analizirani rezultati ispitivanja i doneseni određeni zaključci nakon provedenih ispitivanja.

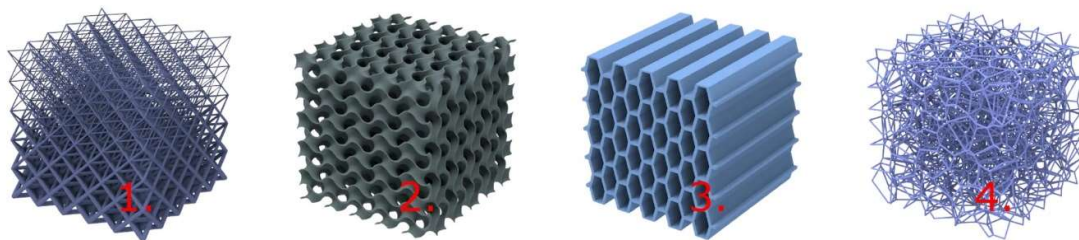
2. REŠETKASTE STRUKTURE

Oblikovanje i proizvodnja ćelijastih rešetkastih struktura potaknuti su željom za uštedom skupih funkcionalnih materijala, vremena izrade, potrošnje energije te pružanjem visokih performansi poput visokih čvrstoća uz relativno nisku masu, dobrih karakteristika apsorpcije energije te toplinskih i zvučnih izolacijskih svojstava u proizvodima zrakoplovne industrije, medicinske industrije i inženjeringa [1].

Rešetkaste strukture su ponavljajući uzorci koji ispunjavaju volumen ili se prilagođavaju površini. U inženjerskom dizajnu, rešetke su stanični materijali - često inspirirani prirodom - koji se sastoje od greda, površina ili ploča koje se uklapaju prema uređenom ili stohastičkom uzorku. Jedinica stanice najosnovnija je ponavljajuća struktura rešetke. Struktura jedinice stanice određuje vrstu rešetke. Da bi se stvorila rešetka, jedinične stanice raspoređuju se u prostoru s pomoću karte stanica. Karte stanica mogu biti pravokutne, cilindrične, sferne, ili čak iskrivljene kako bi se prilagodile između dvije površine. Svojstva rešetke određuju se vrstom rešetke i drugim dizajnerskim parametrima, poput veličine jedinične stanice i debljine greda ili površina [2].

Postoje četiri vrste rešetkastih struktura (slika 1):

- štapna rešetka,
- rešetka TPMS (*Triply Periodic Minimal Surface*)
- rešetka saća (honeycomb)
- stohastička rešetka (Voronoi).



Slika 1. Vrste rešetkastih struktura [2]

2.1. Štapne rešetke

Štapne rešetke su kompleksne strukture koje su sastavljene od elemenata koji se ponavljaju, kao što su grede ili štapovi i međusobno su povezani na čvorovima. Ove strukture, primjenjuju se u različitim inženjerskim i arhitektonskim aplikacijama zbog svoje sposobnosti kombiniranja visoke čvrstoće s relativno malom težinom materijala [3].

Ova struktura pokazala se izuzetno korisnom u širokom rasponu primjena, čime se postiže optimalan omjer čvrstoće i mase [3].

Ponavljajući uzorci ili moduli u rešetkastim gredama omogućuju raspodjelu opterećenja na više točaka unutar strukture, što rezultira stabilnošću i čvrstoćom [3].

Postoje izazovi prilikom generiranja rešetki, zbog toga što se javljaju vrhovi koji vise. Moguće je odrezati vrhove, ali struktura postaje narušena. Na tim mjestima potrebno je generirati dodatnu strukturu koja povećava vrijeme proizvodnje i nepotrebnoj upotrebnim materijala. Jedno od računalnih rješenja je korištenje konformnih i optimiziranih tetraedarskih i heksaedarskih mreža [3].



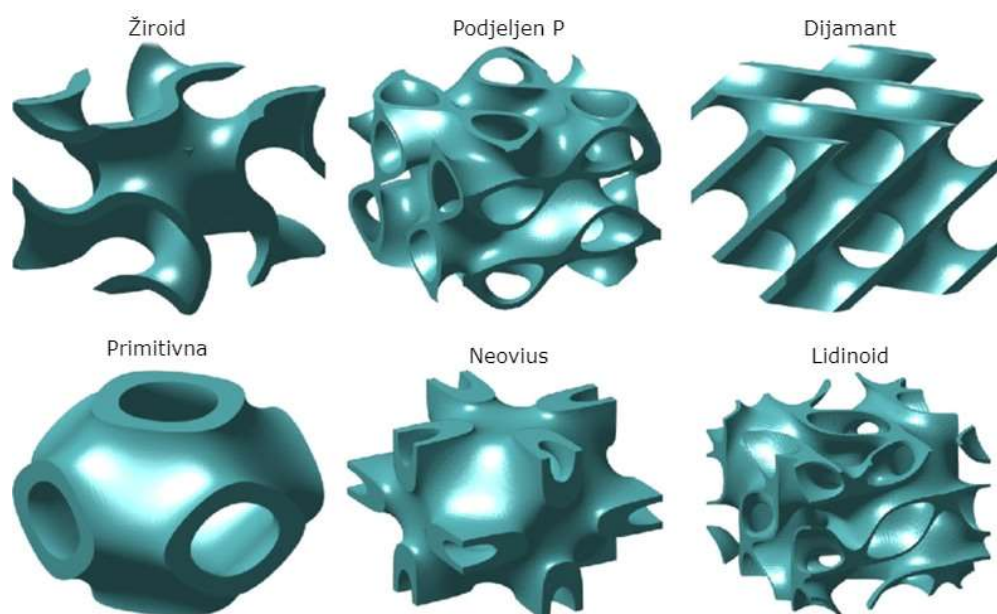
Slika 2. Štapna rešetkasta struktura [4]

2.2. TPMS rešetke

U 3D ispisu, trostruko periodične minimalne površine (TPMS) nude izvanredna mehanička svojstva općenito. Karakterizirane su svestranom primjenom, što ih čini atraktivnim izborom za različite aplikacije u ovom području [5].

TPMS su matematički definirane strukture koje imaju svojstvo minimalne površinske energije u određenom prostoru. TPMS površine su slobodane od samopresjecanja i mogu poprimiti različite oblike, što pruža izvanrednu fleksibilnost u dizajnu i primjeni [6].

Cijela struktura TPMS-a može se precizno izraziti matematičkim funkcijama, omogućavajući kontrolu osnovnih karakteristika poput poroznosti ili specifičnih površina volumena prilagođavanjem parametara funkcije. Osim toga, površine TPMS-a su vrlo glatke, bez oštih rubova ili spojeva karakterističnih za rešetkaste strukture [6].



Slika 3. TPMS (*Triply Periodic Minimal Surface*) rešetke [7]

TPMS se mogu koristiti na različite načine u 3D ispisu. Primjerice, mogu se koristiti kao apsorber energije pod kompresijom, što ih čini atraktivnim za konstrukciju poroznih struktura u inženjeringu tkiva i implantatima. Također, zbog visokih specifičnih površina volumena, mogu se koristiti kao hladnjaci, kemijski mikoreaktori ili membrane u raznim aplikacijama [5].

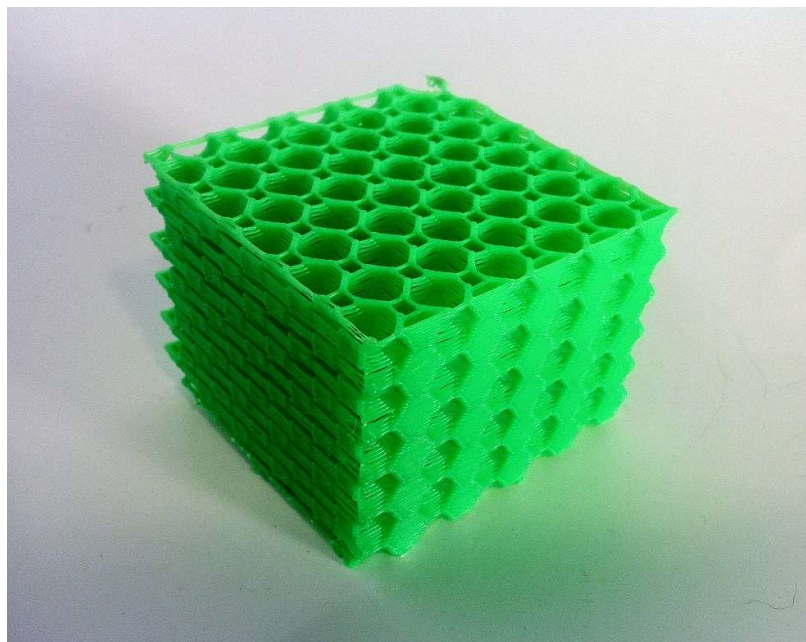
2.3. Saće i pločaste rešetke

Koncept saćastih ploča nastao je 1915. godine, pri čemu je veličina ćelije definirana kao udaljenost između gornjeg i donjeg ruba šesterokutnih ćelija. Dubina saća naziva se dužinom čvora ili debljinom ćelije [8].

Saćaste ploče pokazuju bolju otpornost na sudar u usporedbi sa monolitnim pločama istog materijala i debljine, i imaju veću otpornost na pritisak u usporedbi sa strukturama od pjene.

Različiti geometrijski parametri kao što su oblik, veličina, debljina stijenke ćelije i dužina čvora utječu na performanse strukture pod utjecajem različitih vrsta opterećenja [8].

Studije procjenjuju sposobnost apsorpcije energije kroz parametre kao što su prosječna sila prilikom loma, efikasnost loma, specifična apsorpcija energije, energija apsorbirana po jedinici duljine loma i ukupna apsorpcija energije. Za dinamičke udarce projektilima koriste se termini kao što su balistički limit i energija probijanja kako bi se specificirala performansa saćastih sendvič ploča [8].



Slika 4. Saćasta rešetka [9]

3. ADITIVNA PROIZVODNJA

Prvi oblik stvaranja trodimenzionalnog objekta sloj po sloj korištenjem računalno potpomognutog konstruiranja (CAD) bila je brza proizvodnja prototipova, razvijena 1980-ih za izradu modela i prototipnih dijelova. Ova tehnologija razvijena je kako bi pomogla ostvarivanju zamisli inženjera. Brza izrada prototipova je jedan od ranijih procesa aditivne proizvodnje (AM). Omogućuje stvaranje ispisanih proizvoda, a ne samo modela [10].

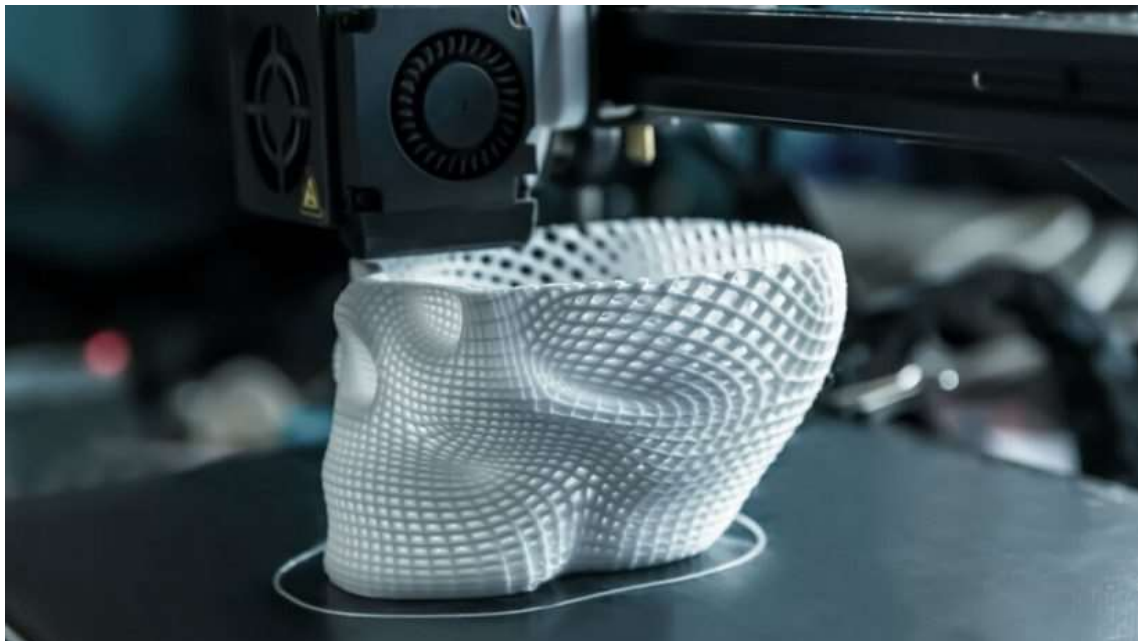
Aditivna proizvodnja (AM) opisuje tehniku miješanja materijala putem fuzije, vezanja ili stvrdnjavanja, poput tekućih smola i prahova. Ova tehnika gradi dijelove sloj po sloj s pomoću 3D modeliranja u CAD sustavima [10].

Izrazi poput 3D ispisa (3DP), brze izrade prototipova (RP), izravne digitalne proizvodnje (DDM), brze proizvodnje (RM) i izrade slobodnih oblika (SFF) koriste se za opisivanje procesa aditivne proizvodnje (AM). Ovi procesi stvaraju komponente koristeći 3D podatke ili datoteke u *Standard Tessellation Language* (STL) formatu, koje sadrže informacije o geometriji objekta [10]. AM je vrlo korisna kad su potrebni mali proizvodni volumeni, visoka kompleksnost oblika i česte promjene oblika. Omogućuje proizvodnju složenih dijelova nadvladavajući ograničenja tradicionalnih postupaka proizvodnje. Unatoč mnogim prednostima, AM ima ograničene primjene zbog niske preciznosti i dugih vremena izrade u usporedbi s primjerice CNC strojevima. No, AM nema ista ograničenja kao CNC obrada jer dijeli komponentu na presjeke s rezolucijom jednakom rezoluciji procesa. Unatoč tome, točnost i vrijeme izrade mogu se poboljšati pravilnim postavljanjem dijela. Optimirana orijentacija dijela tijekom ispisa može poboljšati točnost, smanjiti vrijeme izrade i količinu potrebnih potpornih struktura, što rezultira smanjenjem ukupnih troškova proizvodnje. AM, za razliku od konvencionalnih proizvodnih procesa, uključuje dodatne kontrolirane procesne parametre i veću interakciju između svojstava materijala i procesnih parametara. Postoje različite vrste AM procesa ovisno o pripremi materijala, tehnici generiranja slojeva, vrsti materijala i zahtjevima primjene [11].

Procesi i uređaji za aditivnu proizvodnju (AM) mogu se klasificirati na temelju dimenzija stroja, dimenzija mlaznice, brzine mlaznice i dimenzija radnog prostora. Ove klasifikacije uključuju energiju oblikovanja, tehniku generiranja primitivne geometrije, prirodu korištenih materijala. Unatoč raznolikosti metoda klasifikacije, AM procesi mogu se sažeti i klasificirati prema vrsti korištenog materijala. Slika 5 prikazuje jedan od postupaka aditivne proizvodnje. Ova raznolikost omogućuje prilagodbu AM procesa specifičnim potrebama i svojstvima materijala, dodatno proširujući mogućnosti primjene aditivne proizvodnje [11].

Prema normi ISO/ASTM 52900:2021 AM postupci se dijele na 7 osnovnih grupa:

- BJT (*Binder Jetting*)
- DED (*Directed Energy Deposition*)
- MEX (*Material Extrusion*)
- MJT (*Material Jetting*)
- PBF (*Powder Bed Fusion*)
- SHL (*Sheet Lamination*)
- VPP (*Vat Photopolymerization*).



Slika 5. Aditivna proizvodnja - MEX postupak [12]

4. ADITIVNE TEHNOLOGIJE

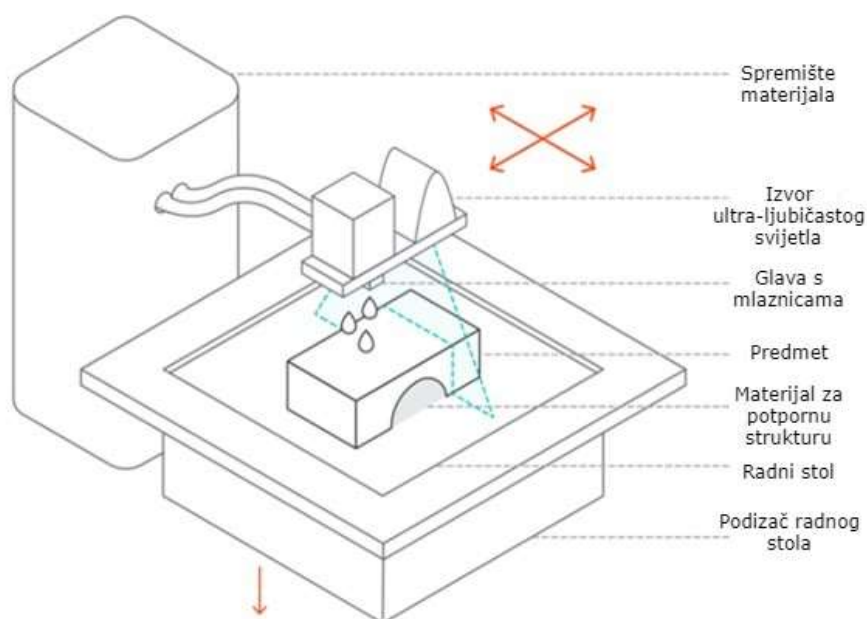
4.1. *PolyJet* pisači (MJT postupak AM)

PolyJet -kao i svaki proces 3D ispisa se započinje stvaranjem željenog objekta pomoću CAD softvera, koji se zatim u STL formatu šalje na 3D pisač.

Kada proces započne, tekuća smola zagrijava se na 30-60°C kako bi se postigla odgovarajuća viskoznost za ispisivanje. Glava pisača raspršuje mikrokapljice tekuće fotopolimerne smole koja pri ultraljubičastoj svjetlosti se stvrdnjava [13].

Kao i kod postupka stereolitografije (SLA), ova tehnologija temelji se na principu fotopolimerizacije. Moguće je višematerijalno i polikromatsko ispisivanje jer držač glave pisača ima mnoge mlaznice sposobne istovremeno "prskati" različite materijale [13].

Glavna prednost tehnologije je njena sposobnost ispisivanja višematerijalnih i višebojnih dijelova. Zahvaljujući svojim višestrukim glavama za ispis, svaki materijal može se pohraniti u zasebnoj glavi, omogućujući ispis različitih materijala i boja. Dobiveni kompozitni materijal naziva se digitalni materijal i pogodan je za stvaranje detaljnih prototipova koji su slični konačnom proizvodu [13].

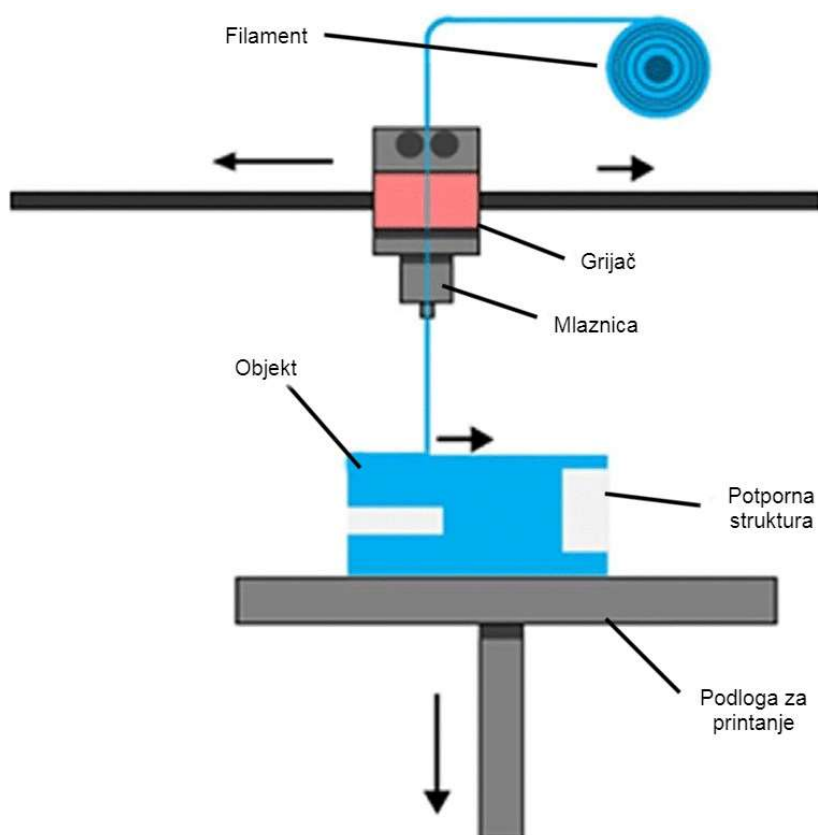


Slika 6. *PolyJet* postupak [13]

4.2. MEX (*Material Extrusion*) pisači

Material Extrusion je tehnika 3D ispisa temeljena na taljenju materijala u obliku filameta i oblikovanjem slojeva za izgradnju objekta. U ovom procesu, tanka nit materijala smještena na roli se povlači kroz pogonski kotač i zagrijava u mlaznici na kontroliranoj temperaturi do polutekućeg stanja. Zatim se materijal precizno nanosi sloj po sloj putem mlaznice kako bi se stvorili željeni oblici, slijedeći konture koje su specificirane u programu poput CAD-a [14].

Bitno je da se materijal dobro povezuje između slojeva tijekom procesa ispisa kako bi se osigurala čvrstoća strukture. Važni parametri poput debljine slojeva, širine i orijentacije niti utječu na mehanička svojstva konačnog proizvoda [14].

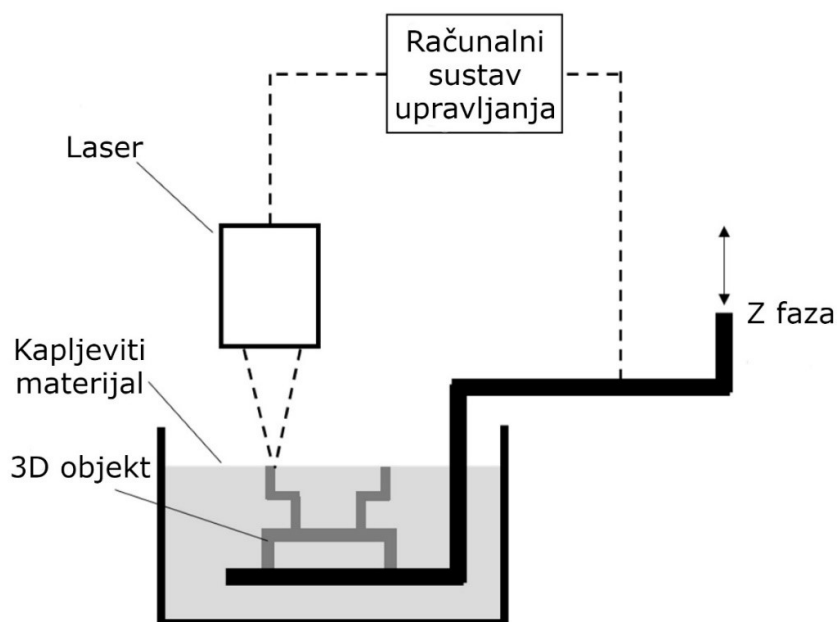


Slika 7. MEX postupak aditivne proizvodnje [15]

4.3. SLA (Stereolitografski) pisači

Stereolitografija (SLA) je tehnologija koja koristi materijal kako bi izravno izgrađivala dijelove iz CAD softvera. Ovaj proces koristi nisku snagu laserske zrake kako bi stvrdnjavao fotoosjetljivu smolu i postizao polimerizaciju. Razvijena je od strane tvrtke 3D Systems 1986. godine. SLA tehnologija je bila prvi korak u polju brze izrade prototipova tijekom 1980-ih i dalje je najčešće korištena tehnologija [16].

Proces započinje s 3D CAD datotekom koja se digitalno reže na niz paralelnih horizontalnih presjeka. Laser zatim ispisuje svaki presjek na površini fotopolimerne smole u spremniku čime se očvršćuje radni sloj. Postupak se ponavlja dok dijelovi nisu gotovi. Kada je model gotov, platforma izlazi iz kupke i višak smole se iscijedi. Model se zatim uklanja s platforme, opere od viška smole, i stavlja u UV komoru radi konačnog stvrdnjavanja [16].



Slika 8. SLA pisač [17]

4.4. SLS (*Selective laser sintering*) pisači

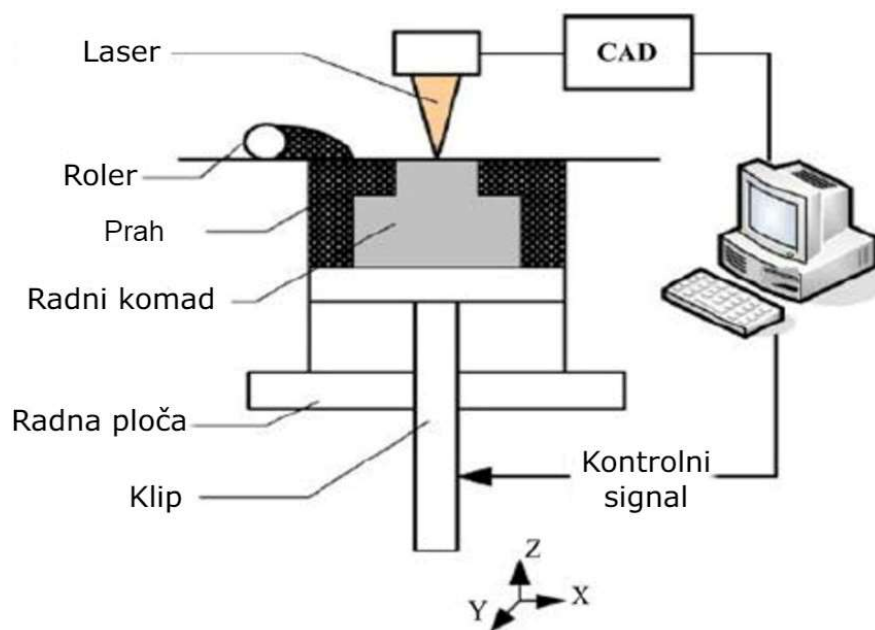
SLS 3D ispis visoko je pouzdana tehnologija koja se koristi u inženjerstvu i proizvodnji u različitim industrijama zbog svoje sposobnosti proizvodnje čvrstih, funkcionalnih dijelova [18].

Postupak 3D ispisa SLS tehnologijom započinje tako što se prah raspršuje u tankom sloju na vrhu platforme unutar komore [18]. Pisač ima sustav koji zagrijava prah na temperaturu nešto nižu od točke taljenja sirovog materijala, što olakšava laseru da stvori čvrsti model [18].

Laser skenira presjek 3D modela, zagrijavajući prah do malo ispod ili upravo na točki taljenja materijala. Time se mehanički spajaju čestice zajedno kako bi stvorio čvrsti sloj [18].

Nesinterirani prah funkcionira kao potpora tijekom procesa ispisa, čime se eliminira potreba za dodatnim potpornim strukturama. Nakon svakog sloja, platforma se spušta za obično između 50 do 200 mikrometara, i proces se ponavlja sve dok dijelovi nisu potpuno izrađeni [18].

Završeni dijelovi trebaju biti uklonjeni iz radne komore, odvojeni i očišćeni od viška praha. Prah je reciklabilan, a ispisani dijelovi se najčešće dodatno obrade mlazom [18].



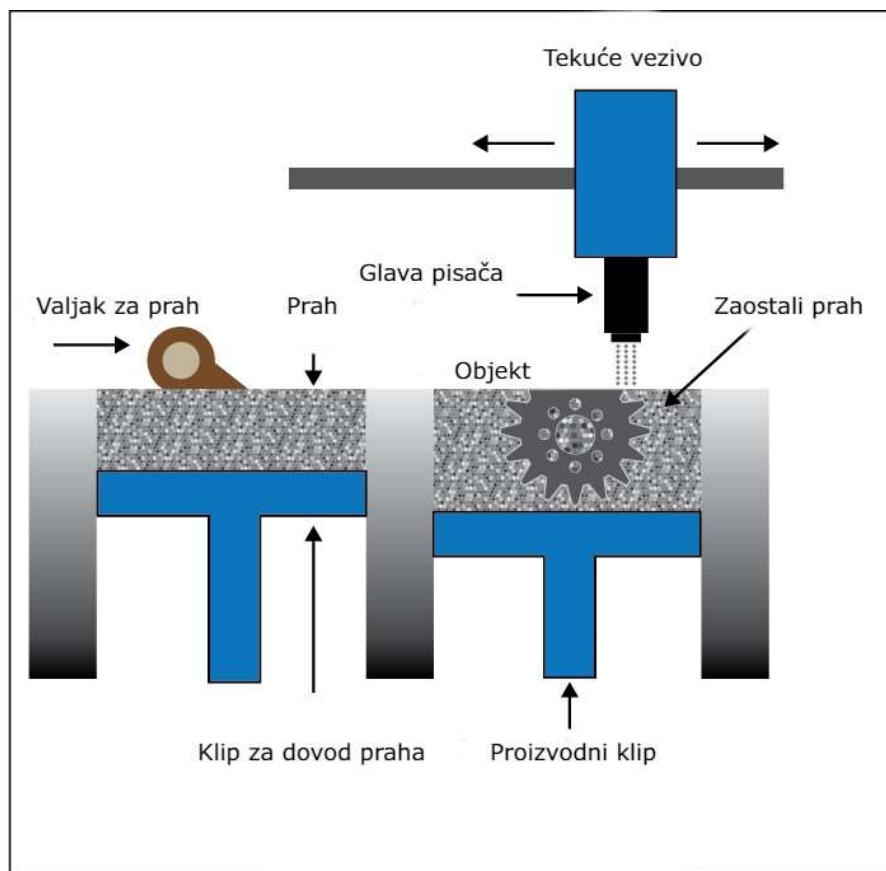
Slika 9. SLS pisač [19]

Nedavni napredak u strojevima, materijalima i softveru omogućio je široj lepezi tvrtki pristup SLS pisačima, omogućujući sve većem broju tvrtki korištenje SLS pisača koji su ranije bili ograničeni na nekoliko visokotehnoških industrija [18].

4.5. BJT (*Binder jetting*) pisači

Binder jetting je tehnika 3D ispisa koja se temelji na prahu, gdje se prah spaja tekućim vezivom za 3D ispis. U tipičnom uređaju za ispis veziva postoje dvije komore: jedna je ispunjena prahom za izgradnju koji se dovodi u drugu komoru, gdje se stvara 3D model. Model se gradi tako da se prah lijepljenjem tekućim vezivom spaja u slojevima [20].

Prvo se prah puni u prvu komoru, a zatim se valja u drugu komoru, gdje se stvara model. Platforma se spušta nakon svakog sloja za debljinu sljedećeg sloja, a ovaj proces se ponavlja sve dok cijeli model nije izgrađen. Nakon što se završi posljednji sloj, 3D model ostaje zalijepljen na preostali prah i mora se izvaditi iz uređaja i očistiti višak praha. Osim toga, da bi se očuvala kvaliteta, model se mora ostaviti da se potpuno ohladi i stvrdne [20].



Slika 10. BJT pisac [21]

Prednost ispisa veziva je što nema potrebe za korištenjem potpornih struktura tijekom izrade 3D modela. Iako je proces brži od drugih tehnika 3D ispisa, čišćenje viška zalijepljenog praha s modela zahtijeva dodatno vrijeme nakon izrade modela [20].

Uobičajeni materijali su nehrđajući čelik i neki polimeri poput ABS-a, PA-a i PC-a. Iako postupak omogućuje široki spektar materijala i boja [20].

4.6. MJF (*Multi Jet Fusion*) pisači

Multi Jet Fusion, MJF je tehnologija aditivne proizvodnje gdje se prah postupno vezuje i stvrdnjava sloj po sloj kako bi se izgradio trodimenzionalni objekt [22].

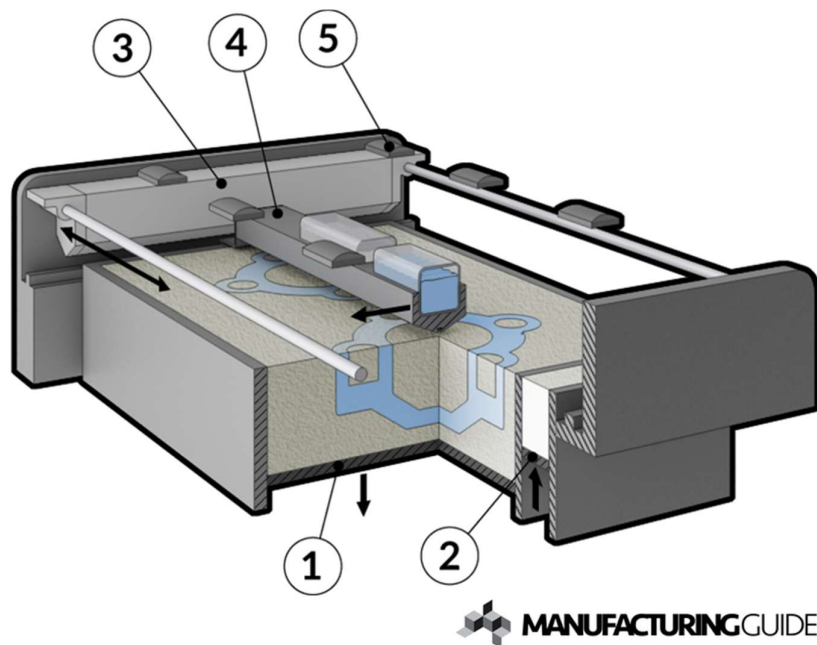
Poput tehnologije SLS, prah se podiže i raspoređuje preko radne platforme pomoću strugača. Prah se prethodno zagrijava na temperaturu tik ispod točke taljenja. Zatim se kroz glavu za ispis primjenjuju dva različita tekuća sredstva (agensa) koja pokrivaju cijelu širinu radne površine [22].

Jedan je "agens za spajanje" koji se nanosi na poprečni presjek materijala gdje će se materijal spojiti, a drugi je "agens za detalje" koji se nanosi izvan konture. Na kraju svakog ciklusa primjenjuje se toplinska energija koja uzrokuje taljenje praha na mjestima gdje je primijenjen "agens za spajanje" [22].

Proces se ponavlja sve dok se ne izgradi puna visina, a zatim se cijeli postupno hladi do sobne temperature. Na kraju, višak materijala se vakuumira i ponovno koristi, a normalna naknadna obrada je jednostavno i brzo ispiranje kako bi se uklonili ostaci praha [22].

Zbog toga što je radna platforma zajedno s kasetom za prah odvojena jedinica, lako je zamijeniti je novom kako bi se brzo započeo sa sljedećim poslom, što dodatno čini ovu jednom od najproduktivnijih postupaka aditivne proizvodnje na tržištu [22].

Slika 11 prikazuje MJF pisac s označenim dijelovima. Platforma (stol), označena brojem (1), služi za obradu modela, dok je na broju (2) prikazano podizanje praha koji se ravnomjerno raspoređuje po cijeloj platformi. Strugač (scraper), broj (3), distribuira sloj praha po cijeloj platformi kako bi sloj bio debljine između 0,07 – 0,12 mm. Glava pisaa s mlaznicom, označena brojem (4), koristi se za dovod dva različita sredstva do praha, dok se broj (5) odnosi na žarulje, flash-lampe koje na mjestu gdje se primjenjuje sredstvo za spajanje uzrokuju taljenje praha.



Slika 11. MJF pisac [22]

4.7. DED (*Directed Energy Deposition*) pisaci

Directed Energy Deposition (DED) je postupak 3D ispisa koji koristi laser ili elektronski snop kao izvor energije za taljenje materijala, koji se u isto vrijeme tali uz pomoć mlaznice [23].

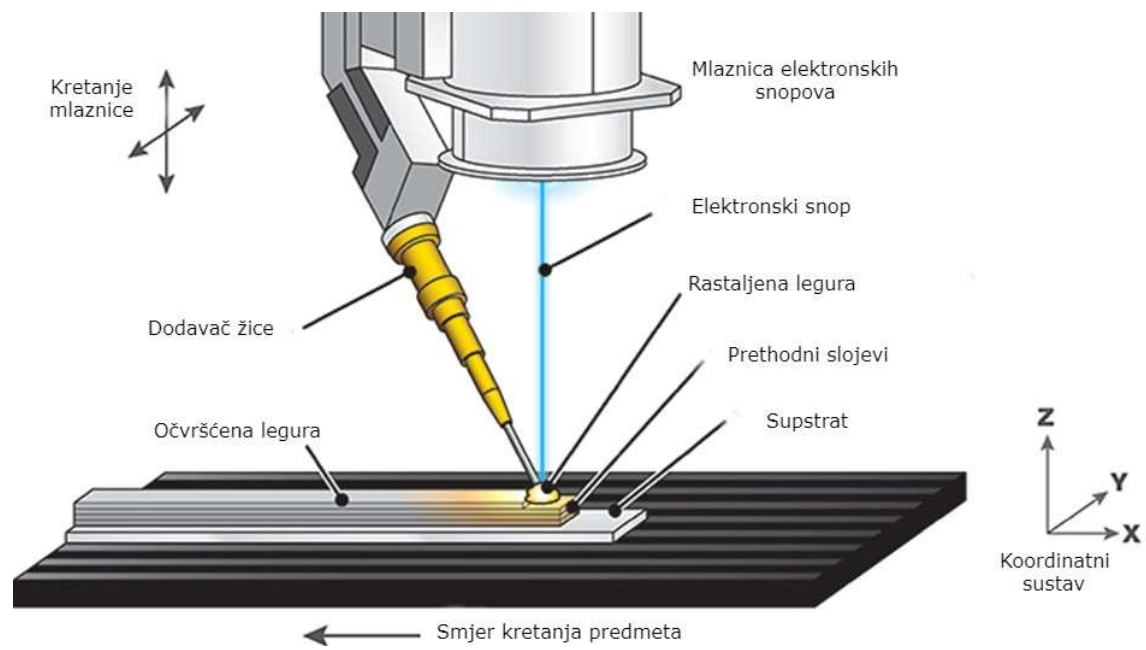
DED strojevi obično koriste mlaznicu koja je montirana na višestruku osnu robotsku ruku koja se može kretati u više smjerova [23].

Proces se obično izvodi unutar kontrolirane komore sa smanjenim koncentracijama kisika. Kod sustava temeljenih na elektronskom snopu proces se izvodi u vakuumu, dok laser-bazirani sustavi koriste potpuno inertnu komoru prilikom rada s reaktivnim metalima [23].

Također je moguće koristiti zaštitni plin kako bi obavio dio i spriječio kontaminaciju tijekom 3D ispisa metala [23].

DED koristi izvor topline za taljenje praha ili žice dok se taloži na površinu objekta. [23].

Materijal se dodaje sloj po sloj i stvrdnjava se iz taljenog bazena. Slojevi su obično debljine od 0,25 do 0,5 mm



Slika 12. DED pisač [24]

5. MATERIJALI ZA 3D ISPIS

Izbor materijala za 3D ispis ovisi o primjeni proizvoda, tehnologiji ispisa, dostupnosti materijala, kvaliteti ispisa, troškovima te ekološkim i sigurnosnim aspektima.

Različite primjene zahtijevaju različite karakteristike materijala, dok ispis određuju vrste materijala koje se mogu koristiti.

Na primjer, tehnologije kao što su *Fused Filament Fabrication* (FFF) koriste plastomerne polimere poput PLA ili ABS, dok *Electron Beam Melting* (EBM) koristi metalni prahovi. Balansiranje ovih čimbenika ključno je za postizanje optimalnog izbora materijala za 3D ispis.

5.1. PLA - Polilaktid

PLA je poliester koji se proizvodi fermentacijom škroba iz biljnih izvora poput kukuruza, manioke, kukuruza, šećerne trske ili pulpe šećerne repe. Materijalne karakteristike PLA, uključujući nisku temperaturu staklastog prijelaza, čine je prikladnom za 3D ispis [25].

PLA je topiva u otapalima poput dioksana, vrućeg benzena i tetrahidrofurana. Međutim, s obzirom na varijacije u fizičkim i mehaničkim svojstvima PLA, kao i temperaturama taljenja i otpora toplini, potrebno je pažljivo prilagoditi odabir materijala specifičnim zahtjevima aplikacije [25].

Postupci kao što su dodavanje nukleacijskih agensa ili formiranja kompozita mogu dodatno modificirati mehanička svojstva PLA, čineći je prilagodljivom za različite potrebe inženjeringa. Međutim, mnoge vrste PLA imaju nisku temperaturu staklastog prijelaza, što ih čini neprikladnim za izradu plastičnih prozirnih dijelova namijenjenih za vruće tekućine [25].

Fizička i mehanička svojstva razlikuju se ovisno o točnom tipu polimera, varirajući od amornog staklastog polimera do polu ili visoko kristalnog polimera s temperaturom staklastog prijelaza od 60–65 °C, temperaturom taljenja 130-180 °C i modulom elastičnosti od 2,7–16 GPa [25].

Toplotno otporna PLA može izdržati temperature od 110 °C, a temperaturu taljenja moguće je povisiti za 40–50 °C, a otpornost na temperaturu može se povisiti s otprilike 60 °C na čak 190 °C fizičkim miješanjem polimera s PDLA (poli-D-laktid) [25].

5.2. ABS-Akrilonitril/butadien/stirenska plastika

ABS (akrilonitril butadien stiren) vjerojatno je najčešće korišteni filament u 3D ispisu. Posebno je vrijedan za izradu čvrstih plastičnih dijelova koji moraju ostati elastični usprkos temperaturnim varijacijama [26].

Uglavnom se koristi u FDM (*Fused Deposition Modeling*) 3D pisačima. ABS je plastomerni polimer sastavljen od tri monomera: akrilonitrila, butadiena i stirena [26].

ABS je fleksibilan, otporan na visoke temperature i lako se obrađuje. ABS se hladi ravnomjerno i stvrdnjava bez potrebe za naknadnom obradom. Ima dobra mehanička svojstva koja ga čine izdržljivim i pouzdanim [26].

Akrilonitril mu daje krutost, kemijsku otpornost i čvrstoću, stiren pruža glatku i sjajnu teksturu, a butadien je gumeni sastojak koji čini ABS otpornim [26].

U usporedbi s drugim materijalima slične oblikovnosti, fleksibilnosti i mehaničke čvrstoće, ABS je vrlo pristupačan [26].

Može izdržati visoke temperature u usporedbi s većinom jeftinih plastomera [26].



Slika 13. ABS filament [27]

5.3. PETG Poli(etilen-tereftalat glikol)

PETG (polietilen tereftalat glikol) visoko je tražen zbog izvrsne mehaničke čvrstoće te otpornosti na prodor vode i ima visoku kemijsku otpornost. Kombinira neka od dobrih svojstava dva druga poznata plastomernih materijala korištena za 3D ispis: ABS (akrilonitril butadien stiren) i PLA (polilaktična kiselina).

PETG predstavlja prilagodbu PET-a (polietilen tereftalata). Etilenglikol u PET-u djelomično se zamjenjuje s drugom molekularnom grupom [28].

PETG filament ima određena svojstva koja ga razlikuju od drugih filamentnih materijala, kao što su visoka kemijska i udarna otpornost, dobra toplinska stabilnost te mogućnost ispisa pri brzini od oko 40-60 mm/s. Također zahtijeva zagrijanu platformu za ispis na otprilike 80 °C. Postoje određene prednosti PETG-a za 3D ispis i dobru toplinsku stabilnost [28].

Ipak, postoje i neki nedostaci u usporedbi s ABS-om, poput poteškoća u pohranjivanju zbog visoke higroskopsnosti i teškoća ili nemogućnosti bojanja [28].

5.4. PA- Poliamid (*Nylon*)

Poliamid ili često nazvan *nylon*, polukristalni je plastomerni materijal s niskom gustoćom i visokom temperaturnom stabilnošću. Poliamid jedan od najvažnijih konstrukcijskih materijala zbog izvrsne otpornosti na habanje, dobrog koeficijenta trenja te vrlo dobre otpornosti na temperaturu i čvrstoće udarnog loma. Oznake za poliamid plastiku često se pojavljuju uz brojeve poput PA 6, PA 66, PA 12 i PA 46, koji se odnose na molekularnu strukturu PA polimera [29].

Svaka vrsta strukture nudi različita svojstva, od tvrdog i čvrstog PA 6.6 do mekanog i fleksibilnog materijala poliamida 12. Ovisno o vrsti, točka taljenja PA-a je između 220 °C i 260 °C. Najčešće korišteni poliamidni polimeri su PA 6 i PA 66 [29].

Dodavanjem aditiva poput staklenih vlakana ili ugljičnih vlakana, izdržljivost i čvrstoća u određenim razredima mogu se po potrebi povećati mnogo puta [29].

Poliamid se također odlikuje vrlo dobrom kemijskom otpornošću te je posebno otporan na ulje. Zahvaljujući ovim izvrsnim svojstvima koja su krutost i čvrstoća PA plastika idealno je prikladna kao zamjena za metal. Automobilski dijelovi, industrijski ventili, izolacija za tračnice i drugi tehnički dijelovi izrađuju se od poliamidnog polimera. Tipična karakteristika poliamida je apsorpcija vode [29].

5.5. VeroClear

VeroClear je prozirni materijal koji simulira PMMA (polimetil metakrilat), poznat kao akril. VeroClear se koristi kao alternativa staklu i idealan je za modeliranje koncepata i provjeru dizajna prozirnih dijelova poput naočala, poklopaca svjetala i medicinskih uređaja [30].

Nudi čvrstoću, krutost, rastezljivost i otpornost na udarce, te mogućnost miješanja s drugim materijalima za različite nijanse, boje i tvrdoće [30].

VeroClear omogućuje vizualizaciju unutarnjih komponenti i značajki, te simulaciju stakla idealnu za testiranje oblika i prilagodljivost prozirnih dijelova. Potrebno je ispolirati ili lakirati objekt koji je 3D ispisan za najbolju transparentnost [30].



Slika 14. VeroClear [31]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Ispitivanja koja su provedena u ekperimentalnom dijelu rada izvodila su se na 3D ispisanom modelu oblika kugle. Potrebno je modelirati lopticu u računalnom programu, generirati tri vrste rešetke. Rešetke koje su odabrane su:

- Diamond
- Kelvin cell
- Face centered cubic.

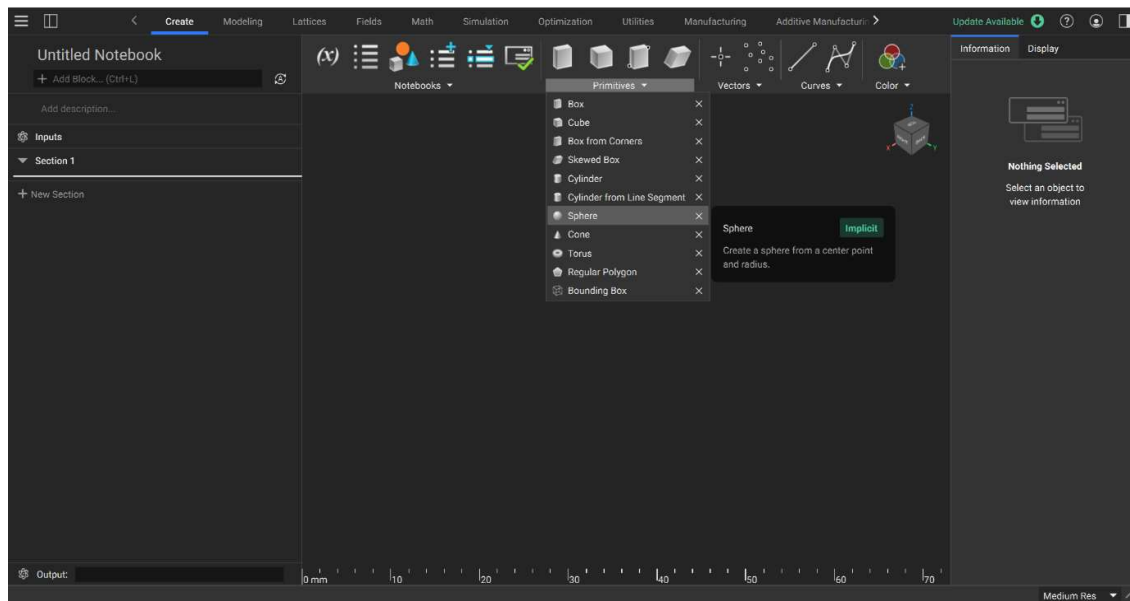
Odabrani postupak 3D ispisa je Polyet (MJT), a materijal koji će se koristiti za 3D ispis je VeroClear. Nakon ispisa je potrebno ukloniti potpornu strukturu. Potrebno je prvo water-jet postupkom ukloniti većinu potporne strukture, a zaostali materijal se otapa u 2 postotnoj NaOH otopini u ultrazvučnoj kadi. Nakon toga se ponovo otopljeni materijal uklanja water-jet postupkom.

Testovi koji su korišteni za vrednovanje mehaničkih svojstava su ispitivanje odbijanjem od podloge i ispitivanje pritisnih svojstava.

Računalni program koji će se koristiti u praktičnom dijelu je nTopology, jer je program sposoban generirati rešetkaste strukture. Ovaj program također ima sposobnost pravljenja rešetkaste strukture i izvoz u STL formatu koji je potreban za 3D ispis.

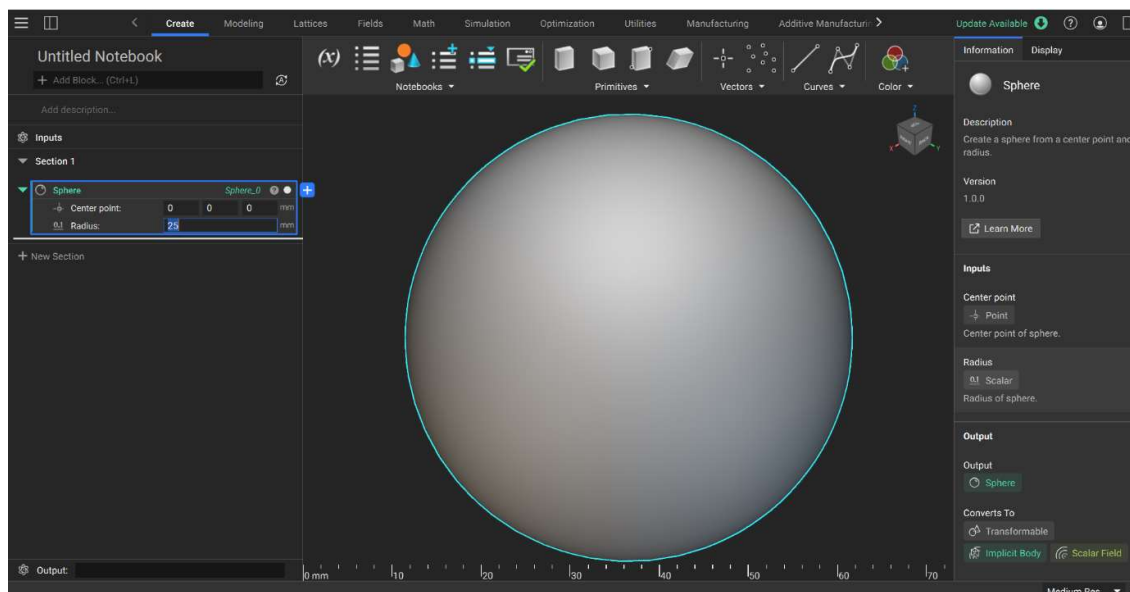
6.1. Modeliranje u nTopology

Prilikom pokretanja nTopology potrebno je odabrati „New file“, otvara se novi projekt. Slika 15 prikazuje da je nakon otvaranja novog projekta potrebno odabrati na kartici „Create“ „Primitives“ tj. primitivne geometrije. Otvara se skočni prozor i odabire se „Sphere“.



Slika 15. Odabir oblika ispitnog uzorka

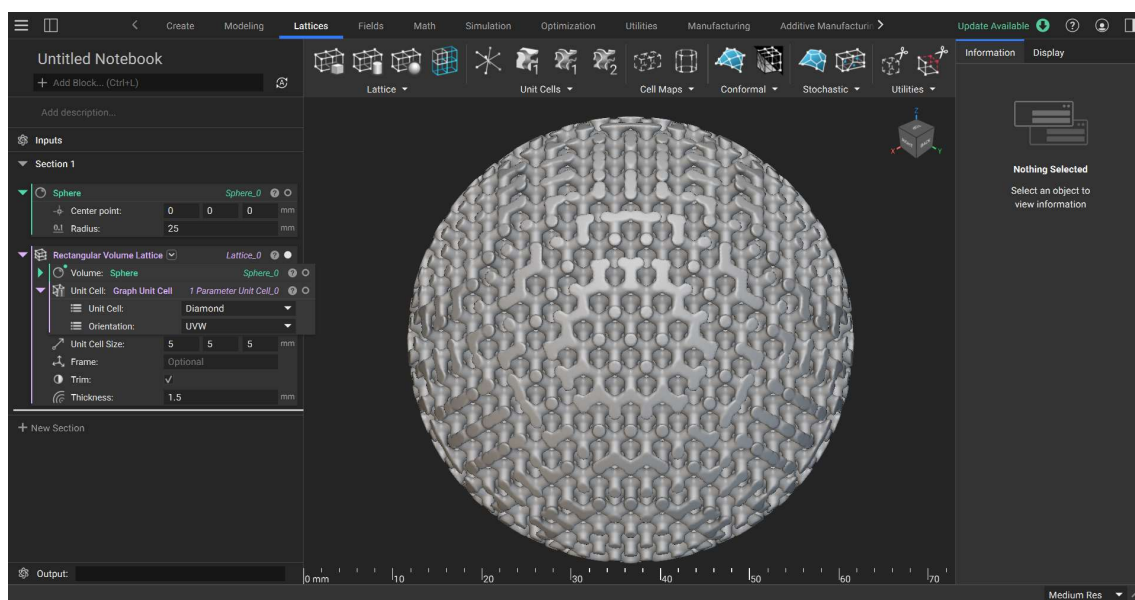
Na slici 16 se vidi sfera, kojoj je potrebno zadati dimenzije. Polumjer sfere je 25 milimetara. Ovaj promjer je optimalan, zbog toga što se želi smanjiti potrošnja materijala, kao i vrijeme izrade. Javljavaju se također problemi glede računala, zbog toga što nTopology je vrlo zahtjevan program koji crpi puno resursa poput radne memorije, a posebno grafičke kartice.



Slika 16. Polumjer sfere

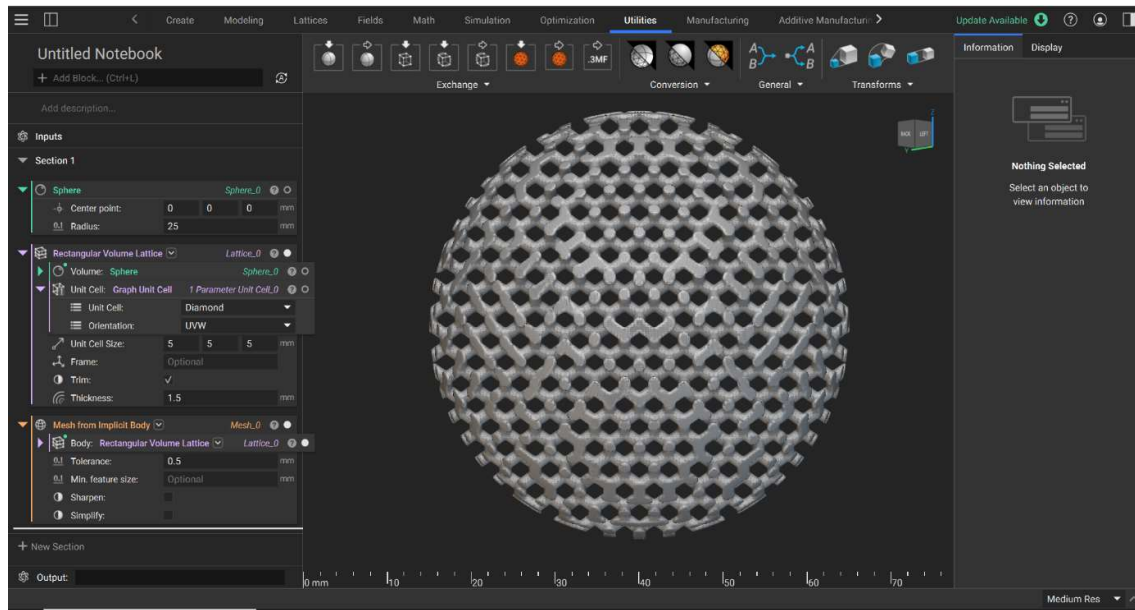
Ovo je varijabilan faktor jer će se izmijeniti tri vrste. Prva je „Diamond“, druga struktura je „Kelvin cell“ i treća je „Face centered cubic“. „Orientation“ ostaje konstantan, a „Unit cell size“ je $5 \times 5 \times 5$ mm.

Odabrana debljina tj. „thickness“ kao i „Unit cell“ neće se mijenjati, a odabrana debljina je 1,5 mm. Problemi koji nastaju prilikom odabira debljine rešetke, i veličine jedne ćelije se svode na to da ako se odabere predebela rešetka teško se uklanja support koji nastaje prilikom 3D ispisa, a također dolazi do spajanja dijelova rešetki i zbog toga se neće dobiti željeni rezultati. To vrijedi i za veličinu ćelije koja, ako se odabere premala, izaziva iste probleme kao i rešetka koja je predebela.



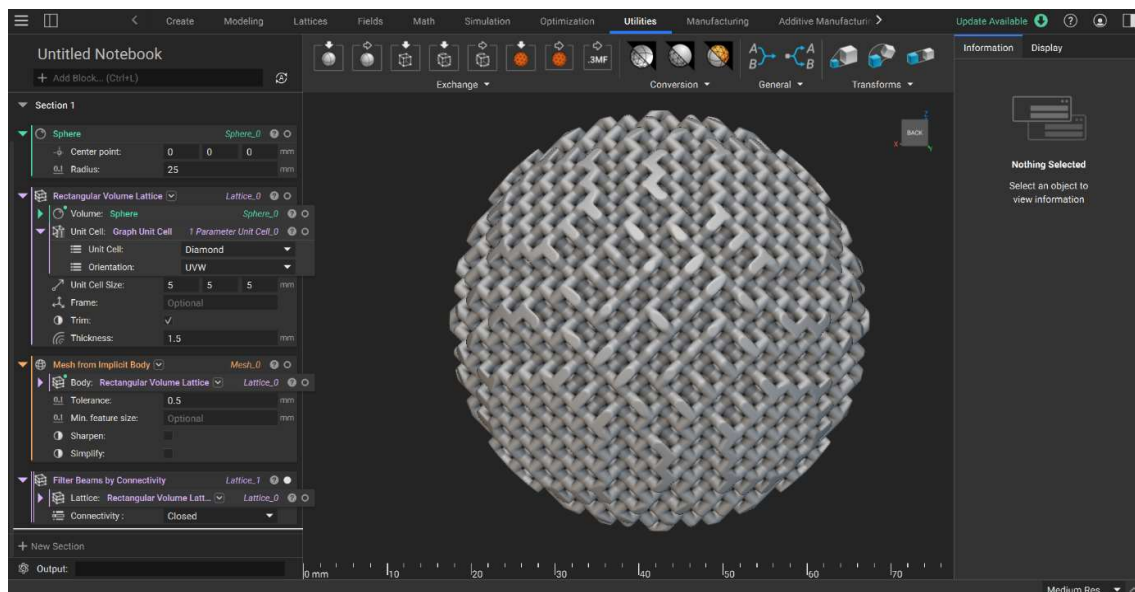
Slika 17. Rešetkasta struktura

Implicitno tijelo se koristi da se vizualizira model koji se zamisli. Taj model ne zahtjeva toliko puno resursa, zbog toga što nije potrebno eksplicitno računati rubove nego koristi jednostavne matematičke funkcije da opiše 3D tijelo. S druge strane *Mesh* je potreban da se definiraju rubovi modela, vertikalne i horizontalne linije. Potreban je da se datoteka može izvesti u STL formatu, jezik koji je potreban za 3D pisač. Slike 17 i 18 su različite jer je loptica prikazana u drugoj projekciji na kojoj se vidi da je geometrije loptice prolazna, što omogućava bolje i lakše čišćenje potporne strukture.

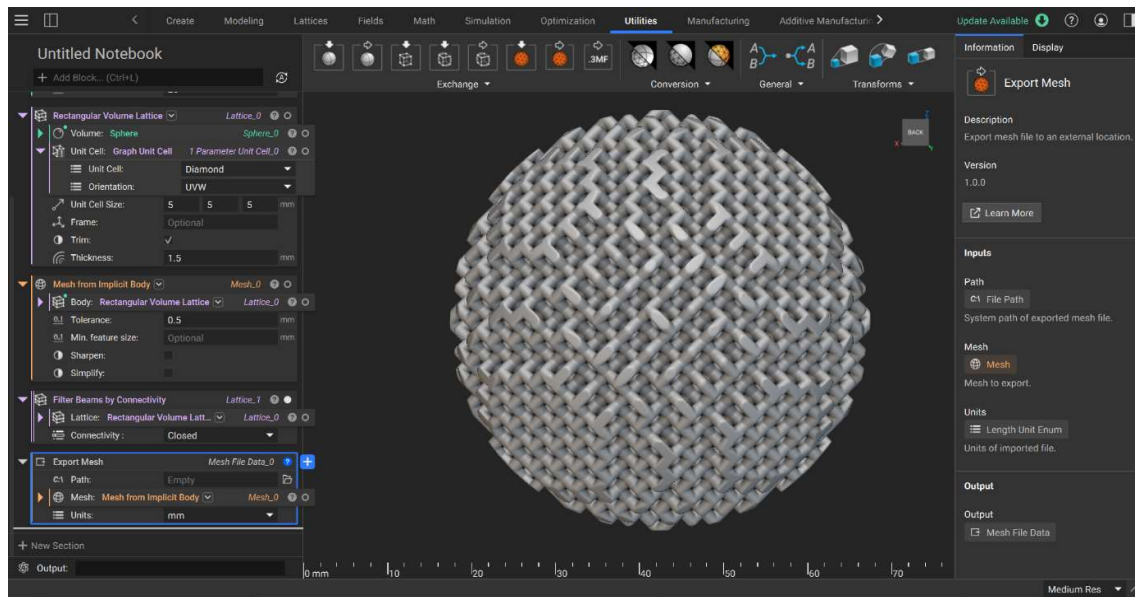


Slika 18. Optica nakon pretvaranja u *Mesh*

Pomoću funkcije „Filter Beam by Connectivity“ uklanja se višak tj. dijelove strukture koji strše, koji se mogu slomiti prilikom ispitivanja elastičnosti. Rezultat uklanjanja viška strukture prikazan je na slici 19.



Slika 19. Optica nakon uklanjanja viškova

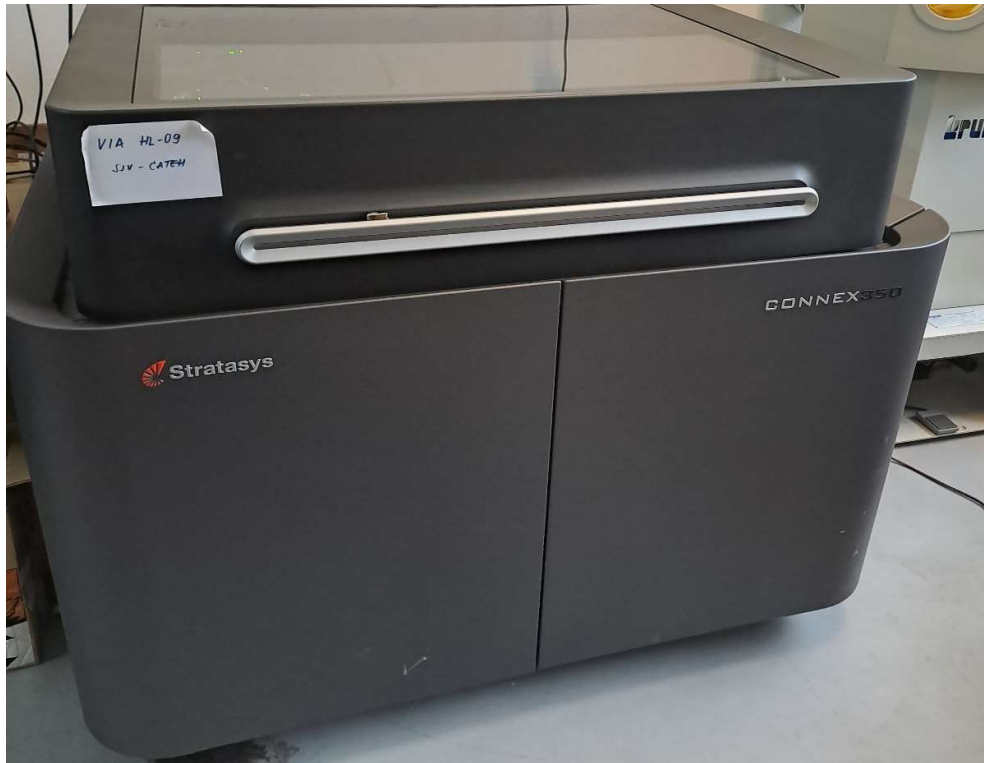


Slika 20 Izvoz datoteke u STL format

Zadnji korak koji je potreban je izvesti file kao STL, a to se ostvaruje s pomoću „Export Mesh“ funkcije koja se nalazi na kartici „Utilities“ na dijelu „Exchange“.

6.2. Ispis loptica

Loptice su ispisane na Polyjet 3D pisaču Stratasys Connex 350 na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Potrebno vrijeme 3D ispisa je 5,5 sati za jednu lopticu.

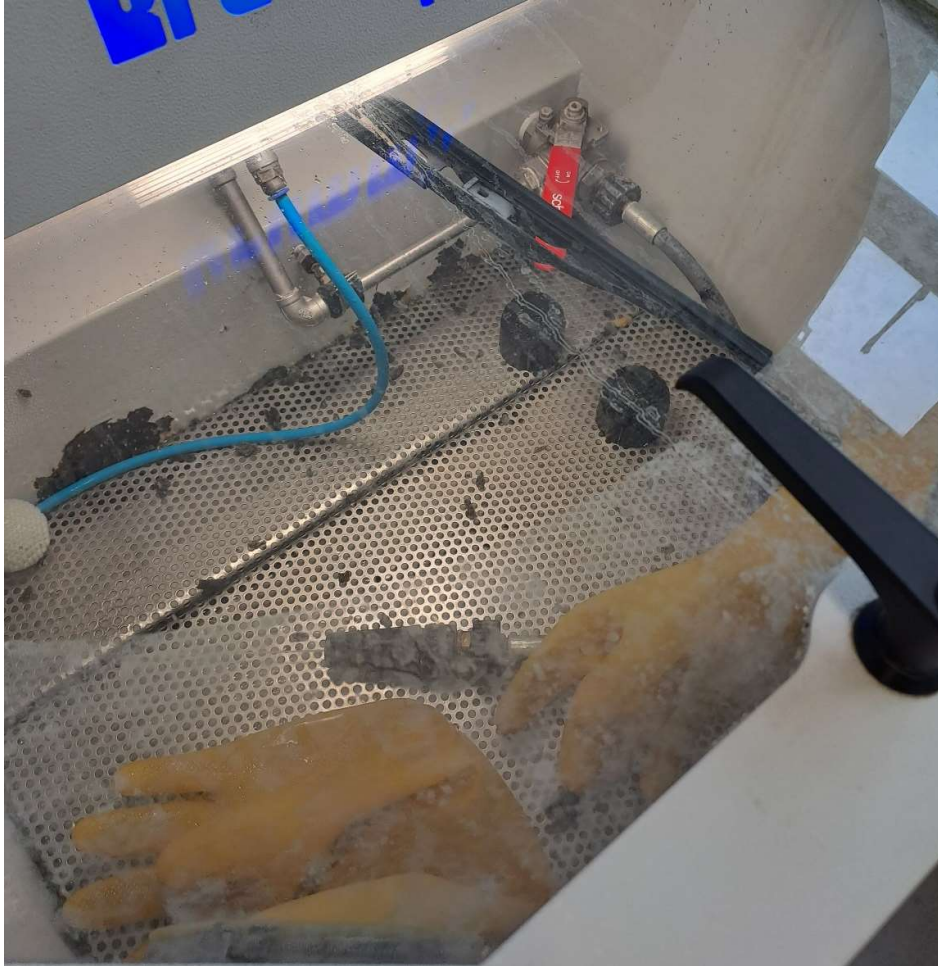


Slika 21. Stratasys CONNEX350



Slika 22. Ispisana loptica

Na slici 22 je prikazano kako izgleda loptica nakon 3D ispisa. Na njoj se nalazi potporna struktura i ona je crne boje, a materijal od kojeg je loptica ispisana je proziran.



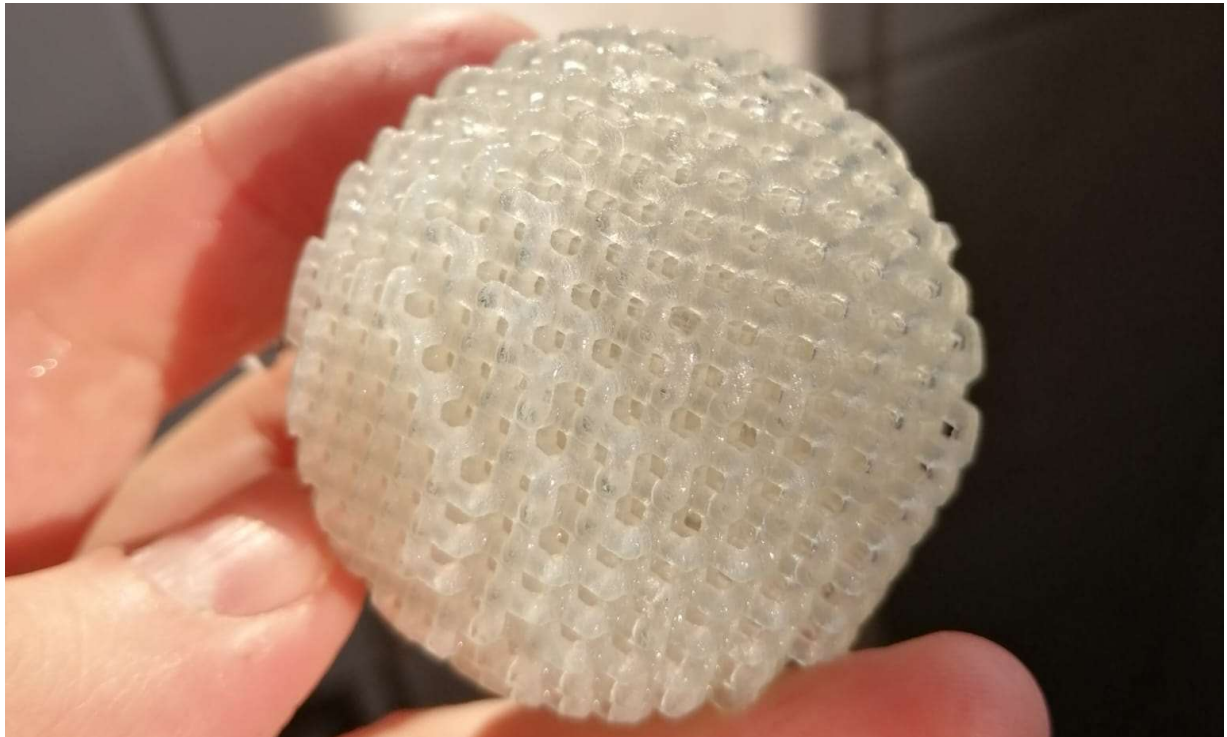
Slika 23. Water-jet uređaj za čišćenje suportne strukture

Na slici 23 se nalaze dvije loptice kojima nije skinuta potporna struktura i loptica koja je bijele boje nakon uklanjanja potporne strukture. Water-jet nije uspio ukloniti potpornu strukturu zbog toga što je razmak između rešetki vrlo mali, oko jednog milimetra. Na loptici broj 1 je najveći, a na loptici broj 2 je najmanji. Loptice će biti ostavljene u 2 postotnoj NaOH otopini da na 24 sata.



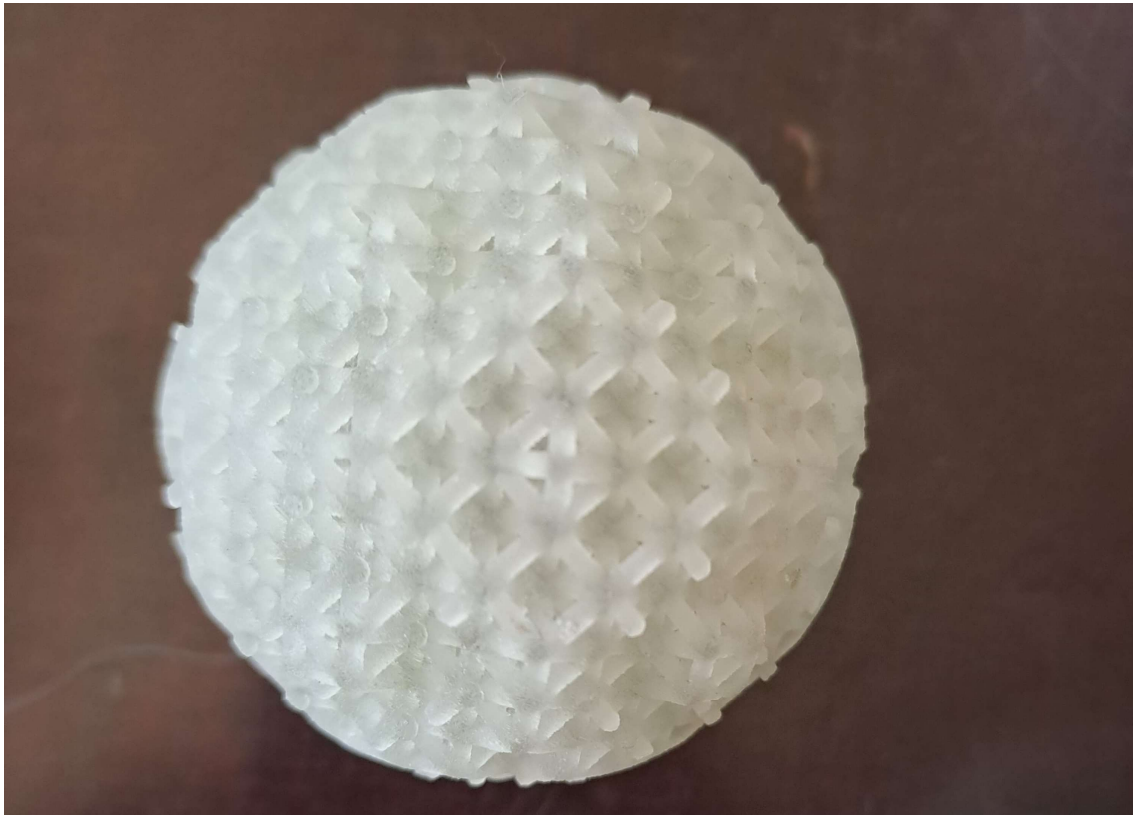
Slika 24. Ultrazvučna kada

Nakon što su loptice ostale 24 sata u otopini, stavljene su i ultrazvučnu kadu u kojoj se također nalaze u istoj otopini da bi se omekšala potporna struktura. Loptice su nakon vađenja iz ultrazvučne kade oprane vodom i ponovo su prošle kroz postupak uklanjanja suporna water-jet postupkom.



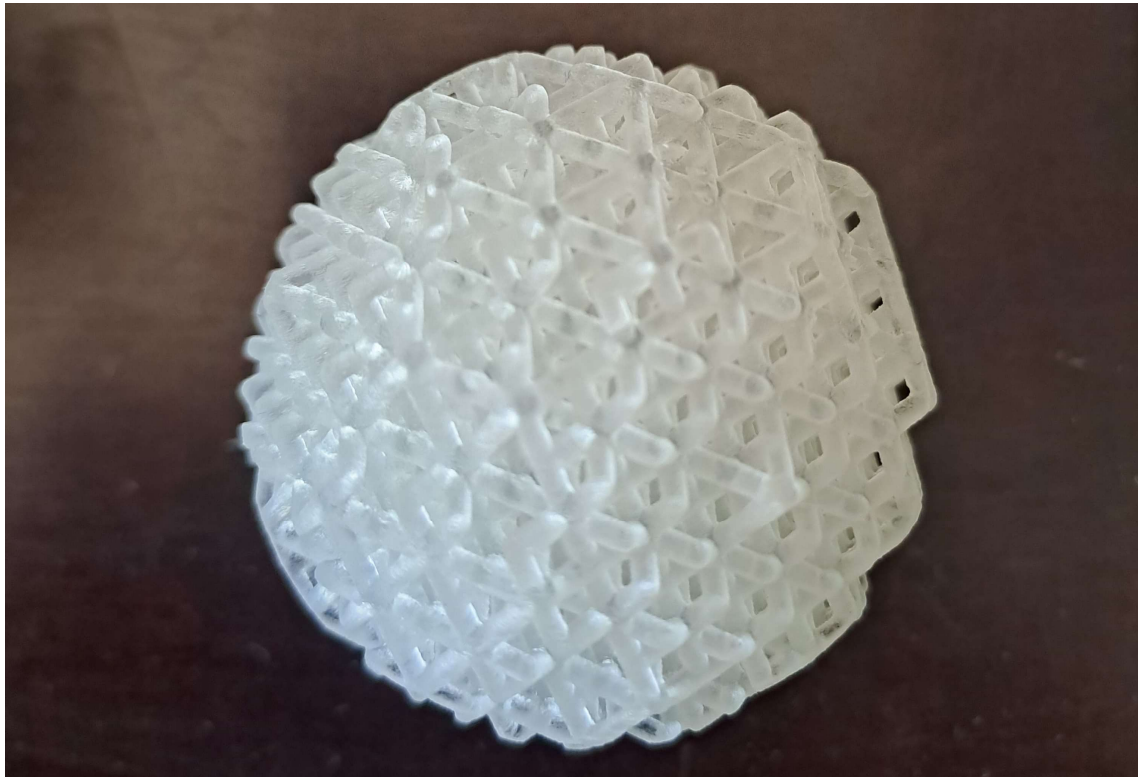
Slika 25. Loptica 1 nakon uklanjanja suportne strukture

Na slici 25 se nalazi prva loptica koja ima Diamond rešetku nakon uklonjenog potpornog materijala. Može se primijetiti da loptica ima relativno velike šupljine u rešetki, zbog čega je bilo lagano ukloniti potporni materijal, čak ovu lopticu nije bilo potrebno dodatno stavljati u ultrazvučnu kadu za omekšavanje potporne strukture.



Slika 26. Loptica 2 nakon uklanjanja suportne strukture

Na slici 26 se nalazi loptica 2 koja ima Kelvin cell rešetku. Iako su za sve loptice odabrani isti parametri ova loptica ima vrlo gustu rešetku. Gusta rešetka je razlog zbog kojeg je bilo teško ukloniti potpornu strukturu. Trebalo je više vremena za uklanjanje potporne strukture nego kod druge dvije loptice zajedno. Za ovu lopticu vrijeme provedeno na water-jet uređaju je 2 sata.



Slika 27. Loptica 3 nakon uklanjanja suportne strukture

Na slici 27 se nalazi loptica broj 3 koja ima FCC (Face centered cubic) rešetku. Uklanjanje potporne strukture na ovoj loptici je bilo teže nego na prvoj, a lakše nego na drugoj. Vrijeme provedeno na water-jet uređaju bilo je oko sat vremena.

Loptice su izvagane, a masa loptica je prikazana u tablici 1.

Tablica 1. Masa loptica

Ispitna tijela	Masa, g
Loptica 1	29,4
Loptica 2	31,1
Loptica 3	51,2

Tablica 2. Promjer loptica

Ispitna tijela	Promjer, mm
Loptica 1	48,97
Loptica 2	48,08
Loptica 3	50,6

6.3. Ispitivanje elastičnosti odbijanjem od podloge

Ispitivanje elastičnosti odbijanjem od podloge se vrši na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Oprema za ispitivanje odskoka od podloge prema normi ISO 8307:2018 se sastoji od vertikalne prozirne cijevi, unutarnjeg promjera od 30 mm do 65 mm. Kuglica promjera $16 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ i mase od $16,8 \text{ g} \pm 1,5 \text{ g}$ spušta se vertikalno na ispitni komad kroz cijev s visine od $500 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$. Kuglica mora biti puštena tako da pada bez rotacije i da je učinkovito centrirana.

Ovo ispitivanje se uobičajeno provodi prema normi ISO 8307:2018, ali zbog nedostatka opreme koju propisuje norma, provedeno je jednostavno ispitivanje.

Na komad drveta je zalijepljen metar koji će pokazivati koliko je loptica odskočila, izmjerenu visinu treba oduzeti od 52 cm kako bi se dobila konačna visina odbijanja, jer metar mjeri visinu počevši od 52 cm prema (slika 28). Svaka loptica je bačena 5 puta. Na slici 28 je prikazana visina s koje su bačene sve loptice.

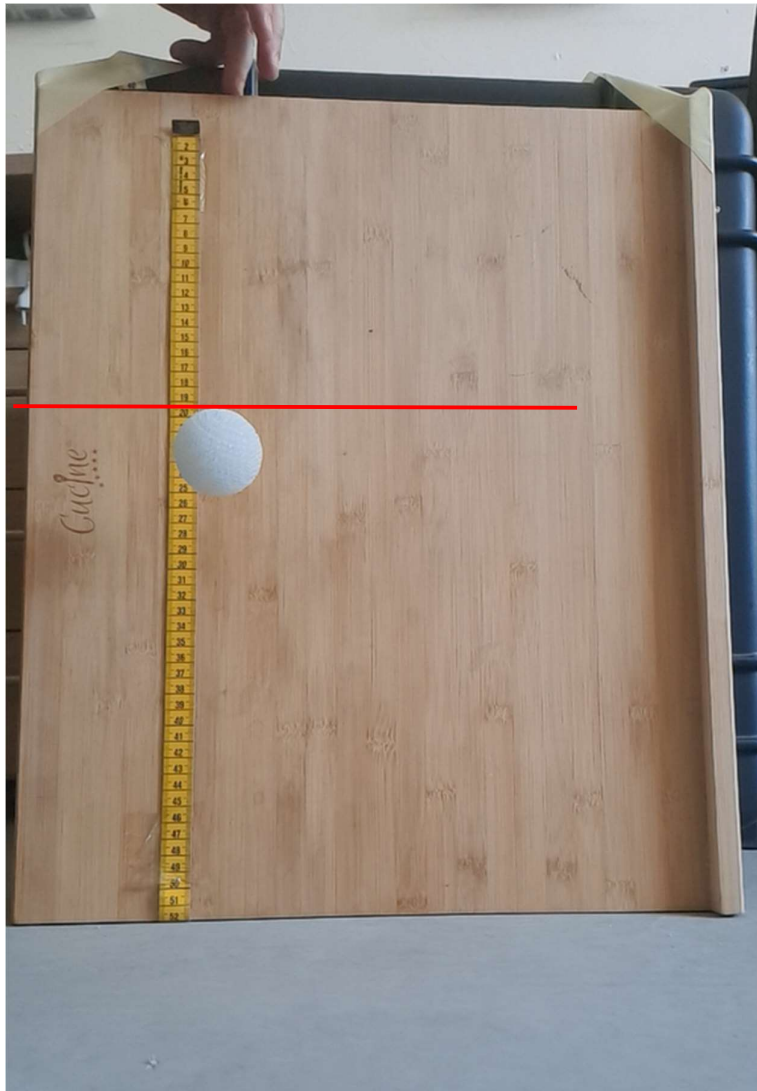


Slika 28. Ispitivanje elastičnosti loptice odbijanjem od podloge

U tablici 3. prikazane su vrijednosti ispitivanja elastičnosti odbijanjem od podloge loptice 1, a dobivena srednja vrijednost visine kojom lopta odskoči od podloge je 46,3 cm.

Tablica 3. Vrijednosti ispitivanja elastičnosti odbijanjem od podloge - loptica 1

Bacanje	1	2	3	4	5	Srednje vrijednosti odskoka	Standardna devijacija
Visina odbijanja, cm	32,5	39,5	40	36	35	46,3	3,15



Slika 29. Loptica 1 - ispitivanje elastičnosti odbijanjem od podloge

U tablici 4. prikazane su vrijednosti ispitivanja elastičnosti odbijanjem od podloge loptice 2, a dobivena srednja vrijednost visine kojom lopta odskoči od podloge je 29,6 cm.

Tablica 4. Vrijednosti ispitivanja elastičnosti odbijanjem od podloge - loptica 2

Bacanje	1	2	3	4	5	Srednje vrijednosti odskoka	Standardna devijacija
Visina odbijanja, cm	30	27,5	31	32,5	27	29,6	2,33

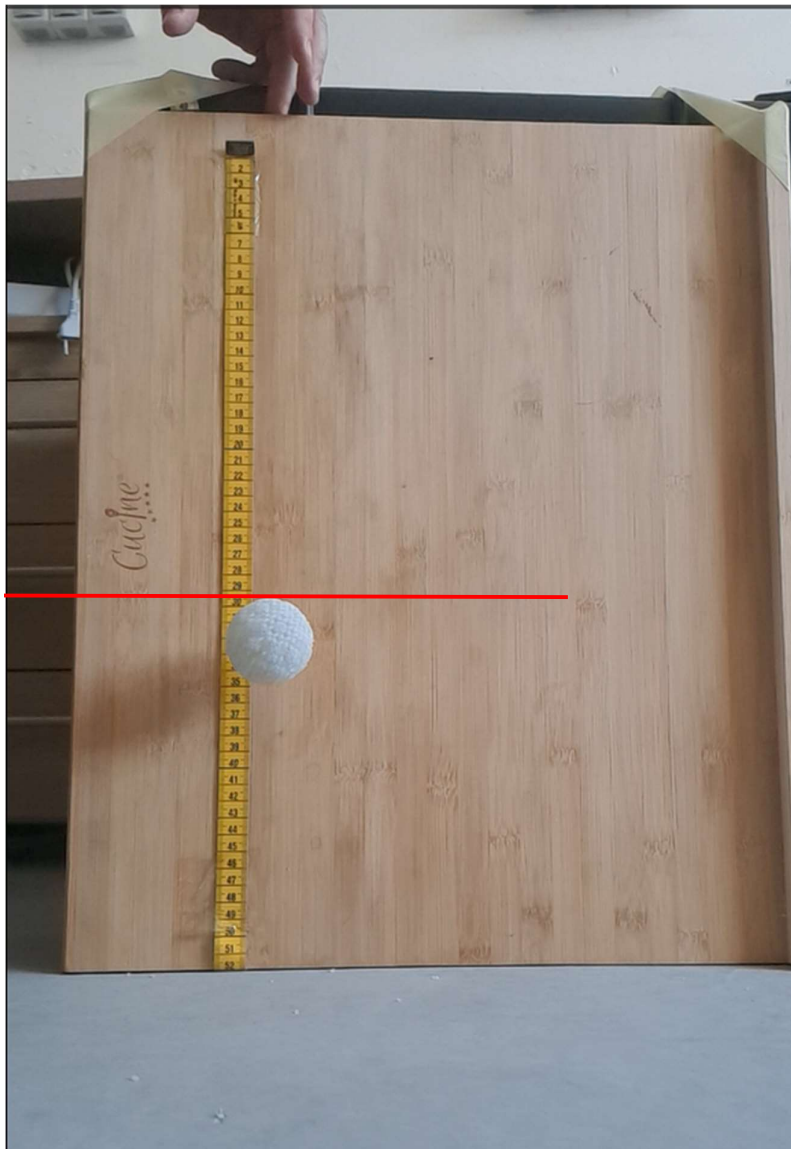


Slika 30. Loptica 2 - ispitivanje elastičnosti odbijanjem od podloge

U tablici 5 prikazane su vrijednosti ispitivanja elastičnosti odbijanjem od podloge loptice 3, a dobivena srednja vrijednost visine kojom lopta odskoči od podlogu je 21,2 cm.

Tablica 5. Vrijednosti ispitivanja elastičnosti odbijanjem od podloge - loptica 3

Bacanje	1	2	3	4	5	Srednje vrijednosti odskoka	Standardna devijacija
Visina odbijanja, cm	22	17	22,5	25,5	19	21,2	3,29



Slika 31. Loptica 3 - ispitivanje elastičnosti odbijanjem od podloge

Tablica 6. Sažetak srednjih visina odbijanja i standardnih devijacija

Uzorak	Loptica 1	Loptica 2	Loptica 3
Srednja visina, cm	46,3	29,6	21,2
Standardna devijacija	3,15	2,33	3,29

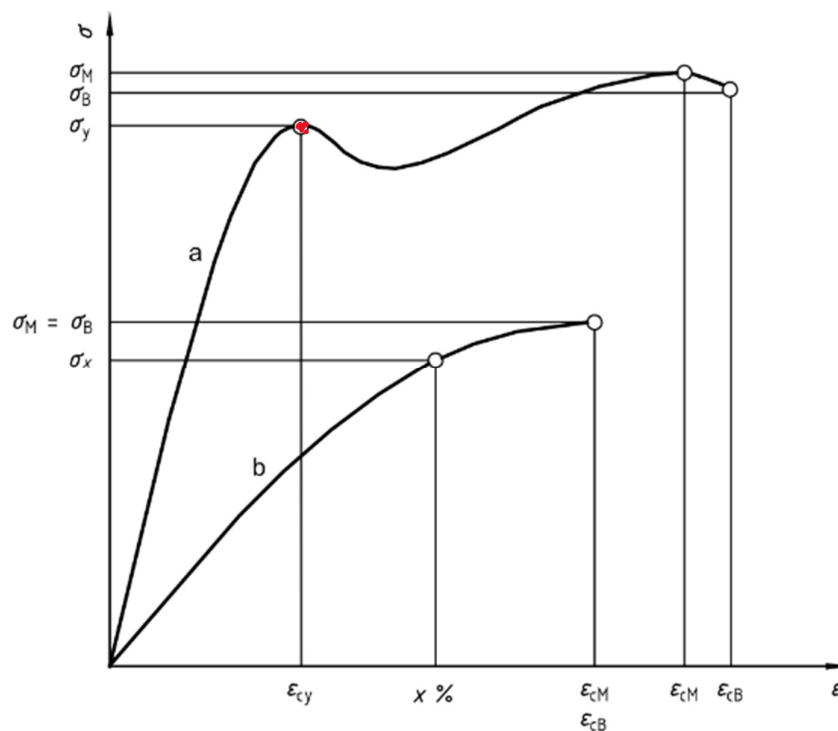
Iz tablice 6. može se zaključiti da loptica 1 pokazuje najvišu elastičnost. Masa loptica također utječe na visinu odbijanja od podloge, no u usporedbi loptice 1 i loptice 2, razlika u masi je vrlo mala (5,5 %), dok je razlika u visini odbijanja velika (56,4 %). Loptica 3 ima najveću masu (74,1 % veću od loptice 1) no i najmanje odbijanje – elastično ponašanje (2,2 puta manja visina odbijanja od loptice 1).

6.4. Norma za određivanje pritisnih svojstava plastike (ISO 604:2002; EN ISO 604:2003)

Norma koja se koristi za određivanje pritisnih svojstava plastike (ISO 604:2002; EN ISO 604:2003). Ova međunarodna norma specificira metodu za određivanje svojstava stlačivosti plastike pod definiranim uvjetima. Definiran je standardno ispitno tijelo, ali njegov oblik može biti prilagođen kako bi se spriječilo savijanje pod opterećenjem da ne utječe na rezultate.

Postupak se koristi za istraživanje stlačivog ponašanja ispitnih tijela i za određivanje pritisne čvrstoće i modula pritisnosti.

Za primjenu deformacijskog opterećenja na ispitno tijelo koriste se kaljeni čelični tlačni valjci. Na slici 32. crvenom bojom je označena točka gdje dolazi povećanja deformacije bez povećanja naprežanja. U toj točki dolazi do pukotina unutar same strukture.



Slika 32. Dijagram naprežanje pomak

Uređaj za ispitivanje mora biti sposoban održavati brzine ispitivanja kako je specificirano u Tablici 7. Ako se koriste druge brzine, uređaj mora biti sposoban održavati brzinu unutar tolerancije od $\pm 20\%$ za brzine manje od 20 mm/min i $\pm 10\%$ za brzine veće od 20 mm/min.

Tablica 7. Preporučene brzine ispitivanja

Brzina ispitivanja mm/min	Tolerancija %
1	± 20
2	± 20
5	± 20
10	± 20
20	± 10

Indikator opterećenja treba sadržavati mehanizam koji može precizno pokazati ukupnu pritisnu silu koju ispitno tijelo podnosi. Taj mehanizam treba imati minimalno inercijsko kašnjenje pri određenoj brzini ispitivanja te bi trebao prikazivati opterećenje s preciznošću od $\pm 1\%$ ili bolje u odnosu na relevantnu vrijednost.

Ispitna tijela koji se koriste u ispitivanju trebaju biti pripremljena prema primjenjivim specifikacijama materijala. U slučaju nedostatka takvih specifikacija, ili ako nije drugačije dogovoreno, ispitna tijela bi trebala biti pripremljena prema standardima poput ISO 293, ISO 294-1, ISO 295 ili ISO 10724-1.

Sve operacije pripreme uzoraka moraju biti izvedene s pažnjom kako bi rezultirale glatkim površinama ispitnih tijela.

Ispitna tijela ne smiju biti oštećeni na način koji bi mogao narušiti integritet materijala. Sredstvo za označavanje koje se koristi ne bi smjelo negativno utjecati na materijal koji se ispituje i treba biti minimalno invazivno.

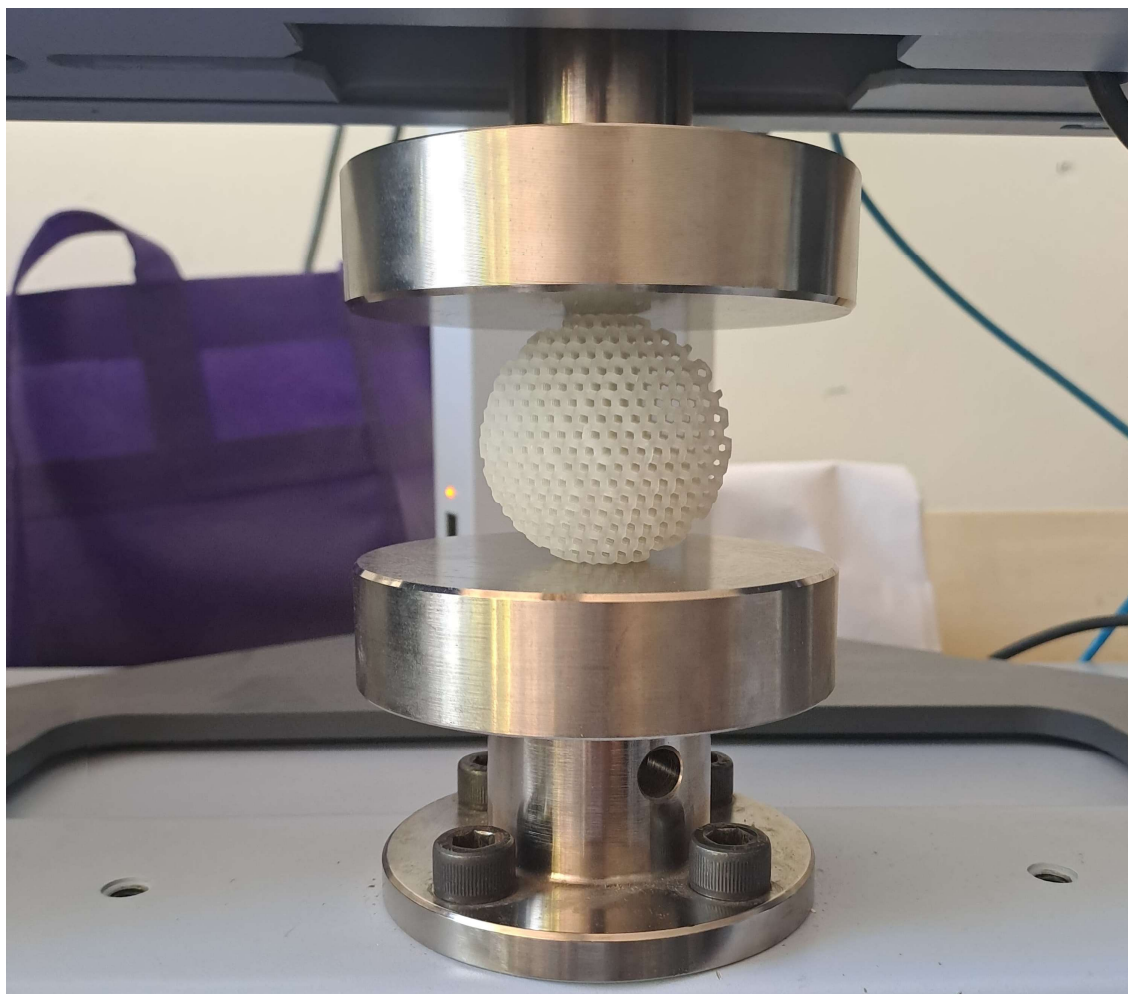
Ispitna tijela ne bi trebala imati nikakve zakrivljenosti. Površine i rubovi trebaju biti bez ogrebotina, udubljenja, tragova brizganja, oštih rubova i drugih nedostataka koji bi mogli utjecati na rezultate ispitivanja. Površine koje su u kontaktu s kompresijskim pločama trebaju biti paralelne i okomite na longitudinalni smjer.

U slučaju anizotropnih materijala, uzorci bi trebali biti odabrani tako da se kompresijski stres primjenjuje u smjeru koji je sličan onom koji materijal doživljava u stvarnoj uporabi, ako je takav smjer poznat.

Za potrebe ovog rada, primijenjena je oprema specificirana normom ISO 604:2002; EN ISO 604:2003, međutim nisu korišteni propisani oblici ispitnih tijela, jer norma ne propisuje oblikovanje ispitnih tijela od rešetkastih struktura.

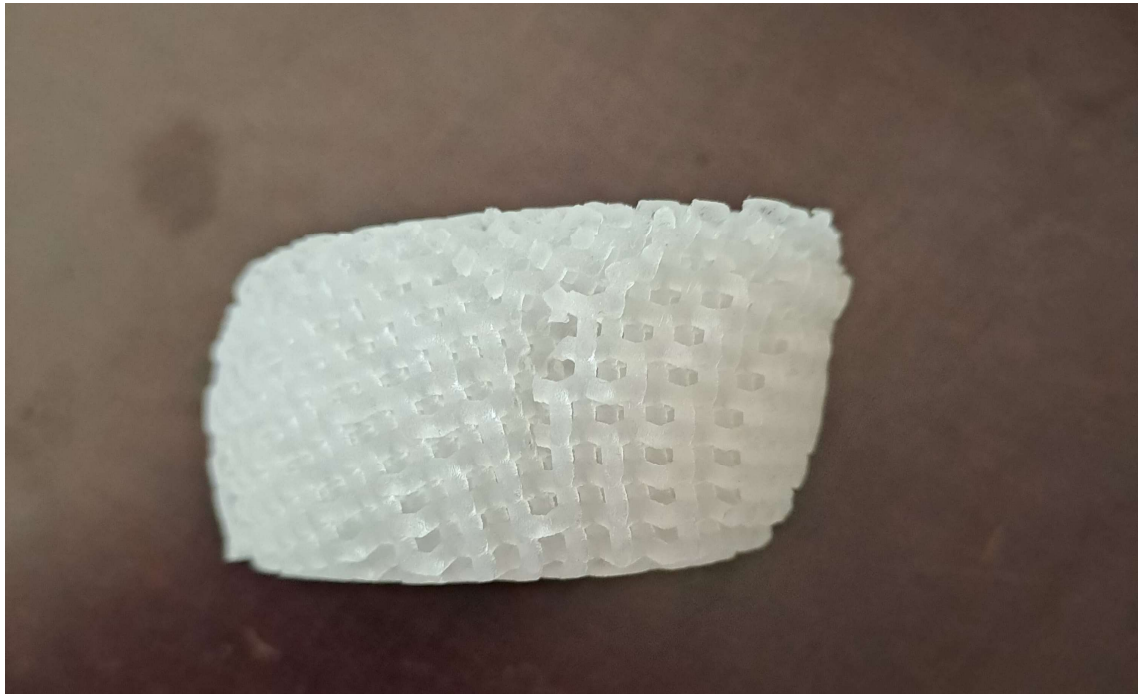
6.5. Ispitivanje pritisknih svojstava

Ispitivanje pritisknih svojstava loptice je provedeno na univerzalnoj kitalici Shimadzu AGS – X pritiskne sile do 10 kN, a ispitivanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

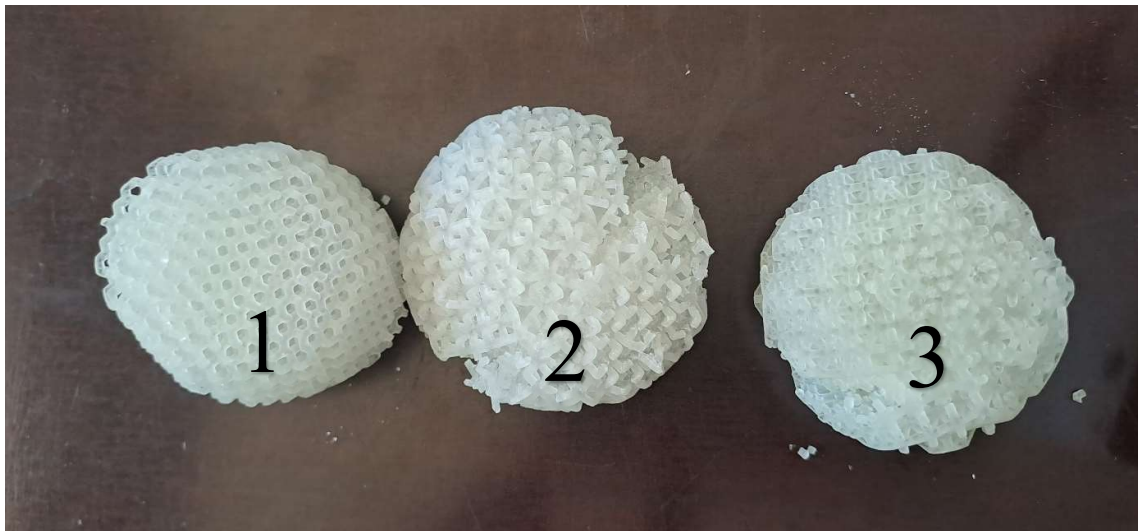


Slika 33.. Loptica 1 – ispitivanje pritisknih svojstava na kitalici

Na slici 33 je prikazana loptica 1 koja se nalazi između nepomične i pomične čeljusti za ispitivanje pritisnih svojstava.

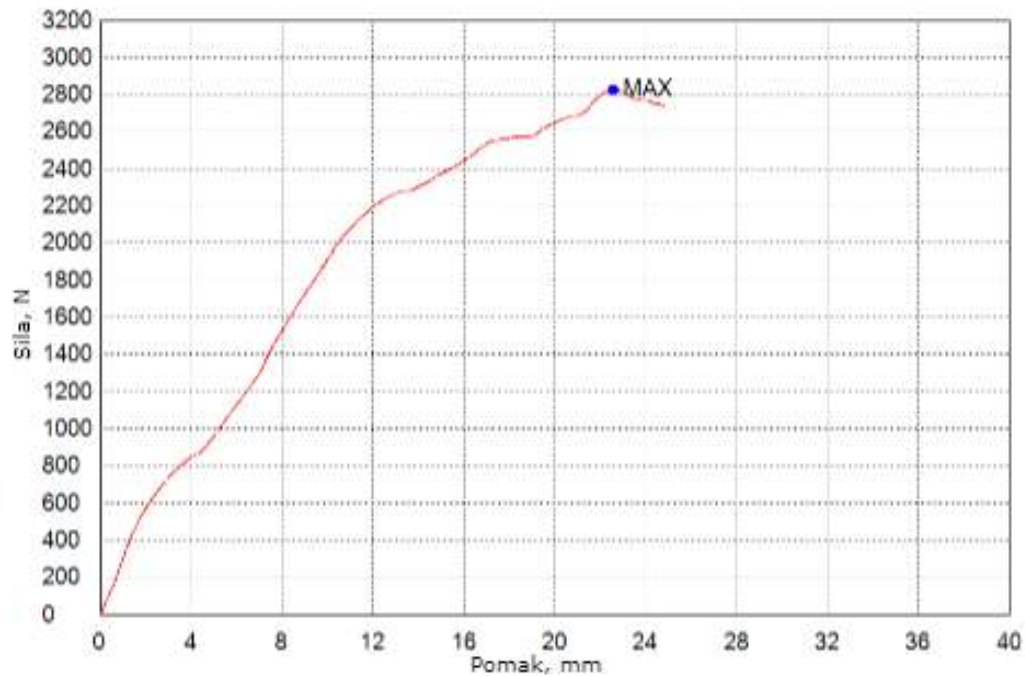


Slika 34. Loptica 1 nakon ispitivanja pritisnih svojstava na kidalici

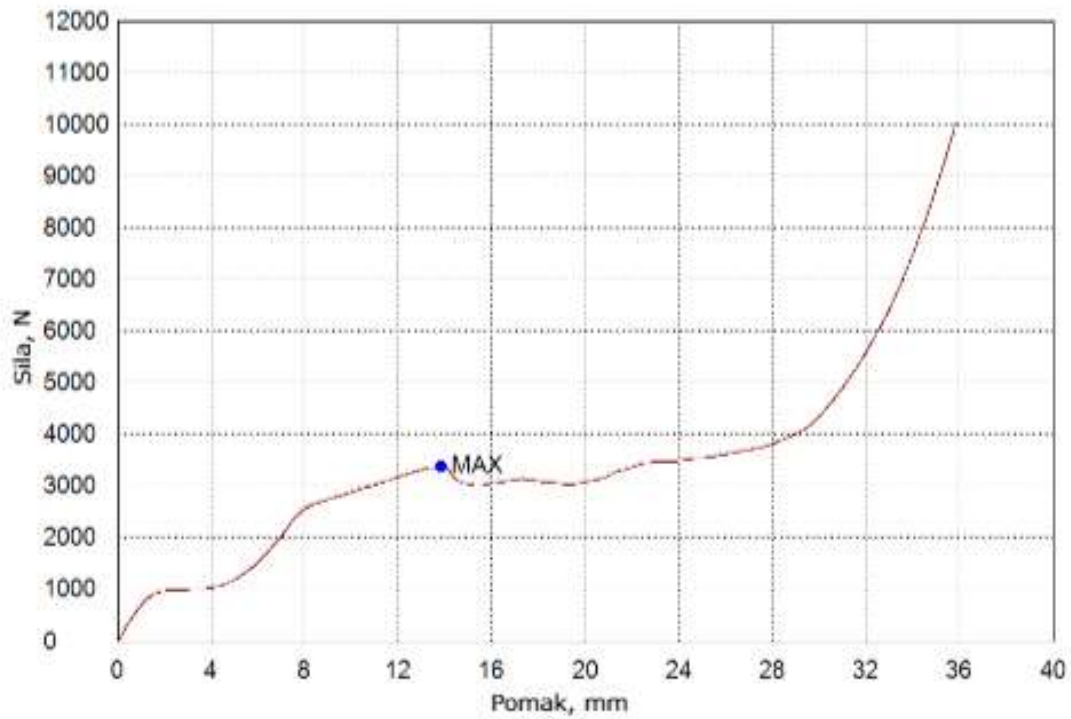


Slika 35. Loptice nakon ispitivanja pritisnih svojstava na kidalici

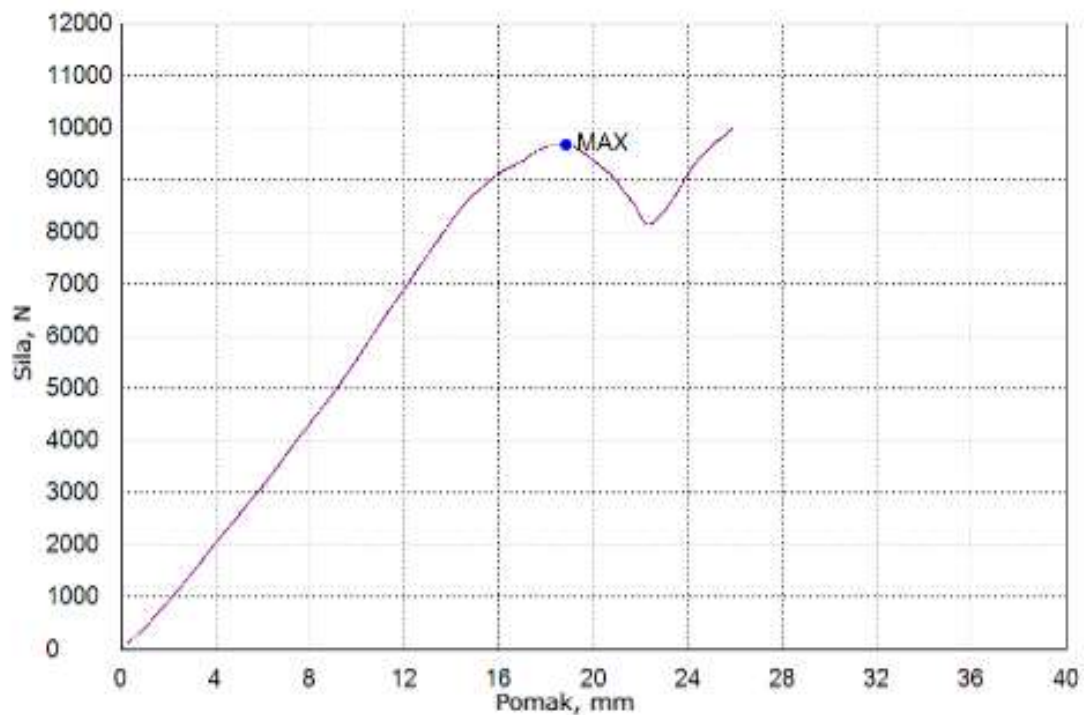
Na slikama 35, 36 i 37 se nalaze dijagrami koji prikazuju rezultate pritiskog ispitivanja na kidalici. Plavom točkom je označeno mjesto gdje dolazi do pucanja materijala loptice koje se ujedno smatra maksimalnom pritiskom silom koju loptice mogu izdržati prije loma.



Slika 36. Dijagram pritiska sila – pomak – loptica 1



Slika 37. Dijagram pritiska sile – pomak – loptica 2



Slika 38. Dijagram pritiska sile – pomak – loptica 3

U tablici 8. su prikazani iznosi sila i pomaka u trenutku loma. Iz tablice se može zaključiti da loptica 3 podnosi najvišu silu, a loptica 1 najnižu. Loptica 1 pri tome ima i u ovom slučaju najveću elastičnost, jer može podnijeti najveću deformaciju prije pojave loma.

Tablica 8. Sažetak Maksimalnih sila i pomaka (deformacije)

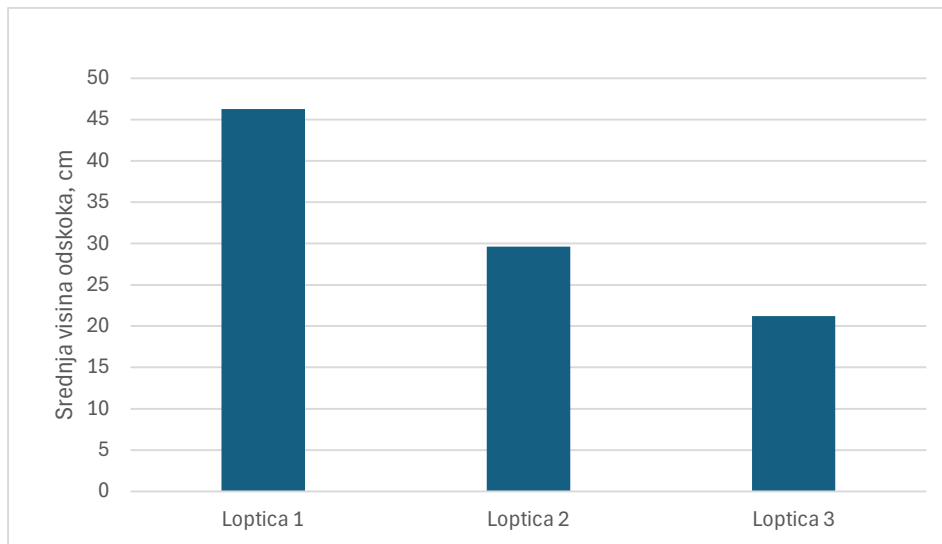
Ispitna tijela	Maksimalna sila, N	Maksimalni pomak, mm
Loptica 1	2823	22,6
Loptica 2	3367	13,8
Loptica 3	9672	18,8

6.6. Analiza i usporedba rezultata

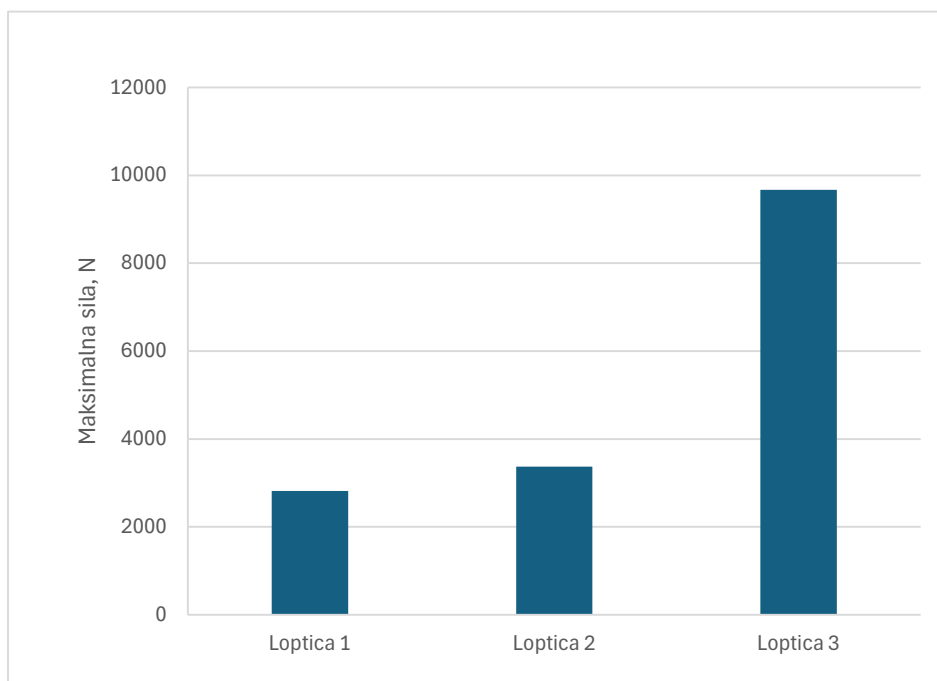
Tablica 9 sadrži sve bitne izmjerene veličine koje su izmjerene u ovom radu.

Tablica 9. Sažetak ispitivanih svojstava ispitnih tijela

Ispitno tijelo	Masa, g	Srednja visina odskoka, cm	Maksimalna sila, N	Maksimalni pomak, mm
Loptica 1	29,4	46,3	2823	22,6
Loptica 2	31,1	29,6	3367	13,8
Loptica 3	51,2	21,2	9672	18,8



Slika 39. Usporedba srednje visina odskoka



Slika 40. Usporedba maksimalne sile

Iz tablice 9 mogu se donijeti određeni zaključci:

- Loptica 1 ima najmanju masu, zbog toga što ima najveći pomak prije pojave loma ima najbolja elastična svojstva. Odlična elastična svojstva omogućavaju joj da odskoči najviše kada se baci od podlogu. No istodobno može podnijeti najmanju pritisnu silu.

- Loptica 2 ima srednju masu u usporedbi sa druge dvije loptice, ima najmanji pomak prije pojave loma što znači da ima lošija elastična svojstva. Razlog zbog kojeg može više odskočiti od loptice 3 djelomično je taj što loptica 3 ima bitno veću masu od loptice 2. Maksimalna sila koju može podnijeti prije pojave prvih lomova je u rasponu između loptice 1 i loptice 3.
- Loptica 3 ima najveću masu, zbog toga će imati najmanju visinu odskoka. Ima srednju vrijednost maksimalnog pomaka, u rasponu između loptice 1 i loptice 2. Maksimalna sila koju može podnijeti loptica 3 prije pojave prvih pukotina je gotovo tri puta veća od sile koju može podnijeti loptica 2 i gotovo četiri puta veća od loptice 1.

Loptice imaju jednake debljine rešetke, jednake veličine ćelija, jedina je razlika u vrsti rešetke pa se na temelju toga može donijeti zaključak da oblik rešetke utječe na mehanička svojstva loptice.

Loptice koje imaju veću masu, ne moraju imati lošija elastična svojstva, ali će imati lošiju visinu odskoka zbog mase. Može se donijeti zaključak, da s rastom masom raste i maksimalna sila koju rešetka može podnijeti.

Loptice koje imaju manju masu, ne moraju imati bolja elastična svojstva, ali će imati bolju visinu odskoka zbog manje mase.

U konačnici, zaključak je da na mehanička i elastična svojstva najviše utječe oblik rešetke, pri čemu je oblik rešetke koji izdržava najvišu pritisnu silu - FCC.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je utjecaj oblika rešetkastih struktura na mehanička svojstva loptice. Ukratko je opisana aditivna tehnologija kao i postupci aditivne tehnologije i materijali koji se najčešće koriste u aditivnim postupcima.

Rešetkaste strukture nije moguće proizvesti pomoću konvencionalnih postupaka proizvodnje, a jedini način da se proizvedu je s pomoću aditivnih postupaka.

Iz rezultata ispitivanja može se zaključiti da oblik rešetke ima najveći utjecaj na mehanička i elastična svojstva.

„Diamond“ oblik rešetke ima najbolja elastična svojstva, no može podnijeti najmanju silu, „Kelvin cell“ oblik rešetke ima najlošija elastična svojstva, dok „Face Centered Cubic“ oblik može podnijeti najveću silu.

Iz navedenog se može zaključiti da je „Diamond“ oblik najprimjereniji za primjene koje zahtijevaju dobra elastična svojstva, a „Face Centered Cubic“ za primjene gdje je glavni zahtjev podnijeti veliko opterećenje.

Masa ne mora izravno utjecati na elastična svojstva, ali utječe na visinu odskoka kao i na maksimalnu silu prije pojave prvih lomova kod rešetke.

Gledajući sve rezultate ispitivanja može se primijetiti da loptice s većom masom mogu podnijeti velike sile. Problemi koji se javljaju kod ovakvih struktura su vremena izrade koja su dugačka i vrijeme potrebno za uklanjanje potporne strukture, zbog manjih međuprostora između rešetki

LITERATURA

- [1] Liang Hao, David Raymont, Chunze Yan, Ahmed Hussein and Philippe Young, Design and Additive Manufacturing of Cellular Lattice Structures, 2014.
- [2] <https://www.ntop.com/resources/blog/guide-to-lattice-structures-in-additive-manufacturing/> ,11.3.2024
- [3] Ian R. Woodward , Catherine A. Fromen, Scalable, process-oriented beam lattices: Generation, characterization, and compensation for open cellular structures
- [4] <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/3mf-releases-beam-lattice-extension-3d-printing/> , 30.4.2024
- [5] Shixiang Yu, Jinxing Sun, Jiaming Bai, Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing, Materials & Design, Volume 182,2019,108021,ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108021>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127519304599>)
- [6] Jiawei Feng, Jianzhong Fu, Xinhua Yao, Yong He, Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications <https://dx.doi.org/10.1088/2631-7990/ac5be6>
- [7] <https://www.researchgate.net/publication/353504299/figure/fig1/AS:1050358851858432@1627436473462/The-six-triply-periodic-minimal-surface-TPMS-geometries-used-in-this-study-All-at-02.png>, 30.4.2024
- [8] Tiju Thomas & Gaurav Tiwari (2019): Crushing behavior of honeycomb structure: a review, International Journal of Crashworthiness, DOI: 10.1080/13588265.2018.1480471
- [9] <https://engineerdog.com/2015/03/08/3d-printing-a-3d-honeycomb-infill-concept/>, 30.4.2024
- [10] Kaufui V. Wong, Aldo Hernandez, A Review of Additive Manufacturing <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- [11] Abdulhameed O, Al-Ahmari A, Ameen W, Mian SH. Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. Advances in Mechanical Engineering. 2019;11(2). doi:10.1177/1687814018822880
- [12] <https://amfg.ai/2023/02/16/the-complete-starting-guide-to-additive-manufacturing-technologies/>, 30.4.2024
- [13] <https://www.3dnatives.com/en/polyjet100420174/> 30.4.2024

- [14] Ruben Bayu Kristiawan, Fitriani Imaduddin, Dody Ariawan, Ubaidillah, and Zainal Arifin
A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters
- [15] <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05663-6>
- [16] <https://www.centropiaggio.unipi.it/sites/default/files/course/material/2013-12-06%20-%20Stereolithography.pdf> ,30.4.2024
- [17] <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/9/1138>, 30.4.2024
- [18] <https://formlabs.com/eu/blog/what-is-selective-laser-sintering/>, 30.4.2024
- [19] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-SLS-process_fig2_262574639,
30.4.2024
- [20] <https://www.engineersgarage.com/3d-printing-processes-binder-jetting-part-4-8/>,
30.4.2024
- [21] <https://www.amamweb.org/Processes/Binder-Jetting.aspx>, 30.4.2024
- [22] <https://www.manufacturingguide.com/en/multi-jet-fusion-mjf>, 30.4.2024
- [23] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/directed-energy-deposition>,
30.4.2024
- [24] <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/what-is-ded-3d-printing>, 30.4.2024
- [25] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pla#HowisitMade>,
30.4.2024
- [26] <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/abs-3d-printing-filament/>, 30.4.2024
- [27] <https://www.adm.hr/filament-za-3d-printer-abs-175mm-1kg-narancasta/76458/product/>,
30.4.2024
- [28] <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/petg-3d-printing-filament/>, 30.4.2024
- [29] <https://www.ensingerplastics.com/en/thermoplastic-materials/pa-polyamide>, 30.4.2024
- [30] <https://www.sys-uk.com/materials/polyjet/veroclear/>, 30.4.2024
- [31] <https://store.goengineer.com/products/veroclear-rgd810-1kg-pack-of-2>, 30.4.2024

PRILOZI

I. Karakteristike PolyJet 3D pisača Stratasys Connex 350

Prilog I. Karakteristike 3D Polyet pisača

System Specifications	
Model Materials	<p>Rigid Opaque: VeroPureWhite™, VeroWhitePlus™, VeroBlackPlus™, VeroGray™, VeroBlue™, VeroCyan™, VeroMagenta™, VeroYellow™</p> <p>Rubber-like: Agilus30™, TangoPlus™, TangoBlackPlus™, TangoBlack™, TangoGray™</p> <p>Transparent: VeroClear™ and RGD720</p> <p>Simulated Polypropylene: Rigur™ and Durus™</p> <p>High Temperature</p> <p>Bio-compatible</p>
Digital Materials	<p>Digital ABS Plus™ and Digital ABS2 Plus™ in ivory and green</p> <p>Hundreds of vibrant, repeatable colors in opaque and translucent</p> <p>Rubber-like blends in a range of Shore A values and color</p> <p>Simulated polypropylene materials with improved heat resistance</p>
Material Options	Over 1,000
Maximum Materials per Part	82
Support Material	SUP705 (WaterJet removable), SUP706B (soluble)
Maximum Build Size (XYZ)	<p>Objet350: 342 x 342 x 200 mm (13.4 x 13.4 x 7.9 in.)</p> <p>Objet500: 490 x 390 x 200 mm (19.3 x 15.4 x 7.9 in.)</p>
System Size	<p>1400 x 1260 x 1100 mm (55.1 x 49.6 x 43.4 in.)</p> <p>Material Cabinet: 330 x 1170 x 640 mm (13 x 46.1 x 26.2 in.)</p>
System Weight	<p>430 kg (948 lbs.)</p> <p>Material Cabinet: 76 kg (168 lbs.)</p>
Resolution	X-axis: 600 dpi; Y-axis: 600 dpi; Z-axis: 1600 dpi
Accuracy ¹	Typical deviation from STL dimensions, for models printed with rigid materials, based on size: under 100 mm – ±100µ; above 100 mm – ±200µ or ± 0.06% of part length, whichever is greater.
Minimum Layer Thickness	Horizontal build layers as fine as 16 microns (.0006 in.)
Build Modes	<p>Digital Material: 30-micron (.001 in.) resolution</p> <p>High Quality: 16-micron (.0006 in.) resolution</p> <p>High Speed: 30-micron (.001 in.) resolution</p>
Software	Objet Studio intuitive 3D printing software
Workstation Compatibility	Windows 7/ Windows 8. Compatible with GrabCAD Print for use with job reports, scheduling and reports monitoring.
Network Connectivity	LAN - TCP/IP
Operating Conditions	Temperature 18 – 25 °C (64 – 77 °F); relative humidity 30 – 70% (non-condensing)
Power Requirements	110-240 VAC 50/60Hz; 1.5 kW single phase
Regulatory Compliance	CE, FCC

¹ These results are valid for about 95% of printed models, measured when ambient temperature is 23 °C and relative humidity is 50%.