

Utjecaj oblika ispune na pritisnu čvrstoću 3D-ispisanih proizvoda

Križetić, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:462947>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-09**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Karlo Križetić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Godec

Student:

Karlo Križetić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Damiru Godecu za pomoć pri izradi rada, izv. prof. dr. sc. Ani Pilipović i mag. ing. Andriji Zaplatiću na ispitivanju uzoraka i pomoći pri obradi podataka.

Karlo Križetić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne 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 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **KARLO KRIŽETIĆ** Mat. br.: 0035204415

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ OBLIKA ISPUNE NA PRITISNU ČVRSTOĆU 3D-ISPISANIH PROIZVODA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **INFLUENCE OF INFILL SHAPE ON COMPRESSION STRENGTH OF 3D-PRINTED PRODUCTS**

Opis zadatka:

Postupci 3D-ispisa primjenjuju se za izradu proizvoda koji imaju sve širu primjenu, te se sve češće primjenjuju kao konačni proizvodi, a ne više isključivo kao prototipovi. Jedan od važnijih postupaka 3D-ispisa je taložno očvršćivanje (eng. *Fused Deposition Modelling* - FDM ili *Fused Filament Fabrication* - FFF). Značajka tog postupka je mogućnost izrade proizvoda sa šupljikavim strukturama-ispunama, umjesto s kompaktnim presjecima. Time je omogućeno smanjivanje mase 3D-ispisanog proizvoda i skraćivanje vremena izrade. Međutim, primjena takve strukture presjeka utječe i na smanjenje mehaničkih svojstava u usporedbi s kompaktnim proizvodom. Ključno pri tome je poznavanje utjecaja različitih oblika ispuna na mehanička svojstva 3D-ispisanog proizvoda.

U okviru rada potrebno je opisati prednosti i nedostatke FFF postupka 3D-ispisa. Većina dosadašnjih istraživanja u ovom području usmjerena je na ispitivanje rasteznih svojstava, pa je u radu pozornost potrebno posvetiti pritisnim svojstvima. Potrebno je opisati normu kojom se ispituju pritisna svojstva polimernih proizvoda. U praktičnom dijelu rada, zadatak je 3D-ispisom izraditi potreban broj epruveta različitih geometrija ispuna i prilagođenog oblika ispitnog tijela, zbog ispitivanja utjecaja ispuna na pritisnu čvrstoću, provesti mehaničko ispitivanje i prokomentirati dobivene rezultate.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Godec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	2
POPIS TABLICA.....	3
POPIS OZNAKA	4
SAŽETAK.....	5
SUMMARY	6
1. UVOD.....	7
2. ADITIVNA PROIZVODNJA	8
2.1. Generiranje 3D modela	8
2.2. Generiranje informacija o slojevima.....	10
2.3. Generiranje slojeva fizičkog modela.....	10
3. VRSTE POSTUPAKA ADITIVNE PROIZVODNJE.....	11
3.1. Stereolitografija (SL)	11
3.2. Selektivno lasersko srašćivanje (SLS).....	13
3.3. 3D tiskanje (3DP).....	15
3.4. Postupci temeljeni na ekstrudiranju	17
3.5. Slojevita izrada laminiranjem (LLM)	19
4. POLIMERNI MATERIJALI KOD FDM TEHNOLOGIJE	21
4.1. Polilaktid (PLA).....	21
4.2. Akronitril/butadien/stiren (ABS)	22
4.3. Akronitril/stiren/akrilat (ASA)	22
4.4. Poli(etilen-tereftalat) (PET) i poli(etilen-tereftalat) modificiran glikolom (PETG) ..	23
4.5. Poliamid (PA)	23
4.6. Elastoplastomerni poliuretan (TPU)	24
4.7. Polikarbonat (PC).....	25
4.8. Polipropilen (PP).....	25
4.9. Poli(eter-eter-ke-ton) (PEEK)	26
4.10. ULTEM / Poli(eter-imid) (PEI)	27
5. UTJECAJ OBLIKA ISPUNE NA PRITISNU ČVRSTOĆU.....	28
5.1. Cilj ispitivanja.....	28
5.2. Metodologija ispitivanja	29
5.3. Rezultati ispitivanja.....	29
6. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36
PRILOZI.....	37

POPIS SLIKA

Slika 1. - Usporedba područja primjene konvencionalnih i aditivnih postupaka [1].....	7
Slika 2. - Slaganje 2D slojeva u 3D proizvod [1].....	8
Slika 3. - Sučelje CAD programa CATIA.....	9
Slika 4. - ATOS Core 200 3D skener.....	10
Slika 5. - Sistematizacija postupaka aditivne proizvodnje [1].....	11
Slika 6. - Načelo SL postupka [1].....	12
Slika 7. - Ispis SLA postupkom [21].....	13
Slika 8. - Načelo SLS postupka [1].....	14
Slika 9. - Ispis SLS postupkom [22].....	15
Slika 10. - Načelo 3DP postupka [1].....	16
Slika 11. - Tiskanje 3DP postupkom [23].....	17
Slika 12. - Načelo FDM postupka [1].....	18
Slika 13. - Tiskanje FDM postupkom [24].....	18
Slika 14. - Načelo postupka laminiranja [1].....	20
Slika 15. - Izgleda različitih oblika ispuna.....	28
Slika 16. - Izgled epruvete nakon testiranja.....	29
Slika 17. - Usporedba vremena ispisa.....	30
Slika 18. - Usporedba masa epruveta.....	31
Slika 19. - Pritisna čvrstoća epruvete.....	32
Slika 20. - Dijagrami naprezanje – deformacija epruveta.....	33
Slika 21. - Usporedba vremena ispisa i pritisne čvrstoće.....	34

POPIS TABLICA

Tablica 1. - Vrijeme ispisa	30
Tablica 2. - Mase uzoraka	31
Tablica 3. - Rezultati ispitivanja	32

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
3D	-	trodimenzionalno
RP	-	brza izrada prototipa („rapid prototyping“)
RT	-	brza izrada alata i kalupa („rapid tooling“)
RM	-	brza izradu gotovih proizvoda („rapid manufacturing“)
CAD	-	computer-aided design
STL	-	format datoteke koja opisuje 3D model
UV	-	ultraljubičasto („ultraviolet“)
SL	-	sterolitografija
SLS	-	selektivno lasersko srašćivanje
3DP	-	3D tiskanje („3D printing“)
FDM	-	taložno očvršćivanje („fused deposition modeling“)
LLM	-	slojevita izrada laminiranjem („layer laminate manufacturing“)
PLA	-	polilaktid
ABS	-	akrilonitril/butadien/stirenska plastika
ASA	-	akrilonitril/stiren/akrilatna plastika
PET	-	poli(etilen-tereftalat)
PETG	-	poli(etilen-tereftalat), modificiran glikolom
PA	-	poliamid
TPU	-	elastoplastomerni poliuretan
PC	-	polikarbonat
PP	-	polipropilen
PEEK	-	poli(eter-eter-keton)
PEI	-	poli(eter-imid)
PVA	-	poli(vinil-amid)
CO ₂	-	ugljičkov dioksid
F _m	N	maksimalna sila
R _m	N/mm ²	pritisna čvrstoća

SAŽETAK

Postupci aditivne proizvodnje ili 3D ispisa prvo su se pojavili kao odgovor na sve veću potrebu za brzu izradu prototipova (e. *Rapid Prototyping* – RP). Kroz vrijeme oni su se također počeli koristiti i za brzu izradu čitavih alata i kalupa (e. *Rapid Tooling* – RT), no danas sve se više koriste i za izradu gotovih proizvoda maloserijske ili pojedinačne proizvodnje (e. *Rapid Manufacturing* - RM). Glavna odlika im je mogućnost brze izrade modela s kompleksnom geometrijom. Ona može trajati od nekoliko minuta do nekoliko dana, tako da je brza kad ju usporedimo s klasičnom proizvodnjom.

Taložno očvršćivanje (e. *Fused Deposition Modeling* – FDM) jedan je od postupaka koji se temelje na ekstrudiranju i danas je jedan od najrasprostranjenijih postupaka 3D ispisa. Pri ispisu FDM postupkom možemo mijenjati razne značajke kao što su orijentacija modela, temperatura ispisa i debljina sloja, ali u ovom radu fokus je na strukturi ispune. Većina svojstava ispisanih modela kao što je rastezna čvrstoća su dobro obrađena u literaturi, za razliku od njih u radu je analizirana pritisna čvrstoća koja je rijetko ispitivana, a temelji se baš na strukturi ispune.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada nastojalo se usporediti pritisne čvrstoće epruveta raznih struktura ispune dobivenih FDM postupkom 3D ispisa. Usporedbom rezultata ovih ispitivanja zaključit će se koja vrsta ispune daje najbolja pritisna svojstva te koje su ispune najisplativije u odnosu na vrijeme ispisa dobivene epruvete.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, 3D ispis, pritisna čvrstoća, taložno očvršćivanje

SUMMARY

Additive manufacturing, more commonly known as 3D printing first showed up as a response to a demand for quick manufacturing of prototypes – *Rapid Prototyping*. Later on, it was used for tool and mold manufacturing – *Rapid Tooling*, but nowadays it is being used for small series manufacturing or individual production – *Rapid Manufacturing*, with an increasing frequency. The main characteristic of additive manufacturing is the quick manufacturing of models with complex geometry. It is fast relative to traditional manufacturing, so it can last from a couple of minutes to a couple of days.

Fused deposition modeling is a 3D printing technology that is based on extrusion and it is one of the most common technologies used today. When printing we can change various parameters such as model orientation, printing temperature and layer height, but in this thesis the focus is on the infill structure. Most mechanical properties of a 3D printed models such as the tensile strength have been thoroughly studied in the literature, but this thesis analyzes the compressive strength that is largely based upon the infill structure.

The experimental part of this thesis compares the compressive strength of samples with various infill geometries produced by FDM 3D printing. Comparing these results will indicate what type of infill gives the best compressive properties and what type of infill is most cost effecting taking into account the print duration of the samples.

Key words: additive manufacturing, 3d printing, compressive strength, fused deposition modeling

1. UVOD

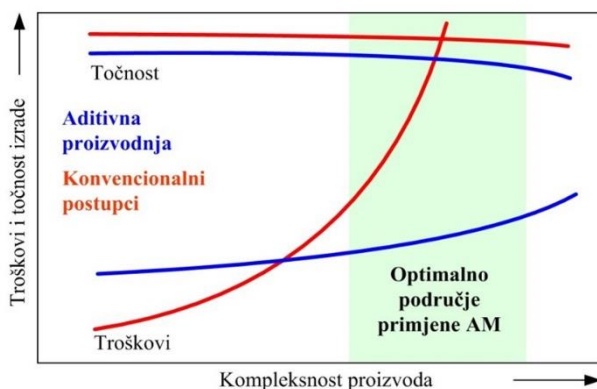
Pri razvoju proizvoda na suvremenom tržištu kriteriji postaju sve stroži te se traži izrada čim kvalitetnijih proizvoda, u što kraćem vremenu, po čim manjoj cijeni. Tržište u zadnje vrijeme također sve više teži pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji, a udaljuje se od masivne proizvodnje. Životni vijek proizvoda i vrijeme proizvodnje je sve manje, a sve je veća kompleksnost i broj varijanti proizvoda. Stoga je moguće navesti četiri ključne pojave koje utječu na uspješnost poslovanja i konkurentnosti na tržištu [1, 2, 4]:

- skraćenje vremena razvoja proizvoda
- sniženje troškova razvoja i proizvodnje
- povišenje fleksibilnosti (pri razvoju i proizvodnji)
- povišenje kvalitete proizvoda.

Kako bi se zadovoljili zahtjevi na tržištu, između ostalih se razvija i aditivna proizvodnja u 80-im godinama prošlog stoljeća. Aditivna proizvodnja se, kako samo ime govori, temelji na dodavanju materijala, dok se kod klasične proizvodnje on najčešće oduzima. Proizvod se izrađuje prema CAD (e. Computer Aided Design) modelu koji je podijeljen na slojeve.

Aditivnu proizvodnju možemo podijeliti na tri oblika [1]: brza proizvodnja prototipova (e. *Rapid Prototyping* – RP), brza proizvodnja alata i kalupa (e. *Rapid Tooling* – RT) i brza (izravna) proizvodnja (e. *Rapid Manufacturing* – RM).

Glavne prednosti aditivnih tehnologija su relativno brza izrada proizvodnja, mogućnost izrade proizvoda kompleksnih geometrija i izrada proizvoda bez potrebe za dodatnom obradom ili alatima.



Slika 1. - Usporedba područja primjene konvencionalnih i aditivnih postupaka [1]

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

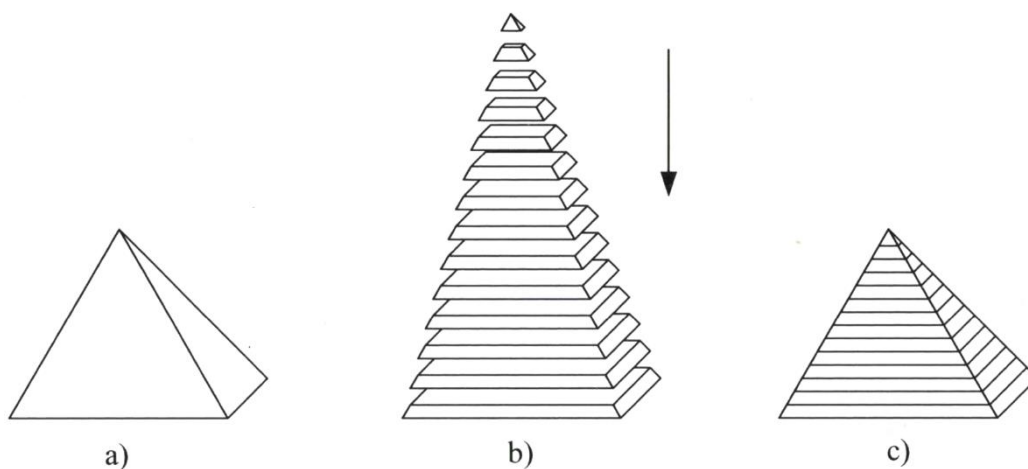
Osnovno načelo aditivnih tehnologija je poprilično jednostavno: primjenjuje se CAD model te ga se podijeli na 2D slojeve koji će se ispisivati i izgraditi konačni proizvod. Točnost u XY ravnini samog sloja je velika, a točnost Z osi će ovisiti o parametrima ispisa kao što je debljina sloja.

To načelo je upravo suprotno klasičnoj proizvodnji odvajanjem čestica, pri kojoj se koriste postupci kao što je glodanje ili tokarenje, kako bi materijal oduzeli.

Postupke aditivne proizvodnje moguće je podijeliti na dva temeljna koraka procesa [2]:

- generiranje matematičkih informacija fizičkog modela
- generiranje slojeva fizičkog modela.

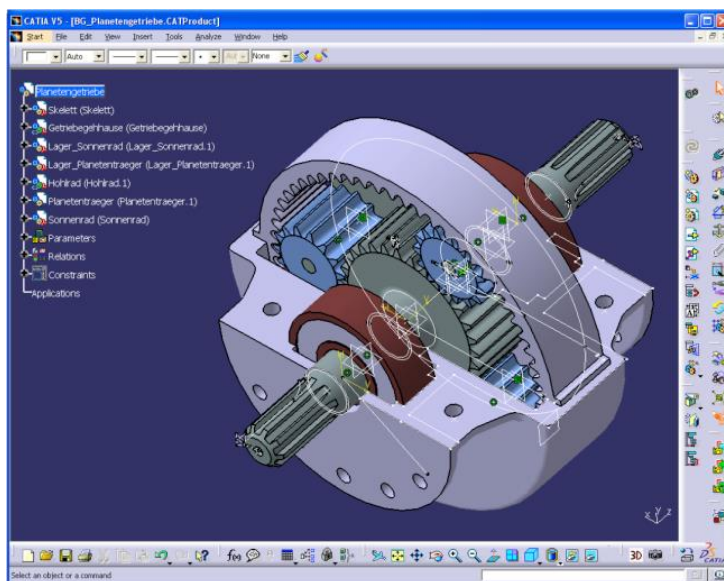
U posebnom softveru na računalu s pomoću matematičkih metoda CAD model se „reže“ na slojeve. Te informacije o slojevima se potom koriste, kako bi stroj znao kako se pomicati da se ispisom dobiju fizički slojevi koji će tvoriti proizvod.



Slika 2. - Slaganje 2D slojeva u 3D proizvod [1]

2.1. Generiranje 3D modela

Prvi korak kod 3D ispisa je dobivanje samog modela kojeg se ispisuje. To se može načiniti na nekoliko načina od koji je najjednostavniji oblikovanje s pomoću CAD programa ili oblikovanje s pomoću računala. Postoje mnogi CAD programi, no zajedničko im je da uz pomoć prostorno određenih dužina, krivulja, ravnina, ploha trodimenzijski modeliraju predmet.



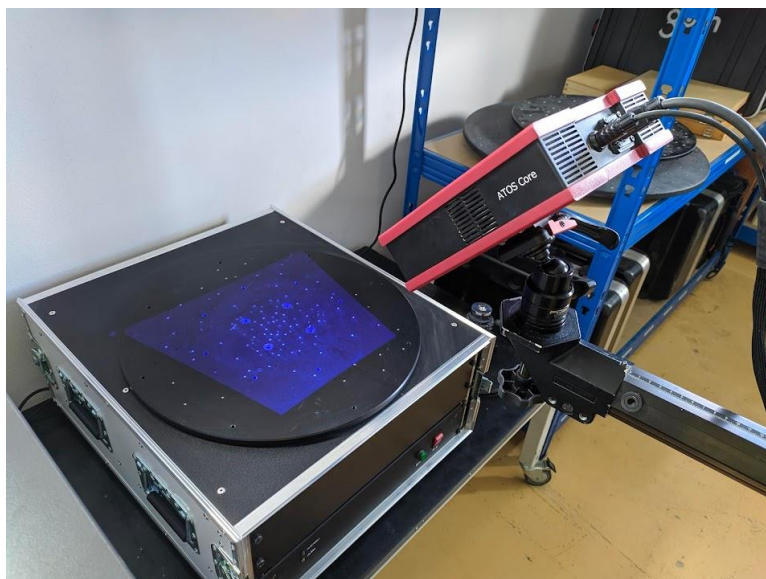
Slika 3. - Sučelje CAD programa CATIA

Drugi način za generiranje 3D modela jest reverzibilno inženjerstvo (*e. Reverse Engineering – RE*). To je postupak koji je, kao što ime nalaže, suprotan od standardnog procesa kojim se iz skice i modela dobiva stvarni proizvod. Ovim postupkom se od stvarnog objekta formira virtualni. Sagledavanjem stvarnog objekta rekreira se njegova geometrija u CAD okruženju. Krajnji cilj RE je automatiziran proces od mjerenja do generiranja 3D CAD modela. [3]

Postupak reverzibilnog inženjerstva odvija se u dvije faze, digitalizacije ili 3D skeniranja i modeliranje modela na osnovi modela dobivenog digitalizacijom.

Nakon dobivanja oblaka točaka 3D skeniranjem potrebno ga je pretvoriti u oblik koji se prikazuje kao mreža poligona koja tvori model, taj postupak se zove poligonizacija. Poligonizacijom se dobiva model u STL zapisu iz kojeg ga se CAD programima može oblikovati i pohraniti u bilo kojem CAD formatu.

3D skeniranje se osim u tehničkim područjima koristi i u medicini, biologiji, filmskoj industriji i industriji videoigara te arheologiji.



Slika 4. - ATOS Core 200 3D skener

2.2. Generiranje informacija o slojevima

Postupak dobivanja informacija o slojevima može se podijeliti u tri glavne faze [1]:

- opisivanje geometrije s pomoću 3D zapisa podataka
- generiranje geometrijskih informacija o svakom sloju
- projekcija geometrijska informacija o sloju na svaki podjedini sloj.

2.3. Generiranje slojeva fizičkog modela

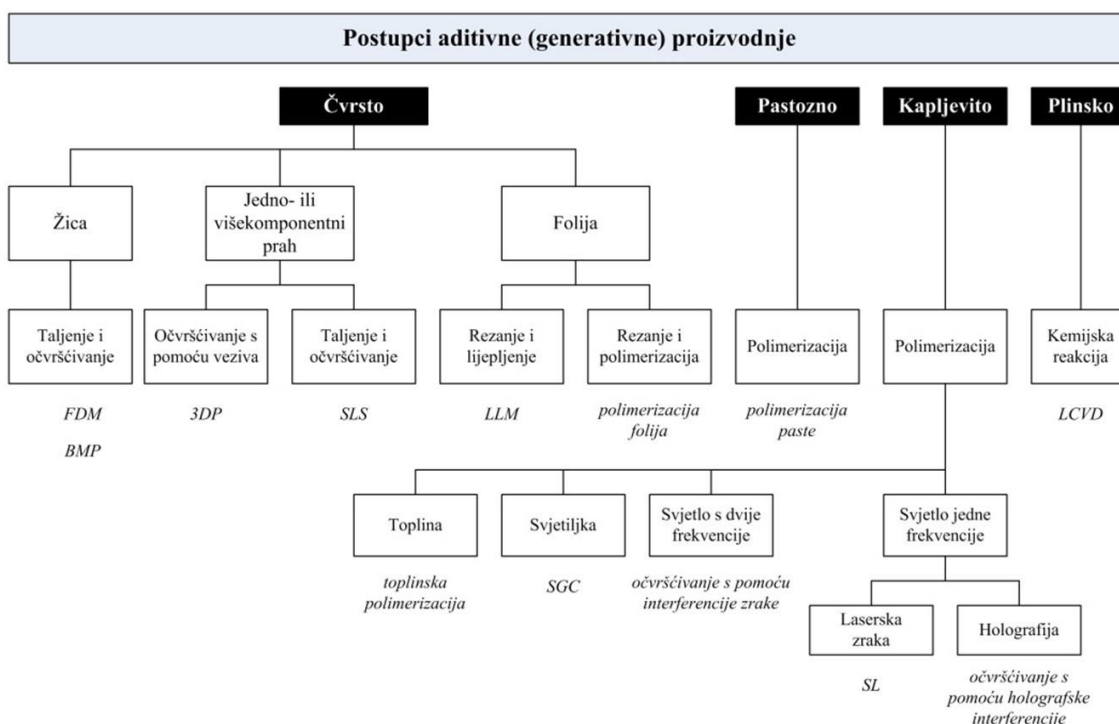
Kod postupaka aditivne tehnologija fizički slojevi se generiraju u presjeku (X-Y ravnini) te se potom svaki sloj povezuje s prethodnim slojem (u smjeru osi z). [1]

Postupke aditivne proizvodnje moguće je podijeliti prema izvornom stanju materijala pa tako postoje kapljeviti, čvrsti, pastozni i plinoviti mediji. Proces u kojima dolazi do očvršćivanja kapljevina temelji se na procesu fotopolimerizacije, odnosno kapljevitim polimerima koji očvršćuju kad su izloženi elektromagnetskom zračenju specifične valne duljine. Najčešće se za očvršćivanje koristi laser ili UV lampa s prozirnom maskom.

Drugi postupci su oni u kojima se koriste materijali u čvrstom stanju. Ima više načela prema kojima može dolaziti do generiranja slojeva. Postoji lasersko srašćivanje praha ili granulata, rezanje folija i ploča te njihovo laminiranje, zatim postupci s taljenjem i očvršćivanjem (najčešće ekstrudiranjem) i povezivanje čestica materijala vezivom.

3. VRSTE POSTUPAKA ADITIVNE PROIZVODNJE

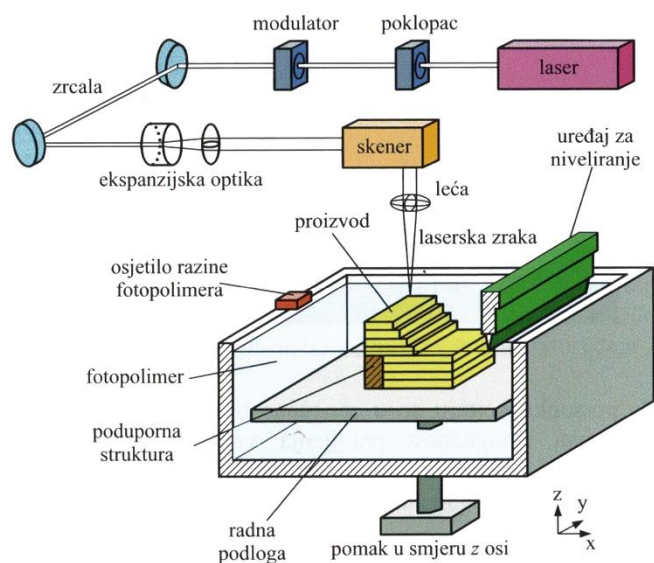
Aditivne postupke proizvodnje moguće je podijeliti prema nekoliko načela. Prvo je ono u kakvom se stanju nalazi polazni materijal. Najčešće je to kapljevina (fotopolimerne smole), čvrsto (polimerni filament) ili praškasto (keramika, metali, polimeri). Drugo načelo koje se može primijeniti je način ispisa, odnosno spajanja materijala, pa to može biti taljenje, polimerizacija, laminiranje ili povezivanje vezivom.



Slika 5. - Sistematizacija postupaka aditivne proizvodnje [1]

3.1. Stereolitografija (SL)

Stereolitografija je čest oblik aditivne proizvodnje. U njemu se koristi fotopolimer koji očvršćuje pod djelovanjem UV zračenja u slojevima s pomoću lasera. Najčešći polimeri koji se upotrebljavaju su niskoviskozne akrilne, vinilne ili epoksidne smole. Osim stvaranja samog sloja njegovim srašćivanjem, on se automatski lijepi na prethodni sloj, a dosta je i važno osigurati dobru vezu pri generiranju prvog sloja koji se stvara na metalnoj podlozi.

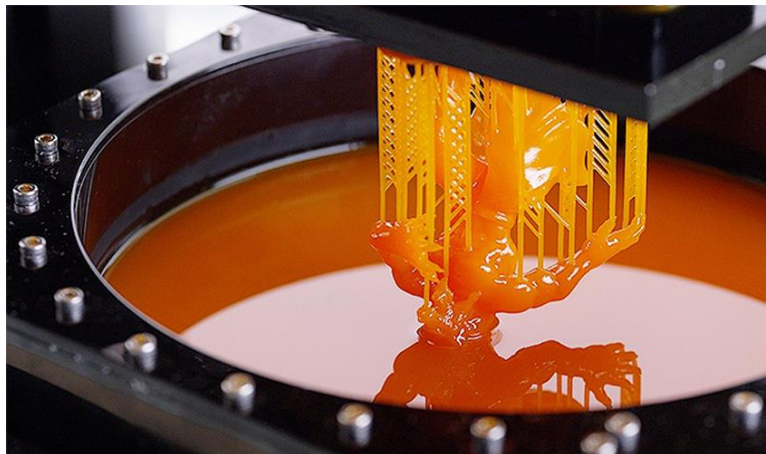


Slika 6. - Načelo SL postupka [1]

Ključni dio uređaja sastoji se od He-Cd ili Ar lasera s optičkom opremom, zrcalom za usmjeravanje UV zrake, posuda s fotopolimerom i pokretnom podlogom koja se miče u smjeru osi slaganja slojeva. [4, 5, 6] Također važan dio je i sustav za niveliranje koji sprječava pojavu mjehurića u slojevima i kako bi se dobila zadovoljavajuća točnost. [2, 7]

Kada završi ispis zadnjeg sloja modela gotovi dio se zove tzv. zelenim dijelom (e. *green part*) jer on još nije do kraja umrežen, odnosno nije potpuno polimerizirao. Kako bi se dobio konačni proizvod, potrebno ga je izložiti jakom UV zračenju zbog potpune polimerizacije. [8]

Proizvodi izrađeni stereolitografijom (SL) općenito imaju glatku površinu, no kvaliteta i vrijeme izrade najviše ovise o kvaliteti SLA uređaja.



Slika 7. - Ispis SLA postupkom [21]

Prednosti SL postupaka [2, 4, 9, 10]:

- Visoko precizni i detaljni proizvodi koji nisu ograničeni geometrijom
- Kvalitetni proizvodi s glatkom površinom
- Mogućnost ispisa malih, ali i velikih dijelova
- Automatiziranost procesa i mogućnost 24-satnog rada.

Nedostaci SL postupaka [2, 4, 9, 10]:

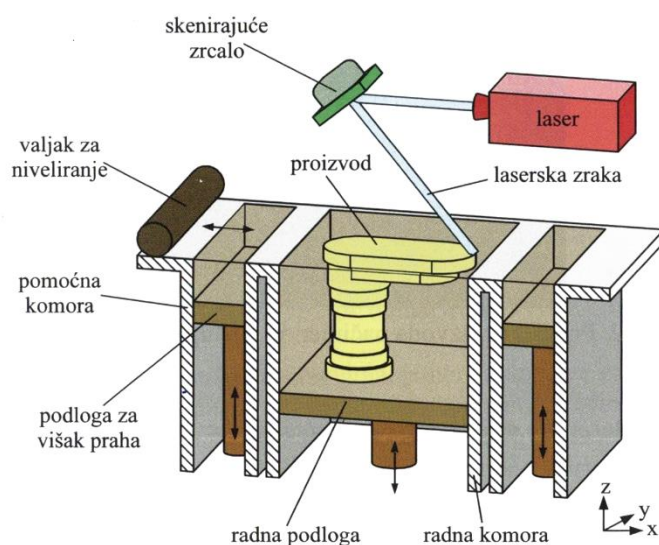
- Potreba za potpornim materijalom i ukidanjem istog te naknadna obrada
- Krhkost pojedinih polimernih materijala i deformacija pri očvršćivanju
- Stvaranje plinova koji mogu biti loši za zdravlje
- Skupoća SL strojeva
- Ograničena proizvodnja na male serije i pojedinačne proizvode.

3.2. Selektivno lasersko srašćivanje (SLS)

Selektivno lasersko srašćivanje je postupak kojim se obrađuju praškasti materijali, što mu je i glavna prednost zbog raznih vrsta materijala koje je moguće koristiti i zato što prah podupire proizvod pa nisu potrebni podupori. Ovaj postupak je dosta čest i jedan od najvažnijih postupaka aditivne proizvodnje. Najčešće upotrebljavani materijali su polimerni materijali (PS, PC, PA, PA sa staklenim vlaknima, PVC, elastomeri), keramika, metalni prahovi s vezivom te jednokomponentni prahovi (bez veziva). Kod amorfni materijala se dobivaju gustoće od 60 do 85% injekcijskih prešanih, a kod kristalastih se u naknadnoj obradi uklanjaju veziva koja se

moгу nalaziti u obliku praha, a gustoća dijelova se povisuje prodiranjem bakra i može iznositi i do 90%. [2, 4, 8]

Kako bi se pri ispisu smanjila reakcija praha s atmosferom, koriste se komore zagrijane na temperaturu malo ispod tališta praha ispunjene inertnim plinom, kao što je dušik. Zagrijanom komorom se postiže većina potrebne toplinske energije, pa laser treba osigurati samo onaj dio koji nedostaje do tališta. Praškasti materijal tako omekšava te se zavaruje ili srašćuje. Time se ujedno dobiva kraće vrijeme izrade i manja količina deformacija. [2, 4, 8, 10]

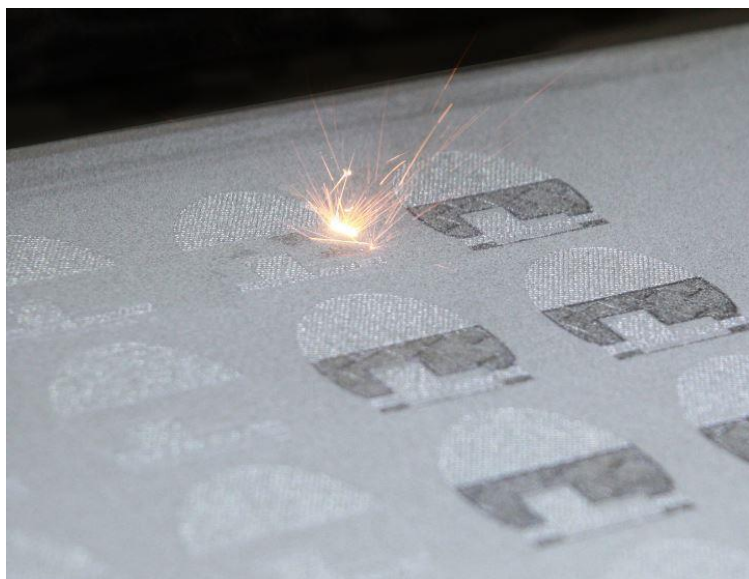


Slika 8. - Načelo SLS postupka [1]

SLS postupak je sličan stereolitografiji pa se također upotrebljavaju zrcala, kako bi se laserska zraka usmjeravala po putanji određenoj pri generiranju slojeva. Također slično, nakon stvaranja jednog sloja, podloga se spušta za visinu jednog sloja, no pošto materijal nije kapljevina kod SLS postupka uređaj za niveliranje nanosi sljedeći sloj praha. [2, 4, 8]

Kada se proizvod nakon ispisa ohladi, potrebno ga je pažljivo ukloniti iz komore i očistiti od ostatka praha kojim se okružen.

Brzina proizvodnje se gleda prema z osi i iznosi 10 do 20 mm/s, a preciznost je od ± 15 do 0,2 mm.



Slika 9. - Ispis SLS postupkom [22]

Prednosti SLS postupka [2, 4, 8, 11, 12]:

- Mogućnost primjene velikog broja materijala
- Nema potrebe za poduporima jer dodatni prah ima tu ulogu
- Neiskorišteni prah se može ponovo upotrijebiti
- Vrlo visoka snaga veza između slojeva (izotropna svojstva)
- Postupak je relativno brz (unutar jednog dana).

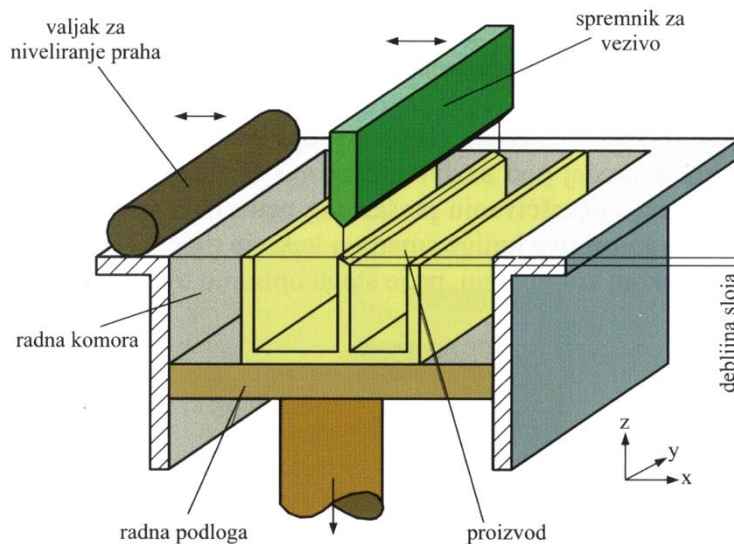
Nedostaci SLS postupka [2, 4, 8, 11, 12]:

- Poroznosti i loša kvaliteta površine (može se popraviti nanošenjem voska)
- Moguća krhkoća i manja fleksibilnost
- Mogućnost pojave otrovnih plinova kod nekih materijala (npr. PVC)
- Opasnost od deformacije i stiskanja proizvoda.

3.3. 3D tiskanje (3DP)

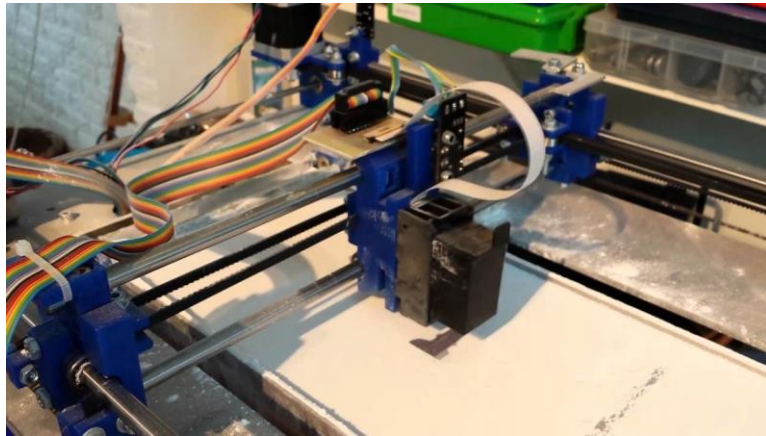
3D tiskanje je brz i pouzdan postupak aditivne proizvodnje *ink-jet* mlaznicama bez proizvodnje otrovnih tvari. Postupak se odvija sloj po sloj kao i kod ostalih postupaka aditivne proizvodnje. U ovom slučaju se slojevi povezuju sloj po sloj *ink-jet* mlaznicama koje nanose vezivo na prah. Stroj za 3D tiskanje se sastoji od okomite pokretne podloge s prahom, podloge, spremnika za suvišak materijala, valjka za nanošenje praha i *ink-jet* glave s mlaznicama koja se može micati

u smjeru x i y osi. Prvo se nanosi sloj praha uz pomoću valjka za nanošenje, a tijekom povratnog gibanja se nanosi vezivo u obliku kapljica s pomoću mlaznica i time se povezuje prah. Kada završi izrada jednog sloja, podloga se spušta te ponovno nanosi prah i vezivo na sljedeću sloj. [2, 4]



Slika 10. - Načelo 3DP postupka [1]

Uređaji za 3DP postupak su vrlo brzi pa je izrada pomoću njih 5 do 10 puta kraća nego kod ostalih postupaka aditivne proizvodnje. Razlog tome je što nanošenje praha novog sloja traje samo nekoliko sekundi, a mlaznice ispuštaju potrebnu količinu veziva samo jednim prolazom preko radne podloge. Ovaj postupak je prvi patentirao MIT (*e. Massachusetts Institute of Technology*) 1989. godine. [2, 13]



Slika 11. - Tiskanje 3DP postupkom [23]

Prednosti 3DP postupka [2, 13, 14]:

- Brzina izrade
- Ponovo upotrebljiv materijal
- Nema razvijanja otrovnih tvari
- Preciznost izrade.

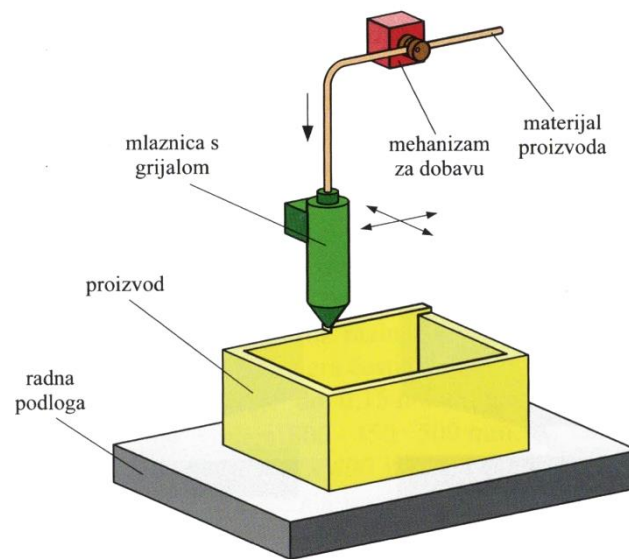
Prednosti 3DP postupka [2, 13, 14]:

- Ograničene dimenzije tiskanja
- Ograničen broj primjenjivih materijala
- Niska mehanička svojstva proizvoda.

3.4. Postupci temeljeni na ekstrudiranju

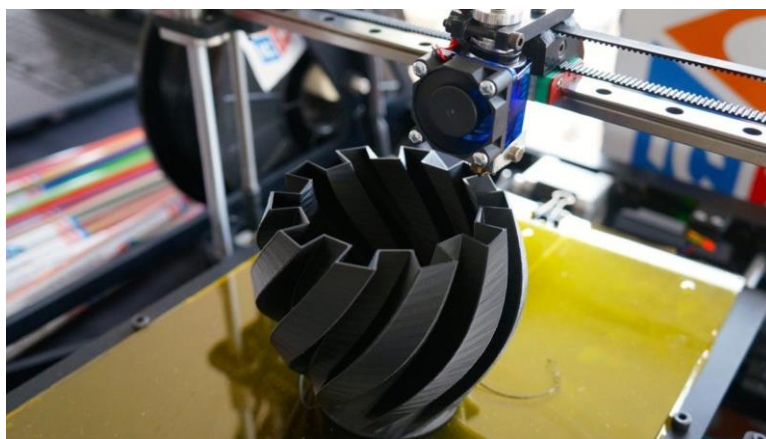
Kod postupaka temeljenih na ekstrudiranju taljeni (najčešće polimerni) materijal se nanosi glavama sličnim ekstruderima. Ovi postupci su široko rasprostranjeni i jedni on najpoznatijih danas, a najznačajniji od njih je taložno očvršćivanje (*e. Fused Deposition Modeling*) koji je počela razvijati tvrtka *Stratasys* (SAD) osnovana 1988. godine.

FDM uređaj sadrži troosni sustav koji je upravljan računalom. Kroz sustav prolazi polimerni materijal u obliku žice odnosno filament, koji se zagrijava i tali te ispušta kroz mlaznicu u kapljevitom stanju te vrlo brzo očvršćuje na sobnoj temperaturi. Glavno načelo je održavanje temperature materijala u mlaznici malo više iznad temperature taljenja. Kao i kod drugih postupaka materijal se polaže po slojevima, no ovog puta u liniji. Kada se završi jedan sloj, mlaznica se podiže za debljinu jednog sloja te se počinje nanositi drugi. [2, 4, 8]



Slika 12. - Načelo FDM postupka [1]

Kod ovog postupka višak materijala nije na radnoj plohi pa ne može služiti kao podupor za nove slojeve te je stoga potrebno generirati poduporne strukture, koje će se u obradi nakon tiskanja odvajati i bacati. Jedan od načina izvedbe, kako bi se podupor lakše uklonio je uporaba dvostruke glave ekstrudera, pri čemu će jedan dio ispisivati proizvod u željenom materijalu, a drugi će ispisivati podupor u materijalu topivom u vodi (npr. poli(vinil-amid) - PVA) kako bi ga mogli samo otopiti, a ne kidati s proizvoda. Kvaliteta ispisa je slična kao i kod SLS postupka, a i gustoća se također može povisiti postupkom prodiranja punila u proizvod. [2, 4]



Slika 13. - Tiskanje FDM postupkom [24]

Prednosti FDM postupka [2, 4]:

- Jednostavnost uporabe
- Niska cijena opreme i održavanja
- Minimalno vitoperenje proizvoda
- Nema potreba za laserom i hlađenjem
- Mala potrošnja energije.

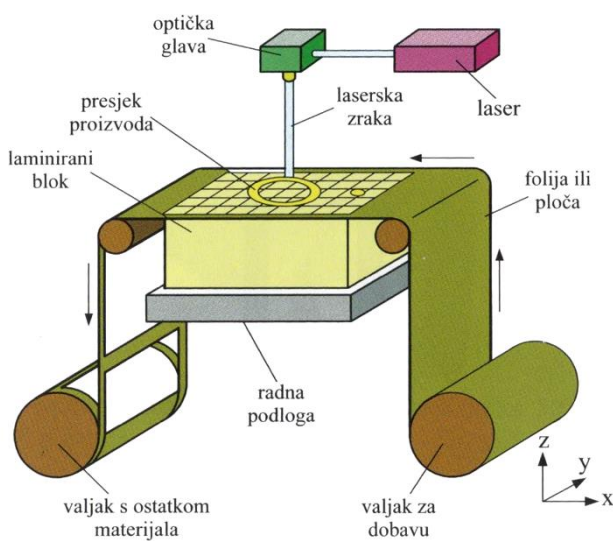
Nedostaci FDM postupka [2, 4]:

- Funkcionalnost ograničena izborom materijala
- Potreba za poduporima
- Česta potreba za naknadnom obradom
- Vidljivi slojevi ispisa
- Mogućnost raslojavanja.

3.5. Slojevita izrada laminiranjem (LLM)

Postupak izrade laminiranjem (*e. Layer Laminated Manufacturing – LLM*) koristi CO₂ laser uz pomoću kojeg se reže prethodno laminirani materijal prema prije određenom obliku sloja.

Ovaj postupak je kombinacija aditivnih postupaka i tehnologije odvajanja. Slojevi se povezuju vezivima i najčešće postoje dvije izvedbe. Kod jedne je gradivni materijal prevučen poliesterskim vezivom, a kod druge se vezivo dodaje tijekom samog laminiranja. Materijali koji se koriste su najčešće papir, polimerni filmovi i folije, kompoziti s epoksidnom matricom i staklenim ojačavalima te metalne ploče. [2]



Slika 14. - Načelo postupka laminiranja [1]

Ovaj postupak se najčešće koristi kod izrade proizvoda s većim dimenzijama, jer kod njih laser mora proći samo koturom sloja.

Prednosti LLM postupka [2, 14]:

- Nema potrebe za poduporom
- Mogućnost izrade velikih proizvoda
- Jeftin materijal i izrada.

Nedostaci LLM postupka [2, 14]:

- Mogućnost slabih veza između slojeva
- Gruba površina
- Nemogućnost ispisa kompleksnijih proizvoda
- Skupoća strojeva.

4. POLIMERNI MATERIJALI KOD FDM TEHNOLOGIJE

Kod metode taložnog očvršćivanja ili FDM metode, kao materijal se koriste čisti polimerni materijali ili polimerni materijali s dodacima (staklena vlakna, ugljična vlakna) i oni dolaze u čvrstom stanju u obliku filameta.

U početku najkorišteniji materijali bili su PLA zbog lakoće korištenja i ABS koji je bio bolji za tehničku primjenu. Oni se i danas puno koriste, no tijekom vremena razvili su se i drugi materijali.

4.1. Polilaktid (PLA)

Polilaktid ili PLA je biorazgradivi poliestar koji se proizvodi od prirodnih materijala kao što je kukuruzni škrob. Jako je popularan u „hobby“ svijetu zbog lakoće ispisa, no ne preporuča se za bilo kakve funkcionalne proizvode zbog svoje male čvrstoće. Ispisuje se pri relativno niskim temperaturama 190 °C - 220 °C i nema velikog stezanja materijala nakon ispisa. Njegove prednosti su što je biorazgradiv, daje kvalitetnu površinu i lako je obradiv. Također je vrlo krut, no to s druge strane znači i da je dosta krhak. Ima dobru UV otpornost no to ne znači mnogo, jer mu je niska točka staklišta (oko 55 °C), pa može postati mekan pri visokim temperaturama. [15, 16, 17, 18]

Prednosti polilaktida:

- Lakoća ispisa
- Niska temperatura ispisa
- Krutost
- Dobra dimenzijska točnost
- Biorazgradivost.

Nedostaci polilaktida:

- Mala otpornost na toplinu
- Mala otpornost na UV zrake
- Krhak.

4.2. Akrilonitril/butadien/stiren (ABS)

Akrilonitril/butadien/stiren ili ABS je amorfni polimer koji se koristi kada postoje zahtjevi za većom toplinskom otpornošću i većom žilavošću. Ispisuje se pri višim temperaturama (230 °C - 260 °C) i nešto je teži za ispis, jer zbog strujanja hladnijeg zraka može doći do raslojavanja. Može se reciklirati i lako je obradiv. Trajan je i otporan na abraziju, no osjetljiv je na UV zračenje te može proizvoditi plinove tijekom ispisa. Zanimljivo je da se korištenjem acetona može „zagladiti“ površina za sjajnu završnu površinu. [15, 16, 17, 18]

Prednosti akrilonitril/butadien/stirena:

- Dobra toplinska otpornost
- Visoka žilavost
- Otporan na abraziju i trošenje.

Nedostaci akrilonitril/butadien/stirena:

- Osjetljiv na UV zračenje
- Može doći do vitoperenja
- Proizvodi štetne plinove pri ispisu
- Tendencija stiskanja ispisa.

4.3. Akrilonitril/stiren/akrilat (ASA)

Akrilonitril/stiren/akrilat ili ASA je još jedan amorfni polimer koji se nameće kao dobra zamjena za ABS. Ispisuje se pri sličnim temperaturama kao ABS (240 °C - 260 °C) Za razliku od ABS-a on je otporan na UV zračenje i utjecaj vremena te također dobro podnosi i visoke i niske temperature, zbog čega je dobar izbor za proizvode koji će se koristiti na otvorenom prostoru. Uz to također je manje podložan napetostnoj koroziji od ABS-a, ali je i lagano higroskopsan, što znači da će upijati vlagu iz zraka te će mu se degradirati neka svojstva. [15, 16, 17, 18]

Prednosti akrilonitril/stiren/akrilata:

- Otpornost na UV zračenje
- Toplinska otpornost
- Otpornost na udarce i trošenje.

Nedostaci akrilonitril/stiren/akrilata:

- Proizvodi štetne plinove pri ispisu
- Umjerena higroskopnost.

4.4. Poli(etilen-tereftalat) (PET) i poli(etilen-tereftalat) modificiran glikolom (PETG)

Poli(etilen-tereftalat) ili PET je kristalasti polimer koji se ispisuje pri malo višim temperaturama (220 °C - 260 °C), no ima nešto nižu temperaturu staklišta od ABS-a ili ASA-a, oko 80 °C. Jako kemijski otporan i otporan na vlagu, ali je podložan UV zračenju te se zbog toga i niskog staklišta ne preporuča za korištenje na otvorenom. Može se lako reciklirati i može biti siguran za dodir s hranom. [15, 16, 18]

Prednosti poli(etilen-tereftalata):

- Kemijska otpornost
- Otpornost na vlagu
- Može biti siguran u dodiru s hranom
- Žilavost
- Otpornost na vodi u vlagu
- Zanimarivo vitoperenje.

Nedostaci poli(etilen-tereftalata):

- Osjetljiv na UV zračenje
- Lošija kvaliteta ispisa.

4.5. Poliamid (PA)

Poliamid ima izvrsna mehanička svojstva. Trajan je, ima visoku rasteznu čvrstoću, otporan je na udarce i visoke temperature te je kemijski postojan. Može biti težak za ispisivanje zbog svoje elastičnosti, a ispisuje se pri 220 °C do 250 °C. Mane su mu što proizvodi štetne pare tijekom ispisa i što je dosta higroskopan, pa brzo na sebe veže vlagu. [15, 16, 18]

Prednosti poliamida:

- Otporan na udarce
- Otporan na visoke temperature
- Kemijski postojan
- Čvrst i djelomično elastičan
- Otporan na abraziju.

Nedostaci poliamida:

- Može se vitoperiti
- Jaka higroskopnost
- Otežan ispis
- Ispušta plinove pri ispisu.

4.6. Elastoplastomerni poliuretani (TPU)

Elastoplastomerni poliuretani ili TPU je gumasti materijal koji se uglavnom koristi za izradu fleksibilnih ili polufleksibilnih dijelova. Ispisuje se pri 220 °C do 250 °C, no kada se koristi radna temperatura ne bi smjela premašiti 60 °C. Logično ima veliku otpornost na udarni rad loma, ali je otporan i na abraziju, ulja i masti. S druge strane, naknadna obrada može biti teška. [15, 16, 18]

Prednosti elastoplastomernog poliuretana:

- Fleksibilnost i mekoća
- Otpornost na abraziju, ulja i masti
- Otpornost na udarce
- Dimenzijska stabilnost.

Nedostaci elastoplastomerni poliuretana:

- Težak za ispis
- Spore brzine ispisa
- Loša obradivost nakon ispisa
- Higroskopnost.

4.7. Polikarbonat (PC)

Polikarbonat je izrazito čvrst materijal te je dobra zamjena za ABS. Lagan je za naknadnu obranu i otporan na visoke temperature. U industrijskim primjenama se koristi u medicini i zrakoplovstvu. Ispisuje se pri visokim temperaturama (290 °C do 315 °C) i može izazivati neke probleme kod ispisa. [15, 16, 18]

Prednosti polikarbonata:

- Otpornost na umor, toplinu i udarce
- Krutost i snaga
- Djelomično elastičan.

Nedostaci polikarbonata:

- Traži visoke temperature ispisa
- Lako se vitoperi
- Higroskopnost.

4.8. Polipropilen (PP)

Polipropilen je lagani materijal koji se često koristi kod pakiranja. Ima polikristalnu strukturu. Nije najjednostavniji za ispis jer se dosta vitoperi kod hlađenja. Ima dobru otpornost na temperaturu i trošenje. Ispisuje se pri temperaturama oko 220 °C. Moguće ga je koristiti i kod ispisa fleksibilnih dijelova.

Prednosti polipropilena:

- Mala masa
- Kemijska postojanost
- Otpornost na vodu i temperature
- Otpornost na trošenje
- Fleksibilnost.

Nedostaci polipropilena:

- Loše prijanjane na podlogu
- Niska snaga
- Visoka cijena
- Jako se vitoperi.

4.9. Poli(eter-eter-keton) (PEEK)

Poli(eter-eter-keton) ili PEEK je inženjerski materijal s izvrsnim svojstvima. Izrazito je kemijski otporan, ima izrazito dobra mehanička svojstva i dimenzijski je stabilan. Jako je krut i može se koristiti pri temperaturama čak do 170 °C, no stoga se i ispisuje pri visokim temperaturama (360 °C – 420 °C). Jedine mane su mu cijena i loša otpornost na UV zračenje. [19]

Prednosti poli(eter-eter-ketona):

- Kemijska otpornost
- Dobra mehanička svojstva
- Dimenzijska stabilnost
- Krutost
- Otpornost na toplinu.

Nedostaci poli(eter-eter-ketona):

- Visoke temperature ispisa
- Velika cijena
- Loša otpornost na UV zračenje.

4.10. ULTEM / Poli(eter-imid) (PEI)

Ultem je komercijalno ime za polimere iz skupine poli(eter-imida). Ta skupina je otporna na visoke temperature, ima veliku čvrstoća i kemijsku postojanost. Slično kao i PEEK, može se koristiti pri temperaturama do 170 °C, no između 150 °C i 200 °C otpušta štetne plinove. Ispisuje se pri 350 °C – 380 °C. [15, 20]

Prednosti Ultema:

- Otpornost na visoke temperature
- Kemijska otpornost.

Nedostaci Ultema:

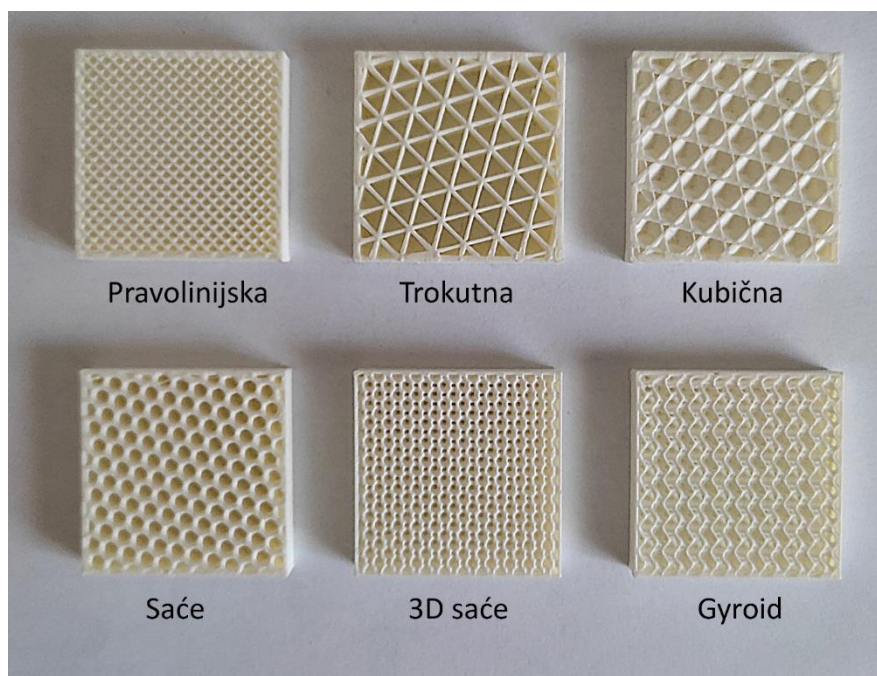
- Ispis na visokim temperaturama
- Ispušta štetne plinove pri ispisu.

5. UTJECAJ OBLIKA ISPUNE NA PRITISNU ČVRSTOĆU

5.1. Cilj ispitivanja

Kad je riječ o čvrstoći 3D tiskanih dijelova, postavke ispisa uz materijal igraju glavnu ulogu. Ako su dobro namješteni profili za ispis, obično je potrebno mijenjati samo mali broj postavki kako bi ih prilagodili potrebama. Kad je riječ o ispunama većinom će se mijenjati gustoća ispune, a ne vrsta ispune. To je zato što se u većini slučajeva gleda rastezna ili savojna čvrstoća, gdje gustoća ispune ima puno veći utjecaj od njenog oblika. U ovom istraživanju potrebno je istražiti koje vrste ispuna daje najbolja pritisna svojstva te koje su vrste ispuna najisplativije što se tiče količine utrošenog vremena. Ako se želi koristiti što manje materijala ili optimirati da dijelove printamo što brže, ovo je poprilično važno.

Kako bi se dobio odgovor na ovo pitanje ispisano je ukupno 30 epruveta, po 5 za svaku od 6 vrsta ispune koje će se ispitivati. Kako se za izradu epruveta koristio program PrusaSlicer, ispitivalo se sljedeće vrste ispuna: pravolinijska (e. rectilinear), trokutna (e. triangles), kubična (e. cubic), oblika saća (e. honeycomb), oblika 3D saća (e. 3D honeycomb) i gyroid.



Slika 15. - Izgleda različitih oblika ispuna

5.2. Metodologija ispitivanja

Ispitna tijela su ispisana na modificiranom Creality Ender 3 3D pisaču s mlaznicom promjera 0,4 mm i debljinom sloja od 0,2 mm. Gustoća ispune je bila 30 %. Definiran je 1 obrub i 3 ispunjena sloja na dnu i na vrhu. Tako je debljina stijenki bila 0,4 mm na stranicama i 0,6 mm na vrhu i dnu uzoraka. Ispisani su od ABS-a pri temperaturi mlaznice od 260 °C i temperaturi podloge od 110 °C.

Veličina ispitnih tijela za ispitivanje pritisnih svojstava definirana je normom HRN EN ISO 604 te iznosi 10 x 10 x 4 mm, no time bi ispuna bila na samo 2,8 mm od ukupne visine od 4 mm, što znači da sačinjava samo 70% visine epruvete. Stoga su se za veličinu ispitnih tijela uzele 3 puta veće vrijednosti, odnosno 30 x 30 x 12 mm, pa ispuna čini 93,33% ukupne visine epruvete i značajnije utječe na pritisna svojstva. Zbog toga ovi rezultati ne mogu biti usporedivi sa standardnim epruvetama, ali su usporedivi međusobno u ovom ispitivanju.

Ispitivanja su odrađena na kidalici maksimalne sile 50 kN, s predopterećenjem od 500 N i brzinom ispitivanja od 2 mm/min.



Slika 16. - Izgled epruvete nakon testiranja

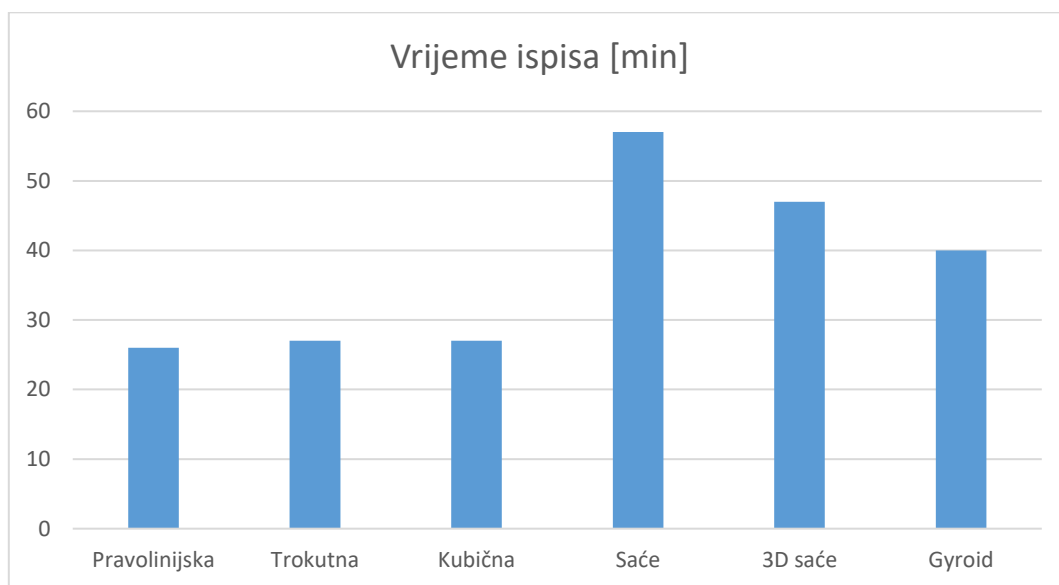
5.3. Rezultati ispitivanja

Trajanje ispisa je bila najkraće za pravolinijsku ispunu sa samo 26 minuta. Za trokutnu i kubičnu ispunu ono je bilo nešto dulje - 27 minuta. Kod epruveta koje imaju puno izmjena smjerova kod ispisa vide se dulja vremena ispisa, pa je izrada epruveta saća bila najdulja - 57 minuta, 3D

saća 47 minuta i gyroid 40 minuta. Ovo pokazuje da definitivno moguće uštedjeti na vremena mijenjanjem oblika ispune.

Tablica 1. - Vrijeme ispisa

Vrsta ispune	Vrijeme ispisa [min]
Pravolinijska	26
Trokutna	27
Kubična	27
Saće	57
3D saće	47
Gyroid	40

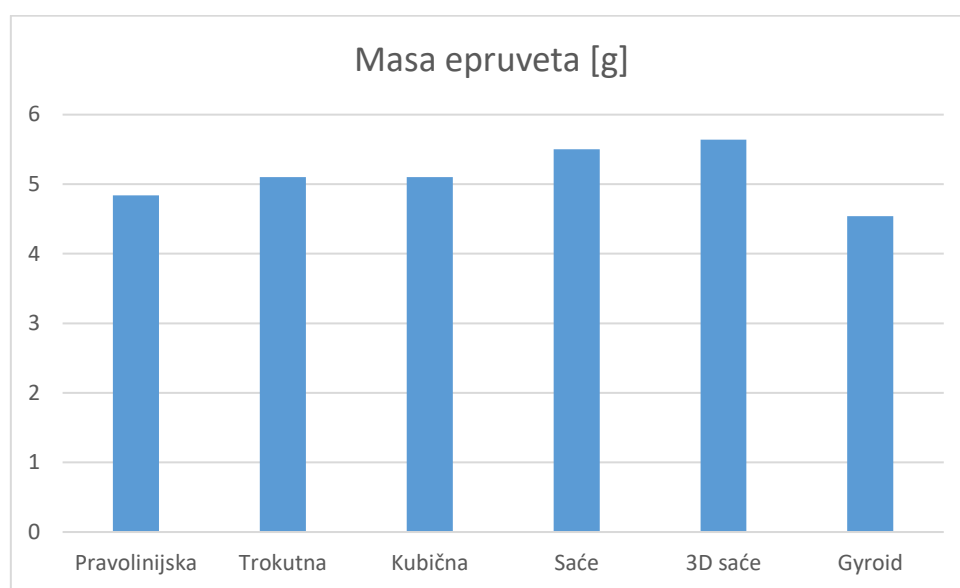


Slika 17. - Usporedba vremena ispisa

Što se tiče masa epruveta, njih je moguće podijeliti u dvije skupine, prva s jednostavnijim oblikom ispune gdje se ubrajaju pravolinijska, trokutna i kubična, a druga je s kompleksnijim oblikom ispune u koju spada saće, 3D saće i gyroid. No i ovdje varijacije nisu pretjerane, gdje je najveća razlika između masa epruveta nešto iznad 16%.

Tablica 2. - Mase uzoraka

Vrsta ispune	Masa [g]
Pravolinijska	4,84
Trokutna	5,1
Kubična	5,1
Saće	5,5
3D saće	5,64
Gyroid	4,54

**Slika 18. - Usporedba masa epruveta**

U nastavku slijedi analiza rezultata maksimalne sile i pritiskne čvrstoće. U ovom ispitivanju su ispitane epruvete samo u smjeru ispisa, no bilo bi zanimljivo ispitati i epruvete okomito na smjer ispisa, kako bi se utvrdilo, koliko izotropna svojstva imaju pojedine ispune.

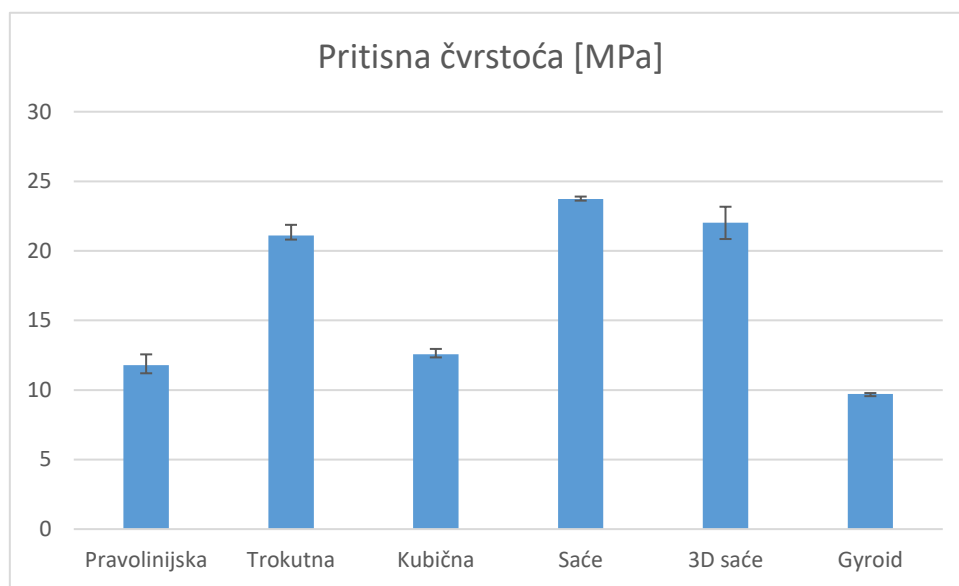
Ispitivanje je započeto s vrstom ispune koja je dosta učestala i najčešće je u primjeni, a to je pravolinijska ispuna. Ona je u prosjeku izdržala do sile od 10360,5 N i postigla pritisku čvrstoću od 11,785 MPa.

Sljedeća je bila trokutna ispuna koja je pomalo iznenađujuće izdržala sile do 18735,4 N i postigla pritisku čvrstoću od 12,566 MPa. Iza nje slijedi oblik saća koje potvrđuje očekivanja s najboljim rezultatom s izdržanih 20946,4 N i čvrstoćom od 23,732 MPa. Zadnje tri ispune su 3D ispune koje bi trebale imati dobra svojstva i u smjeru ispisa i okomito na njega, no to nije

ispitivano u ovom radu. Najlošija je gyroid ispuna s maksimalnom silom od 8542,25 N i pritisnom čvrstoćom od 9,7115 MPa. Nešto bolja je kubična ispuna, koje je popustila pri sili od 11197,8 N i postigla pritisnu čvrstoću od 12,566 MPa, a najbolji rezultat postigla je ispuna oblika 3D saće, koja je usporediva s vrijednostima ispune oblika običnog saće, postigavši silu od 19450,8 N i pritisnu čvrstoću od 22,034 MPa.

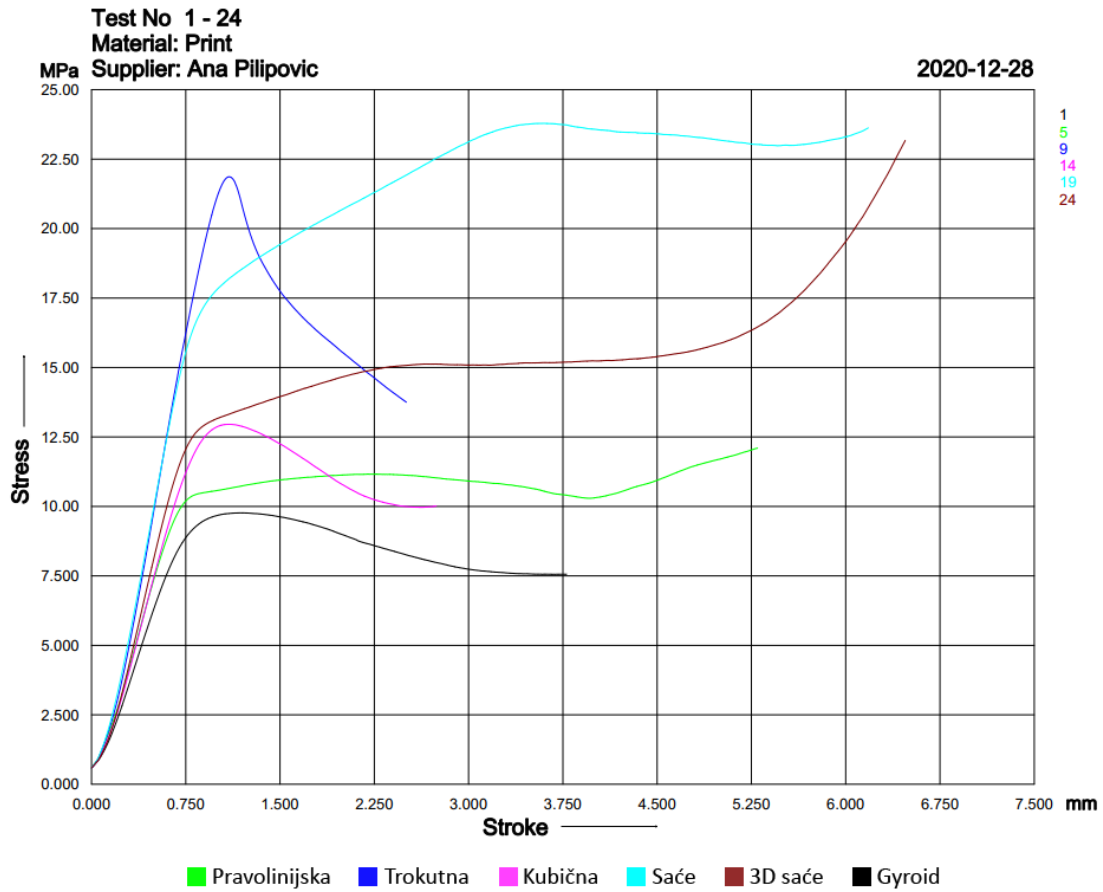
Tablica 3. - Rezultati ispitivanja

Vrsta ispune	F_m [N]	R_m [MPa]
Pravolinijska	10360,5	11,785
Trokutna	18735,4	21,1
Kubična	11197,8	12,566
Saće	20946,4	23,732
3D saće	19450,8	22,034
Gyroid	8542,25	9,7115



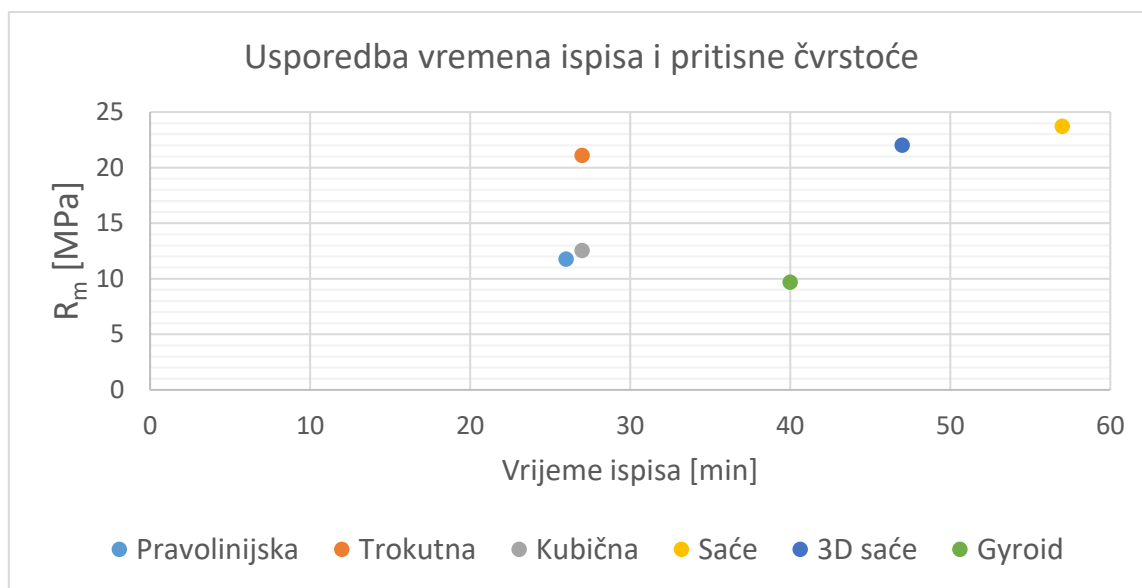
Slika 19. - Pritisna čvrstoća epruvete

Kada se analiziraju ovi rezultati, očito je da je ispuna oblika saća najčvršća, a oblika gyroid najlošije pritiskne čvrstoće. 3D ispune kao što je kubična, gyroid i 3D saće imaju još prednost da imaju nešto izotropnija svojstva što nije ispitivano u ovom radu.



Slika 20. - Dijagrami naprezanje – deformacija epruveta

Ono što je zanimljivo i što mijenja pogleda na rezultate je uzimanje u obzir vrijeme koje je bilo potrebno za ispit. Epruvete oblika saća i 3D saća su imale najviše vrijednost čvrstoće, no one su se i najdulje ispisivale - 57 i 47 minuta. S tim na umu, kada se ponovno pogledaju rezultati, kao najbolji izbor nudi se trokutna ispuna. Ona je s jednim od najmanjih vremena ispisa (27 minuta) postigla rezultate čvrstoće jako usporedive s onim saća i 3D saća.



Slika 21. - Usporedba vremena ispisa i pritiskne čvrstoće

6. ZAKLJUČAK

Cilj ispitivanja bio je utvrditi utjecaj raznih vrsta ispuna kod 3D ispisa na pritisna svojstva ABS epruveta. Uspoređivane su maksimalne postignute sile i pritisne čvrstoće. Mase svih epruveta su bile dosta slične, no vremena su jako varirala od 26 pa do 57 minuta. Kao rezultat je dobiveno da je najčvršća ispuna oblika saća s čvrstoćom 23,732 MPa. Najlošija ispuna je bio gyroid s čvrstoćom od 9,7115 MPa. No također valja istaknuti trokutastu ispunu koja je postigla pritisnu čvrstoću od 12,566 MPa. To nije najbolji rezultat, ali ona ispada optimalnom opcijom ako se kao kriterij izbora ispune uzme i vrijeme izrade, pošto je ova epruveta izrađena tijekom gotovo najkraćih 27 minuta, dok je za ispunu oblika saća bilo potrebno više nego dvostruko toliko - 57 minuta.

LITERATURA

- [1] D. Godec, M. Šercer: *Aditivna proizvodnja*, 2015.
- [2] 7 A. Gebhardt: *Rapid Prototyping*, 2003.
- [3] 27 R. Noorani: *Rapid Prototyping principles and applications*, 2006.
- [4] 8 D. Godec: *Utjecaj hibridnog kalupa na svojstva injekcijski prešanog plastomernog odsjeka*, 2005.
- [5] 45 G. N. Levy, R. Schindler, J. P. Kurth: *Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives*, 2003.
- [6] 43 N.N.: *Instructions manual for the StereoLithography Apparatus (SLA-250)*, 2001.
- [7] 46 R. B. Kulkarni, C. Manners: *Stereolithographic supports*, 2012.
- [8] 47 A. Maffezzoli: *A prototyping: an overview*, 2012.
- [9] <https://prototechasia.com/en/stereolithography/advantages>
- [10] 5 A. Norton: *Utilising Rapid Product Development and Late Customization Methodologies within Manufacturing SME-s*, 2003.
- [11] 67 B. Shockley: *Selective Laser Sintering*, 2003.
- [12] <https://3dinsider.com/sls-printing/>
- [13] 42 S. Graham: *Rapid prototyping: a key to a fast tracking design manufacture*, 2000.
- [14] <https://pick3dprinter.com/lom-3d-printing/>
- [15] <https://www.treatstock.com/guide/article/118-express-guide-of-fdm-3d-printing-materials>
- [16] <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>
- [17] T. Swetham, K. M. M. Reddy, A. Huggi, M. N. Kumar: *A Critical Review on of 3D Printing Materials nad Details of Materials used in FDM*, 2017.
- [18] <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>
- [19] <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Materials/PEEK>
- [20] <https://tractus3d.com/materials/ultem/>
- [21] <https://www.3dnatives.com/en/stereolithography-explained100420174/>
- [22] <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>
- [23] <https://ytec3d.com/plan-b/>
- [24] <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>

PRILOZI

I. CD-R disc