

Aditivna proizvodnja

Netrećić, Dario

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:850013>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-05**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Stručni studij Strojарstva

Dario Netrećić
ADITIVNA PROIZVODNJA
Additive manufacturing
Završni rad

Karlovac, 2018.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Stručni studij Strojарstva

Dario Netrećić

ADITIVNA PROIZVODNJA

Additive manufacturing

Završni rad

Nikola Šimunić, mag.ing.mech.

Karlovac, 2018.

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

Zahvaljujem se svima koji su mi omogućili uspješno izvršavanje obveza koje sam preuzeo prilikom upisa na stručni studij strojarstva.

Posebno se zahvaljujem mentoru, mag.ing.mech. Nikoli Šimunić, na pruženom vremenu i pomoći prilikom izrade ovog rada.

Veliko hvala dugujem svojoj obitelji koja mi je pružila potrebnu pomoć i podršku tijekom studiranja.

Dario Netrećić



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Strojarsva

Usmjerenje: Proizvodno Strojarsvo

Karlovac, 07.12.2017.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Netretić Dario**

Matični broj: 0110613019

Naslov: **Aditivna proizvodnja**

Opis zadatka:

U završnom radu potrebno je dati aktualni pregled postupaka u području aditivne proizvodnje. Za svaki postupak (tehnologiju) potrebno je opisati principe rada i primjenu, materijale koji se koriste te navesti prednosti i nedostatke. Nadalje, potrebno je napraviti istraživanje tržišta te za svaki postupak pronaći i usporediti uređaje koji su danas dostupni na tržištu. Na temelju prikupljenih informacija iznijeti zaključke i preporuke.

Koristiti odgovarajuću dostupnu literaturu, priručnike i podatke.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

07.12.2017.

12.03.2018.

20.03.2018.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Nikola Šimunić, mag.ing.mech.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Razvoj aditivne proizvodnje	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA	5
2.1. Značajke aditivne proizvodnje	5
2.2. Načelo izrade tvorevina u aditivnoj proizvodnji.....	7
2.3. Tehnologije aditivne proizvodnje	8
2.3.1. Stereolitografija (SLA)	10
2.3.1.1. Princip rada	11
2.3.1.2. Materijali.....	12
2.3.1.3. Primjena	12
2.3.2. Selektivno lasersko srašćivanje (SLS)	12
2.3.2.1. Princip rada	13
2.3.2.2. Materijali.....	14
2.3.2.3. Primjena	14
2.3.3. Taložno srašćivanje (FDM)	14
2.3.3.1. Princip rada	15
2.3.3.2. Materijali.....	16
2.3.3.3. Primjena	16
2.3.4. Laminiranje (LOM)	17
2.3.4.1. Princip rada	17
2.3.4.2. Materijali.....	18
2.3.4.3. Primjena	18
2.3.5. 3D tiskanje (3DP).....	19
2.3.5.1. Princip rada	19
2.3.5.2. Materijali.....	20
2.3.5.3. Primjena	20
2.3.6. PolyJet postupak	21
2.3.6.1. Princip rada	21
2.3.6.2. Materijali.....	22
2.3.6.3. Primjena	22
2.3.7. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP).....	22
2.3.7.1. Princip rada	23
2.3.7.2. Materijali.....	24
2.3.7.3. Primjena	24
2.3.8. Proizvodnja kontinuiranim tekućim povezivanjem (CLIP)	25
2.3.8.1. Princip rada	25
2.3.8.2. Materijali.....	26

2.3.8.3. Primjena	26
3. UREĐAJI ZA ADITIVNU PROIZVODNJU	27
3.1. SLA 3D pisači	27
3.2. SLS 3D pisači.....	30
3.3. FDM 3D pisači.....	32
3.4. LOM 3D pisači.....	35
3.5. PolyJet 3D pisači.....	37
3.6. DLP 3D pisači.....	40
3.7. CLIP 3D pisači.....	43
4. ZAKLJUČAK.....	45
PRILOZI.....	46
LITERATURA.....	47

POPIS SLIKA

Slika 1. Usporedba aditivnih postupaka s konvencionalnim postupcima	5
Slika 2. Područja primjene aditivne proizvodnje	6
Slika 3. Proces izrade sloj po sloj	7
Slika 4. Postupci aditivne proizvodnje	9
Slika 5. Princip SLA postupka	10
Slika 6. Princip SLS postupka	12
Slika 7. Princip FDM postupka	15
Slika 8. Princip LOM postupka	17
Slika 9. Princip 3DP postupka	19
Slika 10. Princip PolyJet postupka	21
Slika 11. Princip DLP postupka	23
Slika 12. Princip CLIP postupka	25
Slika 13. Formlabs Form 2 SLA 3D pisac	27
Slika 14. Sinterit Lisa SLS 3D pisac	30
Slika 15. Ultimaker 2 Extended + FDM 3D pisac	32
Slika 16. Matrix 300 + LOM 3D pisac	35
Slika 17. Objet 1000 Plus PolyJet 3D pisac	37
Slika 18. Colido DLP 2.0 DLP 3D pisac	40
Slika 19. Carbon M2 CLIP 3D pisac	43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci SLA postupka.....	11
Tablica 2. Prednosti i nedostaci SLS postupka	11
Tablica 3. Prednosti i nedostaci FDM postupka	11
Tablica 4. Prednosti i nedostaci LOM postupka	11
Tablica 5. Prednosti i nedostaci 3DP postupka.....	20
Tablica 6. Prednosti i nedostaci PolyJet postupka	22
Tablica 7. Prednosti i nedostaci DLP postupka.....	24
Tablica 8. Prednosti i nedostaci CLIP postupka	26
Tablica 9. Usporedba dostupnih SLA 3D pisača	28
Tablica 10. Vrednovanje dostupnih SLA 3D pisača	29
Tablica 11. Usporedba dostupnih SLS 3D pisača	31
Tablica 12. Vrednovanje dostupnih SLS 3D pisača.....	31
Tablica 13. Usporedba dostupnih FDM 3D pisača	33
Tablica 14. Vrednovanje dostupnih FDM 3D pisača	34
Tablica 15. Usporedba dostupnih LOM 3D pisača	36
Tablica 16. Vrednovanje dostupnih LOM 3D pisača.....	36
Tablica 17. Usporedba dostupnih PolyJet 3D pisača	38
Tablica 18. Vrednovanje dostupnih PolyJet 3D pisača.....	39
Tablica 19. Usporedba dostupnih DLP 3D pisača	41
Tablica 20. Vrednovanje dostupnih DLP 3D pisača	42
Tablica 21. Usporedba dostupnih CLIP 3D pisača	43
Tablica 22. Vrednovanje dostupnih CLIP 3D pisača.....	44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis
3D	Trodimenzionalno
UV	Ultraljubičasto (eng. Ultraviolet)
CO ₂	Ugljični dioksid
CAD	Dizajn potpomognut računalom (eng. Computer-aided Design)
NC	Numeričko upravljanje (eng. Numeric Control)
STL	Standardni jezik mozaika (eng. Standard Tessellation Language)
AMF	Aditivna proizvodnja datoteka (eng. Additive Manufacturing File)
SLA	Stereolitografija (eng. Stereolithography)
SLS	Selektivno lasersko srašćivanje (eng. Selective Laser Sintering)
FDM	Taložno srašćivanje (eng. Fused Deposition Modeling)
LOM	Laminiranje (eng. Laminated Object Manufacturing)
3DP	Trodimenzionalno tiskanje (eng. 3D Printing)
DLP	Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (eng. Digital Light Processing)
LLM	Slojevita proizvodnja laminiranjem (eng. Layer Laminate Manufacturing)
PMMA	Polimetil-metakrilat
EP	Epoksidna smola
PE - HD	Polietilen visoke gustoće
PVC	Polivinil-klorid
PA	Poliamid
ABS	Akronitril-butadien-stiren (eng. Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)
USD	Američki Dolar (eng. United States Dollar)
SDL	Selektivno depozitno laminiranje (eng. Selective Deposition Lamination)
CLIP	Proizvodnja kontinuiranim tekućim povezivanjem (eng. Continuous Liquid Interface Production)

SAŽETAK

Aditivne tehnologije počele su se razvijati i primjenjivati drugom polovicom 80-ih godina prošlog stoljeća. Glavni uzrok je bilo zadovoljavanje tržišta koje zahtijeva sve veću kvalitetu proizvoda, fleksibilnost, manje troškove, kraća vremena razvoja i proizvodnje, te maloserijsku i pojedinačnu proizvodnju.

U sklopu aditivnih tehnologija su se razvili i 3D pisači koji omogućuju značajnu ekspanziju primjene aditivnih tehnologija za razvoj i proizvodnju. Veliki broj 3D pisara se počeo javljati na tržištu, što otežava izbor potencijalnom investitoru.

U okviru ovoga rada obrađene su aditivne tehnologije, primjena, dostupni materijali, predstavnici (3D pisači) koji su najzastupljeniji i najpopularniji na tržištu za svaku pojedinu tehnologiju, te usporedbe 3D pisara prema određenim parametrima koje ukazuju na što sve treba obratiti pozornost pri odabiru 3D pisara.

Ključne riječi: aditivne tehnologije, proizvodnja, 3D pisači

SUMMARY

Additive technologies have begun its development and application since the second half of the 1980s. The main reason behind that was to fulfil the market demands of increased product quality, flexibility, lower costs, shorter development time and production, as well as small series and individual production.

As part of additive technologies, 3D printers have been developed and allow a significant expansion of the application of additive technologies for development and production. A large number 3D printers on the market make it difficult for the potential investor to choose from.

Additive technologies, application, available materials, representatives (3D printers) which are the most common and the most popular on the market for each technology, and comparisons of 3D printers according to certain parameters that point to what you should pay attention when choosing a 3D printer, were all explained.

Key words: additive technologies, manufacturing, 3D printers

1. UVOD

Aditivna tehnologija se može smatrati jednim značajnim iskorakom u svijetu tehnologija, a njena nagla ekspanzija primjene u svim segmentima razvoja i proizvodnje samo to potvrđuje. Danas je općenito vijek trajanja proizvoda na tržištu sve kraći kao i želja za sve većim varijantama pojedinih proizvoda i tu se aditivne tehnologije savršeno uklapaju, jer omogućuju da ono što zatreba, ili se osmisli bude realizirano i ostvareno u vrlo kratkom razdoblju.

1.1. Razvoj aditivne proizvodnje

Pojam aditivne proizvodnje definiran je 2009. godine kao krovni termin od strane međunarodne komisije *ASTM International Committee f42*. U brojnim literaturama susreću se i termini aditivni procesi, aditivni postupci, slojevita proizvodnja, i drugi. Aditivna proizvodnja odgovor je na dinamiku današnje industrije, te je interdisciplinarni proces. Prema autorima Šercer i Godec razvitak aditivne proizvodnje proizlazi iz suradnje stručnjaka iz različitih polja pri izvršavanju zajedničkih projekata. [1]

Uz interdisciplinarnost, koja zahtijeva maksimalno iskorištavanje potencijala postupaka aditivne proizvodnje, ne smije se smetnuti s uma ni odgovarajuće obrazovanje budućih stručnjaka, koji će inovativnim i kreativnim idejama pomicati granice mogućnosti razvoja i proizvodnje novih proizvoda. Takve pomake mogu im omogućiti jedino postupci aditivne proizvodnje. [1]

Prvi pokušaj stvaranja čvrstih objekata pomoću fotopolimera i laserske tehnologije dogodio se kasnih šezdesetih godina prošloga stoljeća u „Battelle Memorial“ institutu. Eksperiment je uključivao presijecanje dviju laserskih zraka različitih valnih duljina u sredini posude smole, pokušavajući polimerizirati materijal na mjestu križanja zraka. Fotopolimerna smola koja se koristila u procesu izumljena je 1950-tih sa strane tvrtke DuPont. [2]

1967. godine Wyn K. Swainson aplicira se za patent pod nazivom „Metode iz 3D objekta pomoću holografije“ primjenjujući postupak s dvostrukim laserom izvedenim 1950-tih godina. Krajem 1970-tih, Dynell Electronics Corp.-u dodijeljen je niz patenata za čvrstu fotografiju. Izum je uključivao rezanje poprečnih presjeka računalnom kontrolom, koristeći glodalicu ili laser, te spremanje u registar kako bi se stvorio 3D objekt. [3]

Hideo Kodama iz Instituta za industrijski općinski institut u Nagoyi (Nagoyya, Japan) među prvima je izmislio jednozračno lasersko stvrdnjavanje, prema različitim izvorima. U svibnju 1980. godine prijavio se za patent u Japanu, no rok je istekao prije nego što je prijava i sam rad preuzet na pregled. U listopadu iste godine, Kodama izdaje rad pod nazivom „Three-Dimensional Data Display by Automatic Preparation of a Three-Dimensional Model“ koje u detaljima ističe njegov rad. Njegovi eksperimenti su se sastojali od projiciranja UV zraka i fotosenzibilne smole nazvane Tevistar, kojeg proizvodi Teijin. Metoda je uključivala crno-bijeli film koji služi za maskiranje i kontrolu područja ekspozicije, što odgovara svakom presjeku. U radu se također raspravlja o upotrebi uređaja x-y plotera i optičkih vlakana kako bi se isporučilo mjesto UV svjetla. Kodama je u studenom 1981. objavio drugi članak, pod nazivom Automatska metoda za izradu trodimenzionalnog plastičnog modela s polimerom foto-očvršćivanjem. Kodama opisuje tri osnovne tehnike koje je koristio za izradu plastičnih dijelova skrutnjivanjem tankih, uzastopnih slojeva fotopolimera. U radu, Kodama tvrdi: "Ako se skrućeni sloj uranja u tekućinu s vrhom na dubini jednakoj debljini sloja koji se skrutne, njezina gornja površina prekrivena je tekućim polimerom", koji u osnovi opisuje ključni element stereolitografskog procesa. [3]

U kolovozu 1982., Alan Herbert iz 3M Laboratorija za sektor grafičkih tehnologija objavio je rad pod nazivom „Solid Object Generation“ u časopisu „Journal of Applied Photographic Engineering“. U ovom radu Herbert je opisao sustav koji usmjerava lasersku zračnu zonu argona na površinu fotopolimera pomoću sustava zrcala povezanog s uređajem xy plotera. S tim sustavom Herbert je uspio stvoriti nekoliko manjih, osnovnih oblika. [3]

Međutim prema Herbertu, primarna svrha rada bila je razviti razumijevanje za zahtjeve stvarnog sustava. U srpnju 1984., Jean-Claude Andre s francuskim Nacionalnim centrom za znanstveni rad u Nancyu u Francuskoj i kolegama koji rade za Francusku tvrtku Cilas Alcatel Industrial Laser Company, podnijeli su patent pod nazivom „Apparatus for Fabricating a Model of an Industrial Part“, koji uključuje laserski pristup s jednim snopom svjetla. Francuski patent je odobren u siječnju 1986. Laser 3D nastojao je napraviti tehniku opisanu u patentu komercijalno dostupnom na usluzi bez planova prodaje sustava. [3]

1987. godine američka tvrtka „3D systems“ razvija stereolitografiju, čime započinje i razvoj postupaka aditivne proizvodnje. Postupak je definiran očvršćivanjem fotopolimera u tankim slojevima uzrokovano djelovanjem ultraljubičastog zračenja putem lasera. Sukladno tome, SLA-1 bio je prvi komercijalno raspoloživi sustav za aditivnu proizvodnju. [1]

Selektivno lasersko srašćivanje na tržištu se pojavljuje 1992. godine, gdje se kao pioniri iskazuju tvrtke DTM (kupljena od strane 3D systems) te Teijin Seiki. [1]

Godine 1996. tvrtka *Stratasys* predstavila je uređaj *Genysis*, koji je radio prema načelima postupka ekstrudiranja, slično kao i FDM postupak, no temeljio se na aditivnom procesu razvijenom u *IMB Watson Research Center*. Nakon osam godina proizvodnje i prodaje sustava za stereolitografiju tvrtka 3D Systems plasirala je na tržište svoj prvi 3D pisac (Actua 2100) s ink-jet mehanizmom. Potom tvrtka *BPM Technology* komercijalizira sustav za postupak balističkog oblikovanja. Postupak je temeljen na principu nanošenja voska uz pomoć ink-jet glave pisaa. Iste godine pojavljuju se i pisaa azijskih poduzeća koje se temelje na LOM postupku. [1]

1997. godine osniva se tvrtka AeroMet, te razvija sustav koji koristi laser visoke snage te srašćuje dodane čestice koje se koriste za izradu proizvoda od titanovih legura, tj. laserska aditivna proizvodnja. Do napuštanja tog projekta u prosincu 2005. godine AeroMet je proizvodio dijelove za zrakoplovnu industriju kao pružatelj usluga. [1]

2002. godine francuska tvrtka *Phenix Systems* prodaje uređaj Phenix 900, uređaj koji koristi postupak srašćivanja keramike i metala u čvrstoj fazi.

2004. tvrtka *Object Geometris* predstavlja seriju neprozirnih materijala u boji pod nazivom Vero FullCure 800, koji omogućuju postizanje boljih mehaničkih svojstva kod proizvoda te pruža kvalitetniju vizualizaciju detalja na istim. Također iste godine tvrtka *3D Systems* prodaje uređaj InVision HR, uređaj visoke razlučivosti koji pogađa ciljano tržište draguljara. Tvrtka *DSM Somos* predstavlja noanokompozitne materijale, materijale visoke istežiljivosti, materijale postojane na trošenje i toplinski postojane materijale za aditivnu proizvodnju temeljenu na slojevima. [1]

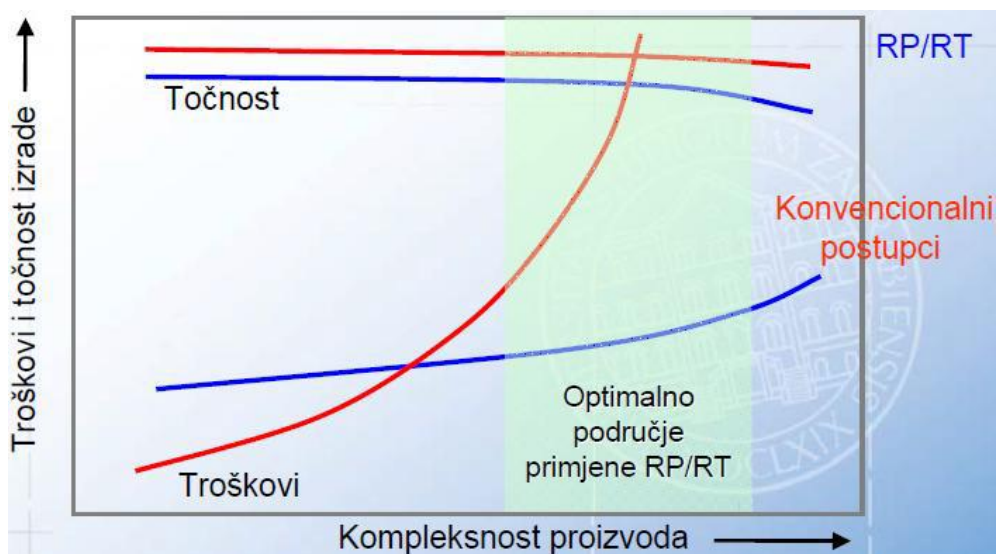
Potom tvrtka *Optomec* objavljuje novu glavu za širokokutno raspršivanje Aerosol Jet kojoj je namjena ispisivanje 3D i konformne elektronike u lipnju 2011. godine. Iako je poznata uglavnom u industriji aditivne proizvodnje za „LENS“ opremu, Optomecov Aerosol Jet ispis proizašao je iz DARPA-inog programa pod imenom *Mesosopic Integrated Conformal Electronics*. Svrha namjene jest korištenje za tisak 3D elektronike, solarnih ćelija i zaslona. [2]

U ožujku 2013. godine švedska tvrtka *Arcam* objavljuje stroj Arcam Q10. *Materialise* najavljuje HeartPrint servis uz pomoć kojega se može printati specifične kardiovaskularne modele po mjeri pacijenta koji se koriste u pred-operativnom planiranju i pri testiranju medicinskih uređaja. [2]

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

2.1. Značajke aditivne proizvodnje

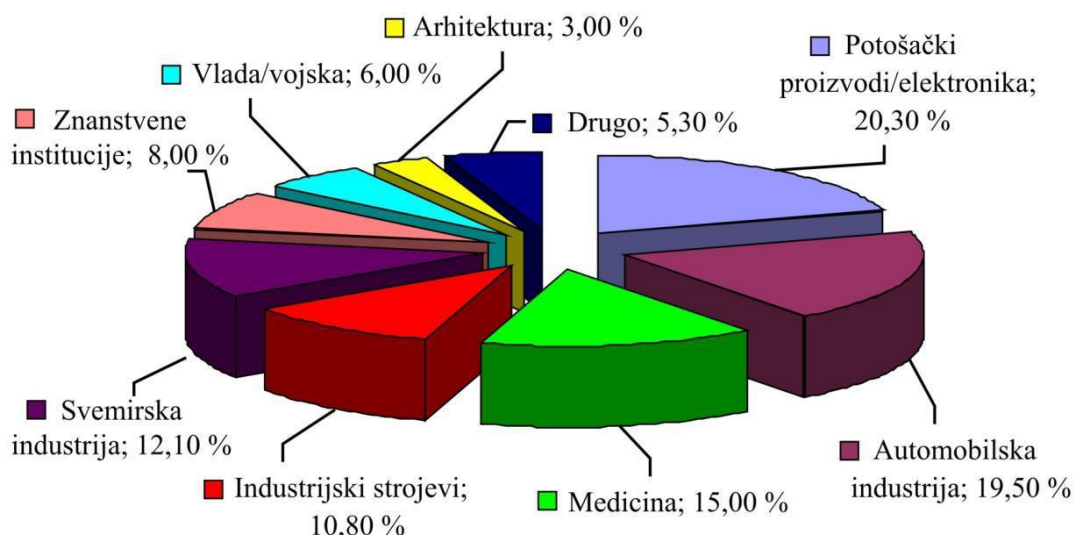
Postupcima aditivne proizvodnje mogu se izraditi dijelovi relativno komplicirane geometrije na temelju računalnog 3D modela tvorevine u relativno kratkom vremenu. Razlika takvih tvorevina u odnosu na tvorevine načinjene nekim klasičnim postupcima prerade polimera (npr. injekcijskim prešanjem ili ekstrudiranjem) je u svojstvima tvorevina (mehanička svojstva, dimenzijska stabilnost, izgled površine, postojanost na atmosferilije itd.) koja se dosta razlikuju. Visoki zahtjevi tržišta koji se orijentiraju na izradu komplicirane tvorevine u što kraćem vremenu postavili su pred aditivne postupke nove ciljeve u pogledu svojstava materijala, strojeva i računalne podrške. Tako se na slici 1. može vidjeti usporedba točnosti i troškova između konvencionalnih postupaka i aditivnih u ovisnosti o kompleksnosti izrade tvorevine. [4]



Slika 1. Usporedba aditivnih postupaka s konvencionalnim postupcima. [5]

Postoje različiti načini proizvodnje aditivnim postupcima, ali svi izrađuju tvorevine dodavanjem materijala sloj po sloj. Glavna je prednost aditivnih postupaka to što izrađuju tvorevinu u jednom koraku, izravno iz modela. Aditivni postupci ne zahtijevaju planiranje toka procesa, izradu kalupa, specifičnu opremu za rad s materijalima, transport između radnih mjesta itd. Glavni nedostatak, trenutačno, je ograničenje samo na određene materijale. No kako se sami aditivni postupci sve više nastoje poboljšati, današnji se prototipovi mogu upotrijebiti kao funkcionalne gotove tvorevine. [4]

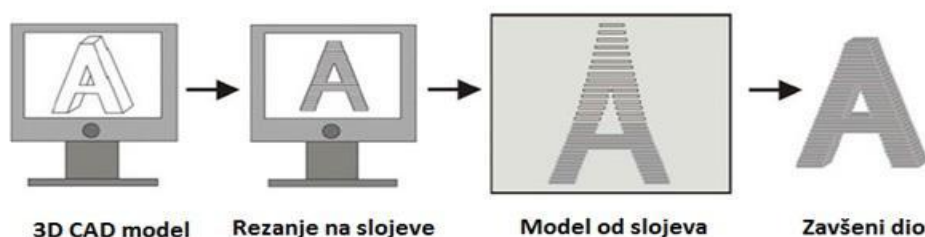
Aditivna proizvodnja može skratiti vrijeme i sniziti troškove potrebne da se napravi nova tvorevina od početnoga koncepta do proizvodnje. Aditivni postupci mogu pomoći u prepoznavanju osnovnih pogrešaka na tvorevinama koje su u kasnijim fazama njihove proizvodnje skupe za ispravljanje. Međutim, dijelovi nastali aditivnom proizvodnjom nisu jeftini (na njihovu cijenu utječe: vrijeme izrade, cijena potrebne opreme i poslije održavanje, rad operatera – tijekom izrade, naknadne obrade i čišćenja, cijena osnovnog materijala i cijena materijala za potpurnu strukturu). Katkad je teško odlučiti koliko tvorevina treba načiniti da se dobije maksimalna korist od njih. [4]



Slika 2. Područja primjene aditivne proizvodnje. [4]

2.2. Načelo izrade tvorevina u aditivnoj proizvodnji

Načelo izrade tvorevine u aditivnoj proizvodnji temelji se na generativnom (generičkom) načelu gradnje tvorevina sloj po sloj. 3D model konstruiran računalom izreže se na dvodimenzionalne slojeve jednake debljine, koji se slažu jedan na drugi. Tako se postiže trodimenzionalni oblik, sa stepenastim izgledom površine, upravo zbog načela slaganja sloj po sloj. [4] Na slici 2. je prikazano načelo izrade i kako zbog rezanja na tanke slojeve dolazi do stepenaste površine modela.



Slika 3. Proces izrade sloj po sloj. [6]

Načelo aditivne proizvodnje tvorevina uvijek je isto, neovisno kojim postupkom ga izvodili, a može se podijeliti u sljedeće faze izrade: [4]

- izrada CAD modela
- pretvaranje CAD modela u STL datoteku
- prebacivanje STL datoteke na stroj za aditivnu proizvodnju
- podešavanje parametara stroja
- izrada prototipa
- vađenje prototipa
- naknadna obrada, ako je potrebna
- primjena

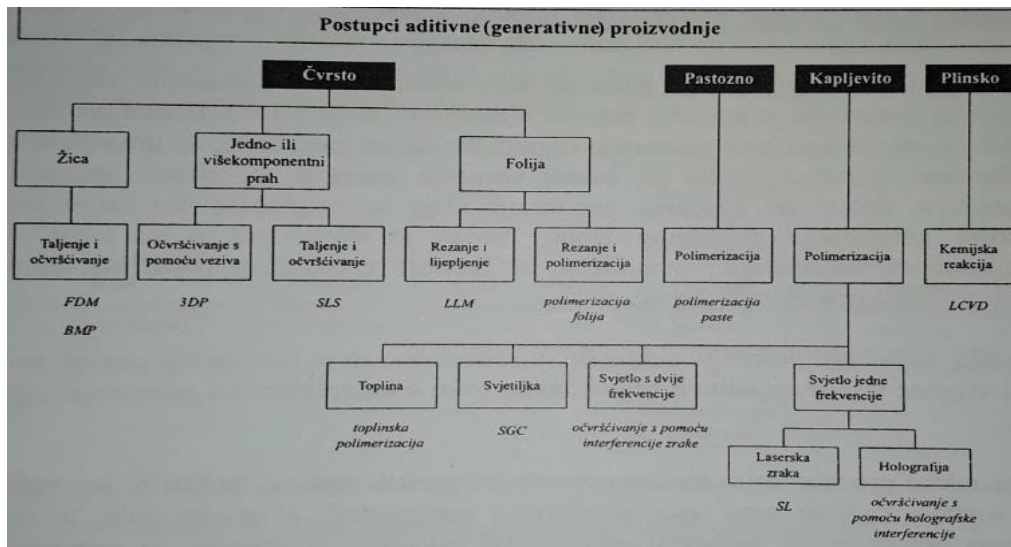
Prvi korak svih postupaka aditivne proizvodnje je izrada trodimenzionalnoga geometrijskog modela u nekom CAD programu. Takav model sprema se u različitim formatima, no već od 1987. tvrtka 3D Systems uvodi STL datoteku (eng. Standard Tessellation Language), koja predmet pokazuje kao mrežu povezanih trokuta. STL datoteka nema boje, pa je 2009. uvedena AMF datoteka (eng. Additive Manufacturing File), koja uz STL postaje standard za postupke aditivne proizvodnje i čini osnovu za rezanje u slojeve, na čemu se temelje svi postupci aditivne proizvodnje. AMF datoteka predstavlja jedan ili više objekata raspoređenih u vektore. Svaki je objekt opisan kao skupina ne preklapljenih volumena koji su opisani kao mreža trokuta koja povezuje skupinu točaka. Te se točke mogu podijeliti između volumena. AMF datoteka može opisati materijal i boje pojedinog volumena te boju svakog trokuta u mreži. [4]

Nakon podešavanja parametara stroja (debljina sloja, snaga, brzina itd.) slijedi pravljenje prototipa te, nakon završetka zadnjeg sloja, vađenje gotovog prototipa. Prilikom vađenja treba paziti da je temperatura u radnom prostoru stroja dovoljno niska za sigurno rukovanje tvorevinama. U nekim postupcima (npr. stereolitografija) potrebno je naknadno umrežavanje da bi se završio proces polimerizacije i poboljšala mehanička svojstva, jer unutarnji dijelovi slojeva možda nisu potpuno očvršnuti. Slijedi naknadna obrada (čišćenje viška materijala, odstranjivanje potporne strukture, bojenje...). [4]

2.3. Tehnologije aditivne proizvodnje

Tehnologije aditivne proizvodnje mogu se općenito podijeliti na postupke koji upotrebljavaju materijal u čvrstom stanju (npr. žica, papir, folija, laminat), kapljevinu i prah.

Postupci kod kojih se koristi čvrsti materijal su taložno očvršćivanje (eng. Fused Deposition Modeling, FDM) i proizvodnja laminiranih objekata (eng. Laminated Object Manufacturing, LOM). Postupci koji upotrebljavaju kapljevine materijale su stereolitografija (eng. Stereolithography, SLA) i PolyJet postupak. Postupci koji koriste prah su taljenje pomoću snopa elektrona (eng. Electron Beam Melting, EBM), selektivno lasersko srašćivanje (eng. Selective Laser Sintering, SLS) i 3D tiskanje (eng. 3D Printing, 3DP). [4]



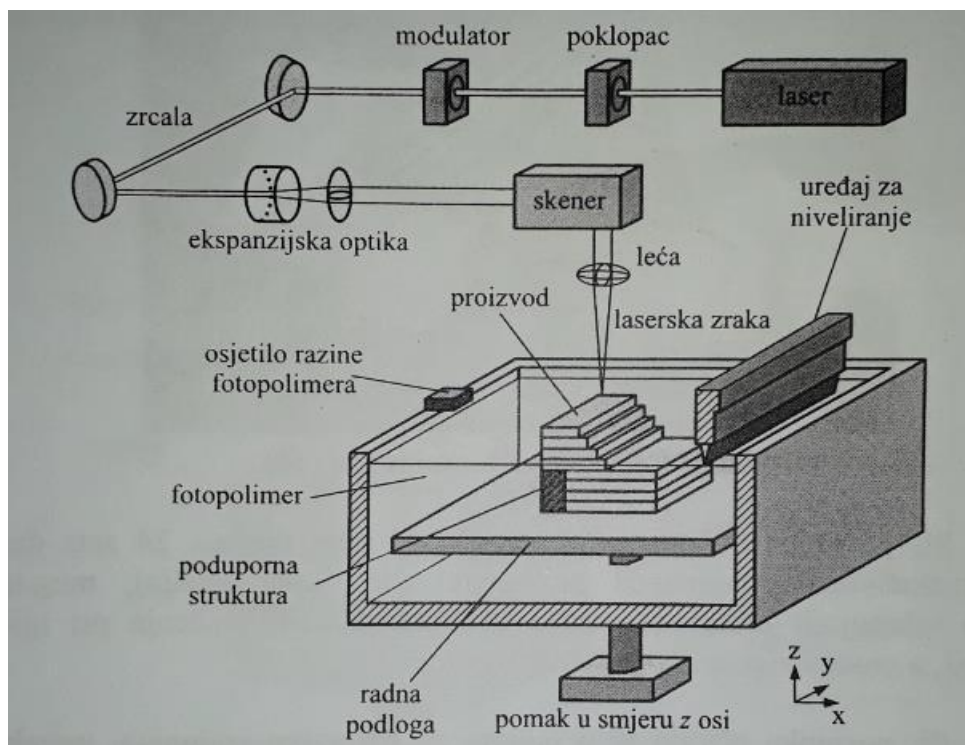
Slika 4. Postupci aditivne proizvodnje. [1]

Najvažniji postupci aditivne proizvodnje su: [5]

- stereolitografija (eng. Stereolithography) – SLA, SL
- selektivno lasersko srašćivanje (eng. Selective Laser Sintering) - SLS
- taložno srašćivanje (eng. Fused Deposition Modeling) – FDM
- laminiranje (eng. Laminated Object Manufacturing) – LOM
- 3D tiskanje (eng. 3D Printing) – 3DP
- PolyJet postupak (eng. PolyJet)
- očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (eng. Digital Light Processing) - DLP
- proizvodnja kontinuiranim tekućim povezivanjem (eng. Continuous Liquid Interface Production) - CLIP

2.3.1. Stereolitografija (SLA)

Jedna od najčešće upotrebljivanih tehnologija aditivne proizvodnje jest stereolitografija. Proces se temelji na fotolitografskim metodama s UV polimerizacijom. Proizvodi s pomoću postupaka stereolitografije nastaju polimeriziranjem niskoviskozne polimerne kapljevine sloj po sloj. [1]



Slika 5. Princip SLA postupka. [1]

Elementarni dijelovi SLA uređaja laser i njegova optička oprema, zrcalo koje je potrebno za usmjeravanje zraka, posuda s fotopolimerom i pokretna podloga s mogućnošću kretanja u smjeru okomite osi dužinom razmaka sloja CAD modela. [1]

2.3.1.1. Princip rada

Princip rada temelji se na generiranju i usmjeravanju laserske UV zrake koja se potom preko pomičnih zrcala usmjerava na različite horizontalne ravnine fotopolimera. Molekule fotopolimera selektivno se očvršćuju prilikom zračenja, sukladno tome osim očvršćivanja fotopolimer se i srašćuje i time se prijanja na prethodni sloj. Početni sloj najčešće se nanosi na metalnu radnu podlogu. Pri završetku nanošenja sloja, radna podloga se spušta po vertikalnoj osi za debljinu idućeg sloja. Kako je proizvod građen u kapljevitom stanju, pri izradi određenih oblika, potrebno je koristiti podupor. Podupor je fizički proizvod koji je potrebno napraviti tijekom procesa pravljenja prototipnog proizvoda. [1]

Većina fotopolimera reagira na radijaciju UV frekventnog pojasa. Pri izlaganju takvim zrakama fotopolimerni materijali se podvrgavaju kemijskoj reakciji pri kojoj dolazi do stvrdnjavanja. Može se koristiti više vrsta radijacije zrakama, poput gama zraka, X-zraka, snop elektrona, UV, te u određenim sustavima vidljiva svjetlost. U SL sustavima, UV i vidljive zrake najčešće su u upotrebi. U mikroelektronskoj industriji koriste se UV zrake i snopovi elektrona dok u dentalnoj industriji pretežito dominiraju zrake iz vidljivog spektra. [7]

Prednosti i nedostaci SLA postupka prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci SLA postupka. [1]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • mogućnost rada 24 h dnevno • visoka razlučivost • izrada višebojnih proizvoda • nema geometrijskih ograničenja • potpuno automatiziran proces 	<ul style="list-style-type: none"> • potreba za podupor i naknadno uklanjanje istog • potrebna naknadna obrada proizvoda • deformacija polimera pri očvršćivanju • razvijaju se otrovni plinovi • ograničenje materijala samo na fotopolimere • ograničena primjena proizvoda

2.3.1.2. Materijali

Stereolitografijom se uglavnom prerađuju fotopolimeri, kao što su: [4]

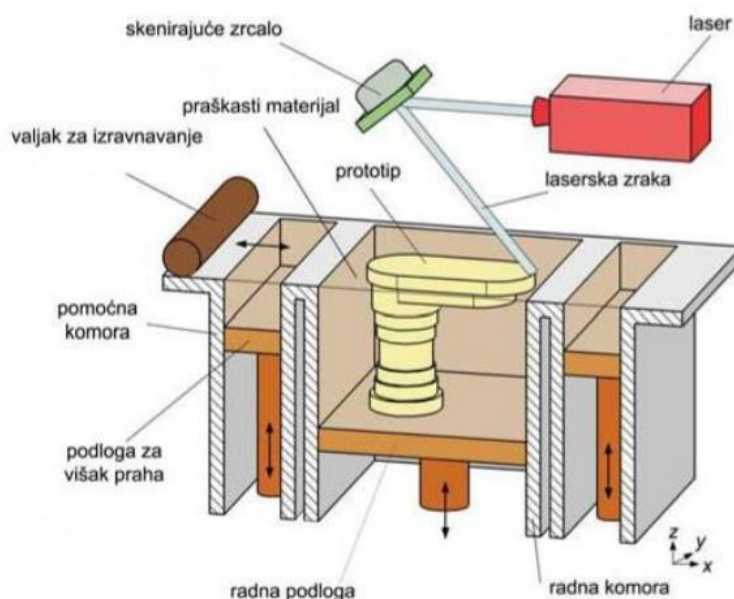
- fotoosjetljiva polimerna smola
- akrilne i epoksidne smole (npr. PMMA, EP, PE-HD)
- keramika

2.3.1.3. Primjena

Stereolitografija se koristi u različitim granama industrije gdje su potrebni modeli za testiranje oblika i pozicioniranje, izradu kalupa, za brzu izradu alata, izradu kopča i aplikacija otpornih na toplinu. Ima važnu ulogu u medicini jer se koristi za izradu određenih dijelova kostiju. [4]

2.3.2. Selektivno lasersko srašćivanje (SLS)

Selektivno lasersko srašćivanje patentirano je 1986. godine te je jedno od najvažnijih tehnologija aditivne proizvodnje. Takvim je postupkom moguće prerađivati gotovo sve materijale u praškastom obliku. [1]



Slika 6. Princip SLS postupka. [8]

2.3.2.1. Princip rada

Radna komora ispunjena je inertnim plinom poput dušikovog plina kako bi se smanjio stupanj oksidacije i degradacije praškastog materijala. Prah je zagrijan i održavan na temperaturi koja je ispod granice taljenja i/ili staklastoj tranziciji temperature praškastog materijala. Infracrveni grijači smješteni su iznad radne komore kako bi održavali temperaturu u okruženju proizvoda te iznad samih pomoćnih komora gdje se nalazi višak praha. Takvo predgrijavanje praha i održavanje visoke temperature potrebno je kako bi se minimizirala potrošnja energije samog lasera u procesu izrade i kako bi se smanjile deformacije proizvoda. Kada je prašak formirao zadovoljavajući sloj te je predgrijan, fokusirana CO₂ laserska zraka usmjerena je u materijal te se pomiče uz pomoć galvanometra te na taj način srašćuje samo one čestice materijala na koje je usmjerena. Ostatak praška ostaje u početnom stanju i služi kao podupor za idući sloj. Samim time nepotrebno je koristiti ikakav drukčiji model podupora. Pri završetku sloja, radna platforma spušta se za visinu idućeg sloja, idući sloj praška potom je niveliran i spreman za ponavljanje procesa u daljnjem dijelu izrade proizvoda, te nastavlja do završetka izrade proizvoda. Potreban je period hlađenja kako bi se dozvolilo pravilno formiranje dijelova te adaptacija na temperaturu ambijenta i atmosfere. Ukoliko se ne dozvoli period hlađenja može doći do degradacije, oksidacije i deformacija uslijed neravnomjerne i nagle promjene temperatura. [7]

Prednosti i nedostaci SLS postupka prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Prednosti i nedostaci SLS postupka. [1]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • primjena većeg broja materijala • relativno brz postupak • višak praha podupire proizvode • neiskorišteni materijal se može koristiti za druge proizvode 	<ul style="list-style-type: none"> • loša kvaliteta površine proizvoda • u procesu očvršćivanja površine mogućnost očvršćivanja neiskorištenog praha • pri uporabi određenih materijala potrebna je zaštitna atmosfera (otrovni plinovi kod npr. PVC-a)

2.3.2.2. Materijali

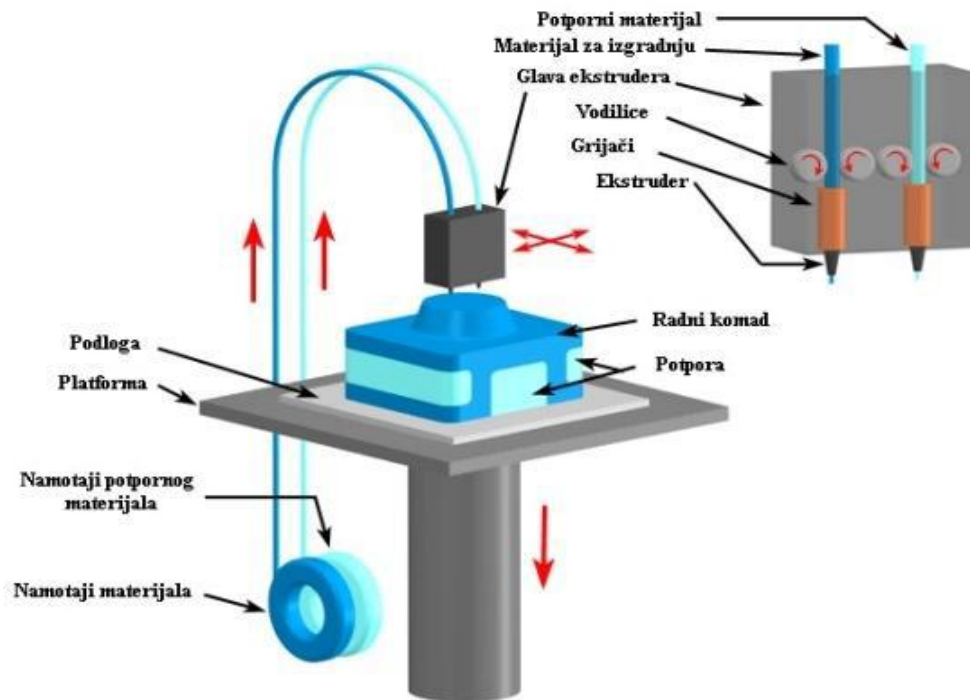
Pri proizvodnji koriste se materijali poput keramike, voskova, metalnih prahova te polimernih materijala (PVC, elastomeri, PA, itd.). Kod izrade metalnih proizvoda koriste se metalni prahovi s polimernim i metalnim vezivima te jednokomponentni prahovi za koje nije potrebno koristiti veziva. Pri korištenju materijala s vezivima, vezivo se odstranjuje pri naknadnoj obradi čime se dobivaju porozni proizvodi, pa se gustoća povećava dodatnom naknadnom obradom. [1]

2.3.2.3. Primjena

Selektivno lasersko srašćivanje koristi se u različitim granama industrije gdje su potrebni vizualni prototipovi, funkcionalni prototipovi i kalupi za lijevanje. [4]

2.3.3. Taložno srašćivanje (FDM)

Taložno srašćivanje pod razvojem tvrtke *Stratasys* se bazira na postupku izrade proizvoda sloj po sloj, koristeći najčešće rastaljeni polimerni materijal. FDM uređaji funkcioniraju na načelima troosnog NC obradnog centra. Prilikom izrade kompleksnije geometrije potrebno je koristiti podupor. U takvom slučaju rješenje je definirano korištenjem više mlaznica, a u slučaju da se koriste samo dvije mlaznice, jedna se koristi kako bi nanosila materijal za izradu proizvoda dok se druga koristi za izradu podupora. Sama kvaliteta površine proizvoda uspoređuje se s SLS postupcima, ali proizvodi su više porozniji. Mogućnost povišenja gustoće proizvoda omogućena je naknadnim postupkom prodiranja punila u sam proizvod. [1]



Slika 7. Princip FDM postupka. [9]

2.3.3.1. Princip rada

Polimerni materijal u obliku žice prolazi kroz ekstruzijsku mlaznicu kroz koju se kontrolira protok materijala. Mlaznica se grije kako bi dosegla temperaturu tališta materijala, te ima slobodu kretanja u horizontalnim i vertikalnim smjerovima. Putanja mlaznice je kontrolirana od strane programskog sustava za upravljanje. Printer putanju određuje u odnosu na prethodno učitani 3D model koji se želi izraditi. Dio se izrađuje postepenim ekstrudiranjem termoplastičnog materijala sloj po sloj. Prilikom doticaja s podlogom ili prethodno izrađenim slojem, pri pomicanju mlaznice materijal se gotovo trenutačno skrućuje. [10]

Prednosti i nedostaci FDM postupka prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Prednosti i nedostaci FDM postupka. [1]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • manja potrošnja energije • ne zahtijeva hlađenje i ventilaciju • jednostavna uporaba • relativno mala investicija/niski troškovi održavanja • male izmjere uređaja 	<ul style="list-style-type: none"> • ograničen izbor materijala • nužnost izrade podupora • vidljive linije između slojeva • mala čvrstoća proizvoda • oscilacije temperature može dovesti do delaminiranja proizvoda • potrebna naknadna obrada proizvoda

2.3.3.2. Materijali

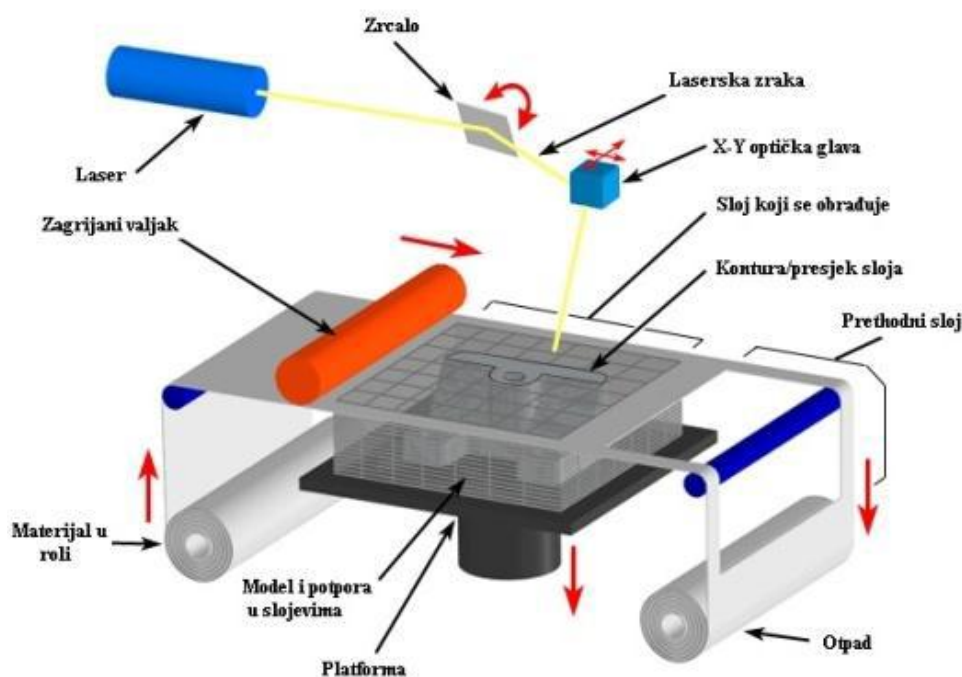
Materijali za korištenje ovim postupkom su raznoliki, uključujući i ABS (akrilonitril-butadien - stiren) koji omogućuje dobru čvrstoću, a u zadnje vrijeme su sve više su u upotrebi polikarbonati i polisulfidi čije karakteristike garantiraju bolju čvrstoću i temperaturnu otpornost. [1]

2.3.3.3. Primjena

Taložno srašćivanje koristi se kod investicijskog lijevanja, elastičnih komponenti, koncept dizajna (vizualizacije), u automobilske industriji te se primjenjuje u medicini za kirurške rekonstrukcije. [4]

2.3.4. Laminiranje (LOM)

Često u praksi nazivom „izrada objekata laminiranjem“ (eng. Laminated Object Manufacturing - LOM) zamjenjujemo postupak slojevite izrade proizvoda laminiranjem (eng. Layer Laminate Manufacturing - LLM). LLM postupak temelji se na korištenju CO₂ lasera, te se uz pomoć njega reže laminiran materijal, koji je prethodno postavljen, po unaprijed računalno definiranom obliku poprečnog presjeka željenog proizvoda. [1]



Slika 8. Princip LOM postupka. [11]

2.3.4.1. Princip rada

U procesu izrade proizvoda putem LOM tehnologije, zagrijani valjak prelazi preko radne površine (ili prethodnog sloja) kako bi se materijal mogao zalijepiti za isti. Zatim se pomoću laserske zrake izrezuje kontura presjeka dijela proizvoda kojeg se izrađuje, tj. izrezuje se dio materijala koji se ne koristi kao budući proizvod, a zatim zagrijani valjak ponovno prelazi kako bi nanio novi sloj materijala. Radna podloga se potom spušta za debljinu idućeg sloja, te se cijeli proces ponavlja dok proizvod nije gotov. Na kraju procesa, višak materijala se odstranjuje s platforme kako bi se olakšalo odvajanje gotovog proizvoda s radne podloge. [8]

Prednosti i nedostaci LOM postupka prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Prednosti i nedostaci LOM postupka. [1]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • relativno velika brzina izrade • mogućnost izrade velikih proizvoda • nije potreban podupor • nepostojanje zaostalih naprezanja • niska cijena materijala za izradu 	<ul style="list-style-type: none"> • mali izbor materijala • potreban poseban rashladni uređaj • potreba za podtlačnim sustavom za odstranjivanje viška papira i folija • anizotropna svojstva • stabilnost proizvoda ograničena čvrstoćom lijepljenih slojeva • šuplji proizvod izrađuje se kao dvodjelni • naknadna obrada + mogućnost raslojavanja • velik udio viška materijala

2.3.4.2. Materijali

Pri proizvodnji koriste se materijali: [12]

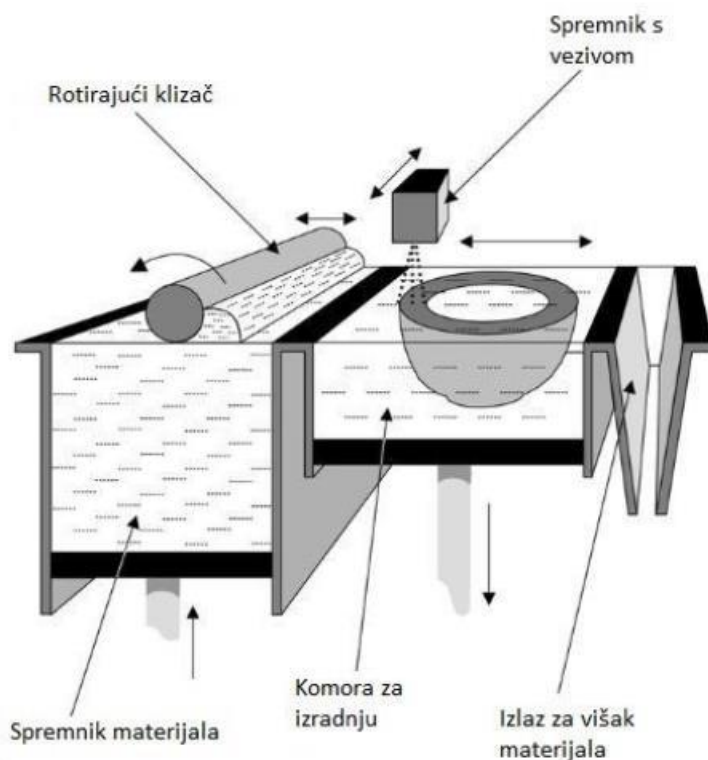
- papir
- metalne folije
- keramičke folije
- kompozitne folije

2.3.4.3. Primjena

Laminiranje se koristi za izradu funkcionalnih modela gdje je potrebna visoka čvrstoća, otpornost na agresivne medije i na visoke temperature. Modeli od papira i folije koriste se za verifikaciju oblika i sukladnosti dijelova u sklopu. Postupak se primjenjuje kod modela gdje nema sitnih detalja. [5]

2.3.5. 3D tiskanje (3DP)

U skupinu brzih postupaka aditivne slojevite proizvodnje spada postupak 3D tiskanja. Radi se o pouzdanom, jeftinom i vrlo brzom stroju koji omogućuje izradu 3D proizvoda pomoću računalnih modela, te je pristupačan za uredske uvjete pošto nema razvijanja štetnih tvari tijekom procesa proizvodnje. [1]



Slika 9. Princip 3DP postupka. [8]

2.3.5.1. Princip rada

Temelj postupka je povezivanje čestica praha s vezivom. Spremnik s vezivom pomiče se u smjeru osi x i y, dok se komora za izgradnju pomiče u smjeru z osi. U prvom dijelu procesa valjak nanosi materijal iz spremnika na podlogu za izradu proizvoda, a potom višak materijala pada u odgovarajući spremnik (izlaz za višak materijala ili u obliku spremnika za višak materijala). U povratnom procesu gibanja valjka, s mlaznicama koje su smještene na valjku, se u količini kapi nanosi vezivo na već nanoseni prah, što rezultira povezivanjem čestica praha. Pri završetku jednog sloja budućeg proizvoda, podloga se spušta te se proces ponavlja do završetka izrade proizvoda. [1]

Prednosti i nedostaci 3DP postupka prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Prednosti i nedostaci 3DP postupka. [8]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none">• kraće vrijeme izrade naspram drugih postupaka• relativno jeftiniji sirovi materijali• ponovno korištenje suvišnog materijala• uklonjena potreba za poduporom	<ul style="list-style-type: none">• loša kvaliteta površine proizvoda• po završetku potrebno je čekati da se materijal stvrdne• ograničen broj primjenjivih materijala

2.3.5.2. Materijali

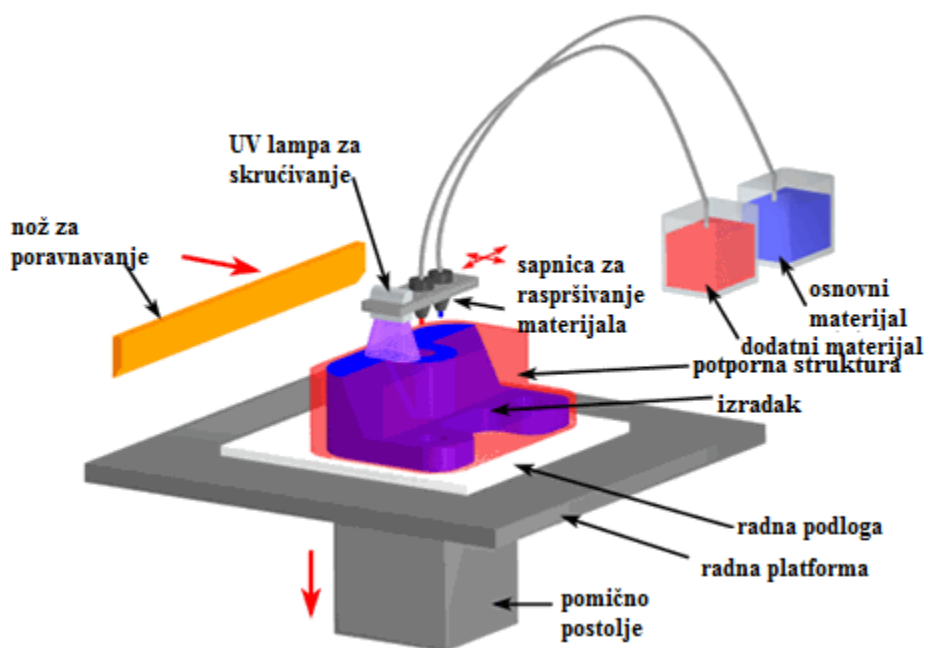
Materijal koji se upotrebljava je prah koji se bazira na gipsu i aditivima. [1]

2.3.5.3. Primjena

3D tiskanje se sve više koristi za izradu gotovih proizvoda složene geometrije. Uloga 3D tiskanja poprima sve veći značaj u individualiziranoj maloserijskoj proizvodnji, kao što je proizvodnja specijalizirane opreme, medicinskih pomagala, implantata, namještaja i dekorativnih elemenata. [4]

2.3.6. PolyJet postupak

PolyJet je tehnologija aditivne proizvodnje koja koristi kapljevite materijale. Nastala je 2000. godine sjedinjenjem dobrih strana stereolitografije i 3D tiskanja. Primjenjuju se dva različita materijala: jedan za model, drugi za potporna strukturu. Nakon završetka izrade prototipa, potporna struktura se uklanja ručno ili pod djelovanjem mlaza vode pod visokim tlakom. [13]



Slika 10. Princip PolyJet postupka. [14]

2.3.6.1. Princip rada

Mreža mlaznica kliže naprijed - nazad i nanosi sloj fotoosjetljivog polimernog materijala na radnu podlogu, debljine 16 μm , što je 1/5 debljine stereolitografskog sloja. Nakon dovršetka jednog sloja, radna podloga se spušta za debljinu drugog radnog sloja. Kao i kod stereolitografije očvršćivanje polimera se odvija uslijed djelovanja UV svjetlosti. Svaki sloj očvršćuje odmah nakon tiskanja te na taj način nastaje potpuno umrežen prototip. [13]

Prednosti i nedostaci PolyJet postupka prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Prednosti i nedostaci PolyJet postupka. [13]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • dobra kvaliteta površine proizvoda • postojanost dimenzija • modeli mogu biti od kombiniranih materijala 	<ul style="list-style-type: none"> • potreba za potpornom konstrukcijom • potrebna peć za otapanje potporne konstrukcije

2.3.6.2. Materijali

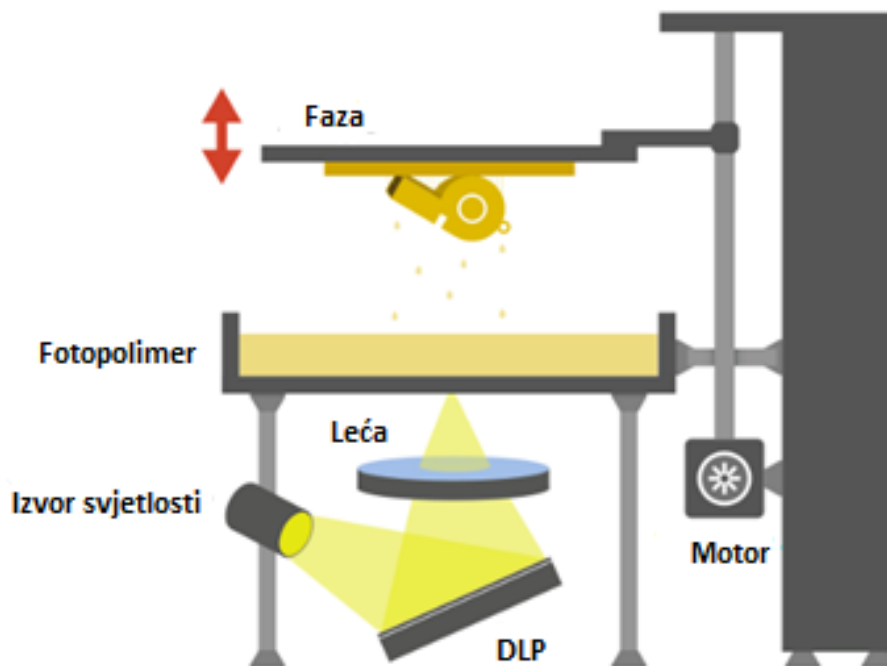
Materijali koji se najčešće upotrebljavaju za PolyJet postupak su FullCure fotopolimerni akrilni materijali koji omogućavaju izradu modela visoke preciznosti. [13]

2.3.6.3. Primjena

PolyJet postupak omogućava izradu modela finih detalja i složene geometrije pa se stoga primjenjuje u različitim granama industrije. Ima veliki značaj u proizvodnji specijalizirane opreme, medicinskih pomagala i dekorativnih elemenata. [13]

2.3.7. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP)

Proces očvršćivanja digitalno obrađenim svjetlosnim signalom je sličan procesu stereolitografije jer je to proces 3D tiska koji koristi fotopolimere. Glavna razlika je izvor svjetlosti. DLP koristi konvencionalni izvor svjetlosti, kao što je luk svjetiljka s pločom zaslona tekućeg kristala, koja se primjenjuje na cijelu površinu posude fotopolimerne smole u jednom prolazu, što ga čini bržim od stereolitografije. Također DLP proizvodi vrlo precizne dijelove ali sličnosti uključuju iste zahtjeve za strukturne potpore i naknadno stvrdnjavanje. Međutim, prednost DLP-a je manja količina otpada i manji troškovi rada. [15]



Slika 11. Princip DLP postupka. [15]

2.3.7.1. Princip rada

U ovom postupku, kada se 3D model šalje pisaru, posuda tekućeg polimera izložena je svjetlosti s DLP projektora pod uvjetima sloja. DLP projektor prikazuje sliku 3D modela na tekući polimer. Izloženi tekući polimer se stvrdne i ploča za gradnju se pomiče dolje, a tekući polimer ponovno je izložen svjetlosti. Postupak se ponavlja dok se ne završi 3D model, a posuda isprazni od tekućine, otkrivajući očvršćeni model. [15]

Prednosti i nedostaci DLP postupka prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. Prednosti i nedostaci DLP postupka. [16]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none">• velika brzina printanja• različita područja primjene• niska cijena uređaja za printanje• visoka kvaliteta obrade• velika sloboda dizajna• održivost	<ul style="list-style-type: none">• visoka cijena tehnologije• ograničen broj primjenjivih materijala• ograničenja veličine proizvoda

2.3.7.2. Materijali

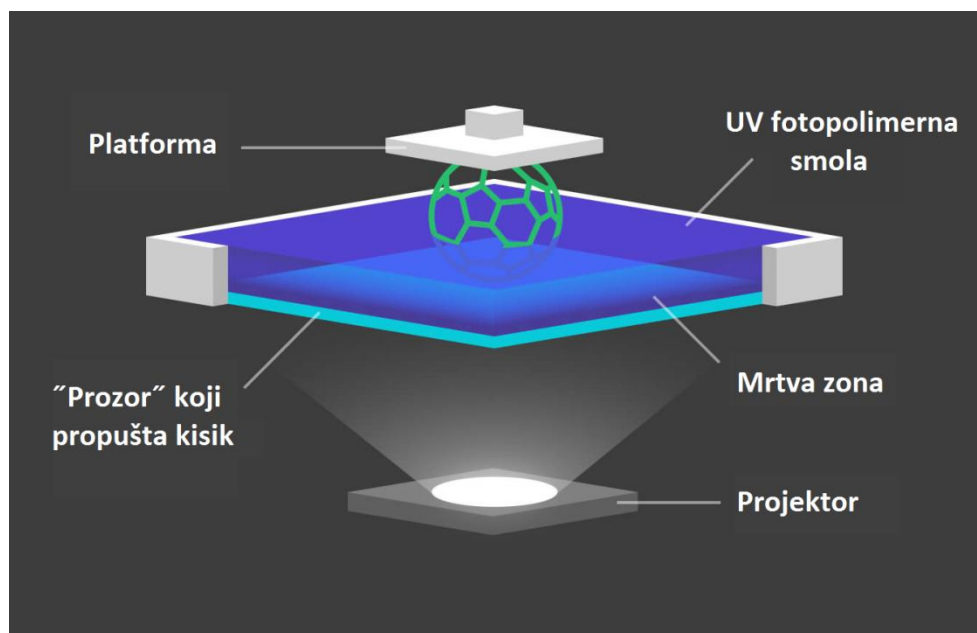
Glavni materijal koji se primjenjuje je fotopolimerna smola koja izgleda kao tekući polimer, vrlo osjetljiv na ultraljubičasto zračenje. [16]

2.3.7.3. Primjena

Govoreći o specifičnim industrijama, ovaj postupak koristi se u zdravstvu, stomatologiji, proizvodnji nakita i suvenira, inženjeringu i dizajnu. [16]

2.3.8. *Proizvodnja kontinuiranim tekućim povezivanjem (CLIP)*

Proizvodnja kontinuiranim tekućim povezivanjem je metoda 3D ispisa koja koristi fotopolimerizaciju za stvaranje glatkih, čvrstih predmeta širokog raspona oblika pomoću smola. Ova metoda bila je u vlasništvu EiPi Systems tvrtke a danas ju razvija tvrtka Carbon. [27]



Slika 12. Princip CLIP postupka. [28]

2.3.8.1. *Princip rada*

Kontinuirani proces počinje s bazenom tekuće fotopolimerne smole. Dio dna bazena je proziran do ultraljubičastog svjetla ("prozor"). Ultraljubičaste svjetlosne zrake sjaju kroz prozor, osvjetljavajući precizni poprečni presjek objekta. Svjetlo uzrokuje očvršćivanje smole. Objekt se podiže dovoljno polako da dozvoli da smola teče ispod i održava kontakt s dnom objekta. Membrana koja propušta kisik leži ispod smole, što stvara "mrtvu zonu" koja sprječava da se smola pričvrsti na prozor (fotopolimerizacija se blokira između prozora i polimerizatora). [27]

Prednosti i nedostaci CLIP postupka prikazani su u tablici 8.

Tablica 8. Prednosti i nedostaci CLIP postupka. [29]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • vrlo velika brzina printanja • visoka točnost izrade • visoka kvaliteta obrade • široka primjena proizvoda 	<ul style="list-style-type: none"> • slabija vrsta smole • visoka cijena tehnologije

2.3.8.2. Materijali

Carbon je stvorio raznolik i rastući izbor materijala koji omogućuju dizajnerima proizvoda i inženjerima izgradnju funkcionalnih prototipova. Trenutno postoji sedam materijala koji su dostupni za upotrebu a neki od njih su kruti poliuretani i poliuretanski elastomeri. Materijali su dizajnirani tako da udovoljavaju inženjerskim zahtjevima - od produljenja i elastičnosti očekivanih od injekcijski prešanog poliuretanskog elastomera do otpornosti na temperaturu najlona punjenog staklom. [28]

2.3.8.3. Primjena

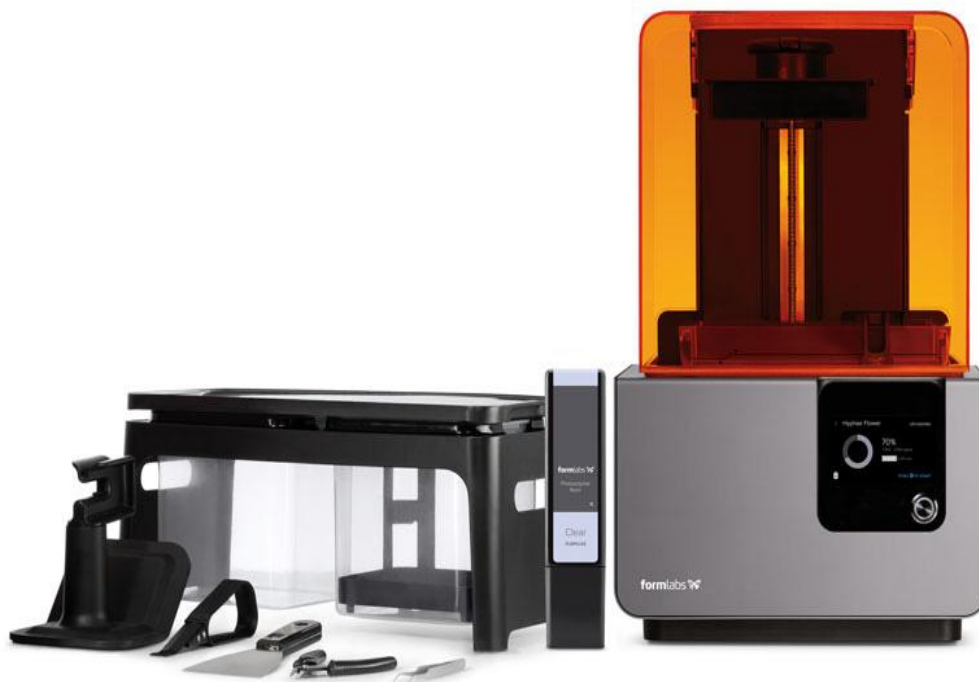
Ova tehnologija 3D ispisa koristi se u mnogim granama industrije, posebno u medicini. Brandovi kao što su Adidas i Ford Motor Company koriste ovu tehnologiju 3D ispisa, čak su i sklopile partnerstvo s tvrtkom Carbon koja razvija tu tehnologiju. [28]

3. UREĐAJI ZA ADITIVNU PROIZVODNJU

3.1. SLA 3D pisači

SLA 3D pisači postaju sve popularniji jer izrađuju kvalitetnije proizvode od klasičnih 3D pisača. Ovakvi pisači imaju izvrsne karakteristike i svestranih su mogućnosti kako za izradu prototipova tako i gotovih proizvoda koji, radi izbora različitih materijala, imaju svoju primjenu u stomatologiji, strojarstvu, izradi nakita, medicini, arhitekturi, umjetnosti itd. Veoma su pouzdani i ne zahtijevaju posebno održavanje. [17]

Jedan od najboljih SLA 3D pisača prikazan je na slici 13.



Slika 13. Formlabs Form 2 SLA 3D pisač. [18]

S mnogo više pristupačnih SLA modela 3D pisača na tržištu, oni koji zahtijevaju visokokvalitetne ispise trebali bi uzeti u obzir veličinu obratka i preciznost. [18]

U tablici 9, prikazana je usporedba SLA 3D pisača dostupnih na tržištu, čija cijena ne prelazi 9000 USD, a u tablici 10, prikazano je vrednovanje istih.

Tablica 9. Usporedba dostupnih SLA 3D pisača. [18]

	SLA 3D pisač	Maksimalni volumen izrade (mm)	Debljina sloja (μm)	Veličina laserske točke (μm)	Cijena (USD)
1.	Formlabs Form 2	145 x 145 x 175	25 - 100	140	3,900
2.	XYZ printing Nobel 1.0A	128 x 128 x 200	25 - 100	130	1,800
3.	Peopoly Moai	130 x 130 x 180	15	-	1,300
4.	Dazz 3D S130	130 x 130 x 180	25 - 100	50	4,100
5.	3D Systems ProJet 1200	43 x 27 x 150	30	56	4,900
6.	Asiga Pico 2	51 x 32 x 76	1	39	7,000
7.	DWS Lab Xfab	Ø 180 x 180	60 - 100	250	8,600

Tablica 10. Vrednovanje dostupnih SLA 3D pisača.

	SLA 3D pisač		Maksimalni volumen izrade (A)	Debljina sloja (B)	Veličina laserske točke (C)	Cijena (D)	VAL. (1)
			Vrednovanje prema bodovima				
1.	Formlabs Form 2	Broj bodova (max = 50, min = 0)	50	29,5	25,8	30,3	67,8
2.	XYZ printing Nobel 1.0A		44,5	29,5	27,5	40,9	<u>71,2</u>
3.	Peopoly Moai		41,3	37,7	-	50	64,5
4.	Dazz 3D S130		41,3	29,5	41,4	29,3	70,75
5.	3D Systems ProJet 1200		2,3	25,4	40,3	25,3	46,65
6.	Asiga Pico 2		1,7	50	50	14,7	58,2
7.	DWS Lab Xfab		0	0	0	0	0

Jednadžbom (1) dobivamo vrijednost koja nam pokazuje poredak SLA 3D pisača od najoptimalnijeg prema najmanje optimalnom.

$$VAL. = A(\%) \cdot 50 + B(\%) \cdot 50 + C(\%) \cdot 50 + D(\%) \cdot 50 \quad (1)$$

3.2. SLS 3D pisači

Prije nekoliko godina SLS 3D pisači bili su najpogodniji za velike industrijske sustave, a danas ovi pisači postaju sve pristupačniji i traženiji među znanstvenicima i inženjerima. [20]

SLS 3D pisači koriste laserski uređaj za skutnjavanje praškastog materijala u krute objekte. Složeni dijelovi mogu se ispisati bez potpore a slaganje objekata omogućuje korištenje punog volumena izrade. Savršeni su za proizvodnju prototipova. [21]

Jedan od najboljih SLS 3D pisača prikazan je na slici 14.



Slika 14. Sinterit Lisa SLS 3D pisač. [20]

U tablici 11, prikazana je usporedba SLS 3D pisača dostupnih na tržištu, čija cijena ne prelazi 12 000 USD, a u tablici 12, prikazano je vrednovanje istih.

Tablica 11. Usporedba dostupnih SLS 3D pisača. [20]

	SLS 3D pisač	Dimenzije pisača (mm)	Maksimalni volumen izrade (mm)	Debljina sloja (μm)	Cijena (USD)
1.	Sinterit Lisa	650 × 550 × 400	150 × 200 × 150	80	7,000
2.	Sintratec S1	757 x 670 x 365	130 x 130 x 180	100	7,400
3.	Formlabs Fuse 1	677 x 668 x 1059	165 x 165 x 320	100	10,000
4.	Sintratec Kit	600 x 520 x 380	130 x 130 x 130	100	4,100
5.	Natural Robotics VIT SLS	800 x 600 x 950	250 x 250 x 250	50	11,100

Tablica 12. Vrednovanje dostupnih SLS 3D pisača.

	SLS 3D pisač	Broj bodova (max = 50, min = 0)	Dimenzije pisača (A)	Maksimalni volumen izrade (B)	Debljina sloja (C)	Cijena (D)	VAL. (2)
			Vrednovanje prema bodovima				
1.	Sinterit Lisa		14,9	14,4	23,4	27	39,85
2.	Sintratec S1		19,3	9,7	0	25,7	27,35
3.	Formlabs Fuse 1		50	27,8	0	7,9	42,85
4.	Sintratec Kit		0	0	0	50	25
5.	Natural Robotics VIT SLS		47,6	50	50	0	<u>73,8</u>

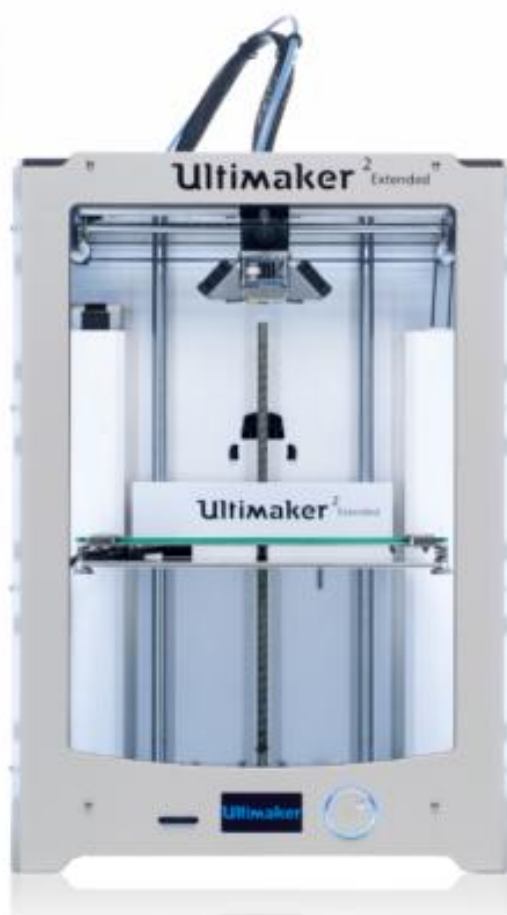
Jednadžbom (2) dobivamo vrijednost koja nam pokazuje poredak SLS 3D pisača od najoptimalnijeg prema najmanje optimalnom.

$$\text{VAL.} = A(\%) \cdot 50 + B(\%) \cdot 50 + C(\%) \cdot 50 + D(\%) \cdot 50 \quad (2)$$

3.3. FDM 3D pisači

Postizanje izvrsne kvalitete FDM 3D ispisom nije tako lako kao što se očekuje. Mnogo toga ne ovisi samo o modelu koji se proizvodi, već i o raznim postavkama i čimbenicima okoline koji se odnose na sam 3D pisač, njegova svojstva i tehničko stanje. [22]

Jedan od najboljih FDM 3D pisača prikazan je na slici 15.



Slika 15. Ultimaker 2 Extended + FDM 3D pisač. [23]

Osobni FDM 3D pisači ograničeni su na stvaranje manjih modela pa tvrtke uvode novine kroz ponudu strojeva koji su veći nego prije. [23]

U tablici 13, prikazana je usporedba FDM 3D pisača dostupnih na tržištu, čija cijena ne prelazi 3000 USD, a u tablici 14, prikazano je vrednovanje istih.

Tablica 13. Usporedba dostupnih FDM 3D pisača. [23]

	FDM 3D pisač	Dimenzije pisača (mm)	Maksimalni volumen izrade (mm)	Debljina sloja (μm)	Cijena (USD)
1.	Ultimaker 2 Extended +	-	223 x 223 x 305	20	3,000
2.	Wasp Delta 20 40	-	\varnothing 200 x 400	50	3,000
3.	Lulzbot Taz 6	660 x 520 x 520	280 x 280 x 250	-	2,500
4.	Rostock Max	-	275 x 275 x 400	-	1,900
5.	MakeMendel MegaBot	-	700 x 220 x 185	-	1,300
6.	Wanhao Duplicator 5S	860 h	305 x 205 x 575	-	1,700
7.	CoLiDo X3045 Duo	-	300 x 300 x 450	-	3,000
8.	Dagoma Explorer 350	-	350 x 350 x 350	-	2,600

Tablica 14. Vrednovanje dostupnih FDM 3D pisaa.

	FDM 3D pisaa		Dimenzije pisaa (A)	Maksimalni volumen izrade (B)	Debljina sloja (C)	Cijena (D)	VAL. (3)
			Vrednovanje prema bodovima				
1.	Ultimaker 2 Extended +	Broj bodova (max = 50, min = 0)	-	17,7	50	0	33,85
2.	Wasp Delta 20 40		-	0	0	0	0
3.	Lulzbot Taz 6		0	22,8	-	10	16,4
4.	Rostock Max		-	35,2	-	36	35,6
5.	MakeMendel MegaBot		-	33,2	-	50	42,6
6.	Wanhao Duplicator 5S		50	41,9	-	44,7	<u>68,3</u>
7.	CoLiDo X3045 Duo		-	47,2	-	0	23,6
8.	Dagoma Explorer 350		-	50	-	6,4	28,2

Jednadžbom (3) dobivamo vrijednost koja nam pokazuje poredak FDM 3D pisaa od najoptimalnijeg prema najmanje optimalnom.

$$VAL. = A(\%) \cdot 50 + B(\%) \cdot 50 + C(\%) \cdot 50 + D(\%) \cdot 50 \quad (3)$$

3.4. LOM 3D pisači

LOM 3D pisači uglavnom se koriste za brzu izradu plastičnih dijelova. Njihova niska cijena i brzina čine ih sve popularnijim na tržištu. [24]

Tvrtka Mcor Technologies predlaže određenu vrstu LOM-a koju su nazvali selektivno depozitno laminiranje (SDL). To je tehnologija bazirana na papiru koja dodaje boju u ispis. Listovi su ispisani u boji, selektivno lijepljeni i rezani oštricom. Ljepilo se nanosi samo na određenu površinu pa je lakše dobiti konačni objekt. Osim toga, dodavanje boje omogućava ovoj tehnologiji da se natječe s tehnologijama vezivanja mlazom za proizvodnju višebojnih objekata, čak i ako kvaliteta nije ista. [24]

Jedan od najboljih LOM 3D pisaa prikazan je na slici 16.



Slika 16. Matrix 300 + LOM 3D pisaa. [25]

U tablici 15, prikazana je usporedba LOM 3D pisaa dostupnih na tržištu, čija cijena ne prelazi 16 000 USD, a u tablici 16, prikazano je vrednovanje istih.

Tablica 15. Usporedba dostupnih LOM 3D pisača. [25]

	LOM 3D pisač	Dimenzije pisača (mm)	Maksimalni volumen izrade (mm)	Debljina sloja (μm)	Cijena (USD)
1.	Matrix 300 +	1160 x 720 x 940	256 x 169 x 150	100	10,000
2.	Mcor Arke	880 x 593 x 633	218 x 185 x 125	100	6,000
3.	Mcor Iris HD	1160 x 720 x 940	256 x 169 x 150	100	15,900
4.	Solido	460 x 770 x 420	-	168	10,000

Tablica 16. Vrednovanje dostupnih LOM 3D pisača.

	LOM 3D pisač		Dimenzije pisača (A)	Maksimalni volumen izrade (B)	Debljina sloja (C)	Cijena (D)	VAL. (4)
			Vrednovanje prema bodovima				
1.	Matrix 300 +	Broj bodova (max = 50, min = 0)	50	50	50	27,2	<u>88,6</u>
2.	Mcor Arke		21	0	50	50	60,5
3.	Mcor Iris HD		50	50	50	0	75
4.	Solido		0	-	0	27,2	13,6

Jednadžbom (4) dobivamo vrijednost koja nam pokazuje poredak LOM 3D pisača od najoptimalnijeg prema najmanje optimalnom.

$$\text{VAL.} = A(\%) \cdot 50 + B(\%) \cdot 50 + C(\%) \cdot 50 + D(\%) \cdot 50 \quad (4)$$

3.5. PolyJet 3D pisači

3D pisači koji rade na PolyJet principu pružaju visoku razinu kvalitete koja se očituje u gotovim proizvodima. To je jedina tehnologija s mogućnošću korištenja različitih materijala i plastike te kombiniranja boja i materijala u jedan gotovi proizvod, pa zbog toga ima prednost pred ostalim tehnologijama 3D ispisa. [26]

Jedan od najboljih PolyJet 3D pisača prikazan je na slici 17.



Slika 17. Objet 1000 Plus PolyJet 3D pisač. [26]

U tablici 17, prikazana je usporedba PolyJet 3D pisača dostupnih na tržištu, čija cijena ne prelazi 350 000 USD, a u tablici 18, prikazano je vrednovanje istih.

Tablica 17. Usporedba dostupnih PolyJet 3D pisaa. [26]

	PolyJet 3D pisaa	Dimenzije pisaa (mm)	Maksimalni volumen izrade (mm)	Debljina sloja (μm)	Cijena (USD)
1.	Objet 1000 Plus	1960 x 2868 x 2102	1000 x 800 x 500	16	250,000
2.	Objet 350/500 Connex 3	1400 x 1260 x 1100	340 x 340 x 200	16	350,000
3.	Stratasys J750	1400 x 1260 x 1100	490 x 390 x 200	14	250,000
4.	Objet 260 Connex 3	870 x 735 x 1200	255 x 252 x 200	28	120,000
5.	Objet Eden 260VS	870 x 735 x 1200	255 x 252 x 200	16	19,800
6.	Objet 30 Pro	825 x 620 x 590	294 x 192 x 148,6	28	19,900

Tablica 18. Vrednovanje dostupnih PolyJet 3D pisača.

	PolyJet 3D pislač		Dimenzije pisača (A)	Maksimalni volumen izrade (B)	Debljina sloja (C)	Cijena (D)	VAL. (5)
			Vrednovanje prema bodovima				
1.	Objet 1000 Plus	Broj bodova (max = 50, min = 0)	50	50	43	16,2	<u>79,6</u>
2.	Objet 350/500 Connex 3		8,2	2,9	43	0	27,05
3.	Stratasys J750		8,2	4,7	50	16,2	39,55
4.	Objet 260 Connex 3		3,2	1,6	0	33,8	19,3
5.	Objet Eden 260VS		3,2	1,6	43	50	48,9
6.	Objet 30 Pro		0	0	0	47,3	23,65

Jednadžbom (5) dobivamo vrijednost koja nam pokazuje poredak PolyJet 3D pisača od najoptimalnijeg prema najmanje optimalnom.

$$VAL. = A(\%) \cdot 50 + B(\%) \cdot 50 + C(\%) \cdot 50 + D(\%) \cdot 50 \quad (5)$$

3.6. DLP 3D pisači

DLP 3D pisači imaju prednost nad SLA 3D pisačima jer mogu ispisati i polimerizirati pojedinačni sloj preko cijele radne ploče u samo nekoliko sekundi, što ih čini znatno bržim. Također, troše vrlo malo materijala, što pomaže u održavanju minimalnih troškova po ispisu. DLP 3D pisači koriste se u dentalnoj industriji za stvaranje modela iz digitalnih otisaka i kirurških šablona. [19]

Jedan od najboljih DLP 3D pisača prikazan je na slici 18.



Slika 18. Colido DLP 2.0 DLP 3D pisač. [18]

U tablici 19, prikazana je usporedba DLP 3D pisača dostupnih na tržištu, čija cijena ne prelazi 9000 USD, a u tablici 20, prikazano je vrednovanje istih.

Tablica 19. Usporedba dostupnih DLP 3D pisača. [18]

	DLP 3D pisač	Maksimalni volumen izrade (mm)	Debljina sloja (μm)	XY točnost izrade (μm)	Cijena (USD)
1.	B9Creations B9Creator v1.2	100 x 76 x 200	50	50	\$4,600
2.	Colido DLP 2.0	100 x 76 x 150	50	50	\$3,300
3.	Kudo 3D Titan 2	140 x 79 x 250	5	75	\$3,500
4.	SprintRay MoonRay D/S	130 x 81 x 200	20 - 100	75 - 100	\$4,000
5.	Nyomo Minny	44 x 28 x 70	50	50	\$3,300
6.	EnvisionTec Aria	65 x 40 x 100	25 - 50	33	\$6,300
7.	Nyomo Makyn 6	80 x 50 x 100	10 - 200	62	\$9,000
8.	3DMaker SLA GEM 2.0	80 x 45 x 80	35 - 50	40 - 60	\$8,500

Tablica 20. Vrednovanje dostupnih DLP 3D pisača.

	DLP 3D pisač		Maksimalni volumen izrade (A)	Debljina sloja (B)	XY točnost izrade (C)	Cijena (D)	VAL. (6)
			Vrednovanje prema bodovima				
1.	B9Creations B9Creator v1.2	Broj bodova (max = 50, min = 0)	27,4	0	26,9	31,3	42,8
2.	Colido DLP 2.0		20,6	0	26,9	50	48,75
3.	Kudo 3D Titan 2		50	50	0	45,9	<u>72,95</u>
4.	SprintRay MoonRay D/S		38	31,9	0	37,7	53,8
5.	Nyomo Minny		0	0	26,9	50	38,45
6.	EnvisionTec Aria		4,7	27,3	50	24,4	53,2
7.	Nyomo Makyn 6		7,2	40,9	21,3	0	34,7
8.	3DMaker SLA GEM 2.0		5,2	18,2	31,8	11	33,1

Jednadžbom (6) dobivamo vrijednost koja nam pokazuje poredak DLP 3D pisača od najoptimalnijeg prema najmanje optimalnom.

$$VAL. = A(\%) \cdot 50 + B(\%) \cdot 50 + C(\%) \cdot 50 + D(\%) \cdot 50 \quad (6)$$

3.7. CLIP 3D pisači

3D CLIP pisači serije M i automatizirani Smart Part Washer prvi su u nizu modularnih ponuda koje širokom rasponu industrija omogućuju projektiranje, inženjering, izradu i isporuku dijelova za krajnje korištenje s jednim zajedničkim tijekom proizvodnje. [30]

Jedan od najboljih CLIP 3D pisača prikazan je na slici 19.



Slika 19. Carbon M2 CLIP 3D pisač. [30]

U tablici 21, prikazana je usporedba CLIP 3D pisača dostupnih na tržištu, čija cijena ne prelazi 163 000 USD, a u tablici 22, prikazano je vrednovanje istih.

Tablica 21. Usporedba dostupnih CLIP 3D pisača. [31]

	CLIP 3D pisač	Maksimalni volumen izrade (mm)	Točnost izrade (μm)	Debljina sloja (μm)	Cijena (USD)
1.	Carbon M2	190.5 x 111.8 x 325.1	75	-	162,500
2.	Carbon M1	141 x 79 x 326	75	80	132,500

Tablica 22. Vrednovanje dostupnih CLIP 3D pisaa.

	CLIP 3D pisaa		Maksimalni volumen izrade (A)	Točnost izrade (B)	Debljina sloja (C)	Cijena (D)	VAL. (7)
			Vrednovanje prema bodovima				
1.	Carbon M2	Broj bodova (max = 50, min = 0)	50	50	0	0	50
2.	Carbon M1		0	50	50	50	<u>75</u>

Jednadžbom (7) dobivamo vrijednost koja nam pokazuje koji je CLIP 3D pisaa optimalniji.

$$VAL. = A(\%) \cdot 50 + B(\%) \cdot 50 + C(\%) \cdot 50 + D(\%) \cdot 50 \quad (7)$$

4. ZAKLJUČAK

Primjena aditivnih tehnologija u svrhu izrade prototipova, funkcionalnih dijelova ili alata relativno je novi način proizvodnje. Postupci aditivne tehnologije u proizvodnji pružaju jednostavan, učinkovit i brz način izrade. Kontinuirani razvoj aditivne proizvodnje rezultira činjenicom da je primjena iste u sve većem broju industrija i u sve većem postotku u odnosu na konvencionalne načine izrade (lijevanje, kovanje, obrada odvajanjem čestica, itd.). Najveći nedostatak aditivne proizvodnje je visoka cijena profesionalnih industrijskih uređaja za 3D ispis te visoka cijena materijala koji se koriste u određenim postupcima. Međutim, kontinuirani razvoj 3D pisača te sve veći broj proizvođača istih, rezultira time da se cijena profesionalnih uređaja ipak postepeno smanjuje te time postaje dostupnija sve većem broju korisnika.

Cilj ovog rada bio je ukratko predstaviti razvoj aditivne proizvodnje te sistematizirati postojeće aditivne tehnologije koje se mogu koristiti za 3D ispis.

PRILOZI

I. CD-R disc

LITERATURA

- [1] Godec D.; Šercer M.; Aditivna proizvodnja; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015.
- [2] Wohlers T.; Garnett T.; History of additive manufacturing; Wohlers Associates, INC.; 2014. <http://wohlersassociates.com/history2014.pdf> (31. 01. 2018.)
- [3] Wohlers T.; Rapid prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry; Wohlers Associates, INC; 2005. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2015/NIST.IR.8059.pdf> (02. 02. 2018.)
- [4] Ana Pilipović: Aditivna proizvodnja, Polimeri 33(2012)3-4, 134 - 135
- [5] Godec D., Šercer M.; Aditivna proizvodnja tvorevina (e. Rapid Prototyping – RP, Rapid Tooling – RT, Rapid Manufacturing – RM) , 2012.
- [6] http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2014/04/Additive_Manufacturing_process (07. 02. 2018.)
- [7] Gibson I, Rosen D.W., Stucker B.; Additive Manufacturing Technologies; Springer Science; New York; 2010.
- [8] Horvat M.; Pregled aditivnih postupaka proizvodnje; Završni rad br 188/PS/2016
- [9] <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling> (10. 02. 2018.)
- [10] Alabdullah, F.; Fused Deposition Modeling (FDM) Mechanism; International Journal of Scientific & Engineering Research; Vol. 7; Broj 5.; Svibanj 2016.
- [11] <https://www.makepartsfast.com/laminate-object-manufacturing-lom/> (13. 02. 2018.)
- [12] http://www.ffri.hr/~zvonimir/index_old.html, (14. 02. 2018.)
- [13] Pilipović, A. : Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa, doktorski rad, Zagreb, 2012.
- [14] <http://www.howtoinstallprinterdriver.com/2017/03/how-do-3d-printers-work.html> (17. 02. 2018.)
- [15] <https://www.think3d.in/digital-light-processing-dlp-3d-printing-technology-overview/> (20. 02. 2018.)
- [16] <https://3d-expo.ru/en/article/chto-takoe-tsifrovaya-svetodiodnaya-proektsiya-dlp-80503> (21. 02. 2018.)
- [17] <https://www.olx.ba/artikal/27150128/3d-printer-form-2-formlabs-sla/> (22. 02. 2018.)

- [18] <https://all3dp.com/1/best-resin-dlp-sla-3d-printer-kit-stereolithography/>
(22. 02. 2018.)
- [19] <https://www.3dprinter.hr/3d-printeri/atum3d-dlp-za-iznimno-kvalitetne-i-precine-detalje/> (22. 02. 2018.)
- [20] <https://www.aniwaa.com/best-professional-desktop-sls-3d-printers/> (23. 02. 2018.)
- [21] <https://www.imakr.com/en/215-sls-3d-printers> (23. 02. 2018.)
- [22] <http://blog.zmorph3d.com/quality-in-fdm-3d-printing/> (24. 02. 2018.)
- [23] <https://www.3dnatives.com/en/xxl-3d-printer/> (24. 02. 2018.)
- [24] <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/> (25. 02. 2018.)
- [25] <http://www.mcorctechnologies.com/> (25. 02. 2018.)
- [26] <https://trimech.com/products/3d-printers/polyjet-technology> (26. 02. 2018.)
- [27] https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_Liquid_Interface_Production (05. 03. 2018.)
- [28] <https://www.sculpteo.com/en/glossary/carbon-3d-printer-and-clip-technology/>
(05. 03. 2018.)
- [29] <http://www.tested.com/tech/3d-printing/570369-bits-atoms-how-carbons-clip-3d-printing-technology-works/> (05. 03. 2018.)
- [30] <https://www.carbon3d.com/> (09. 03. 2018.)
- [31] <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/carbon3d-m2/> (09. 03. 2018.)