

Proizvodnja gotovih proizvoda aditivnom tehnologijom

Briševac, Dragan

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:128:073006>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-30**



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

ZAVRŠNI RAD

Dragan Briševac

Karlovac, 2018. godina

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Josip Groš mag.ing.mech.

Student:

Dragan Briševac

Karlovac, 2018.

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno, koristeći se literaturom i znanjem stečenim tijekom studija.

Zahvaljujem se mentoru Josipu Grošu mag.ing.mech. na pomoći i sugestijama prilikom izrade završnog rada. Zahvaljujem se obitelji, prijateljima i kolegama na moralnoj podršci tijekom studija, pa tako i tijekom izrade završnog rada.



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Trg J.J.Strossmayera 9
HR-47000, Karlovac, Croatia
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Strojarsva.

Usmjerenje: Proizvodno Strojarsvo

Karlovac, 04.12.2018

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Dragan Briševac

Matični broj: 0110609097

Naslov: **PROIZVODNJA GOTOVIH PROIZVODA ADITIVNOM
TEHNOLOGIJOM**

Opis zadatka:

Brzi razvoj novih proizvoda postavlja sve veće zahtjeve na proizvodni proces. Standardni načini proizvodnje koriste energiju za odstranjivanje viška materijala. Aditivna proizvodnja koriste energiju za dodavanje materijala i stvaranje novog proizvoda. U zadnjem desetljeću svjedoci smo sve veće ekspanzije strojeva i metoda aditivne proizvodnje.

Student treba u radu objasniti:

1. Dosadašnji razvoj aditivne tehnologije
2. Podjelu aditivnih tehnologija
3. Primjenu aditivnih tehnologija u različitim industrijskim granama
4. Proizvodnju gotovih proizvoda aditivnom tehnologijom

Zadatak zadan:
02.11.2017

Rok predaje rada:
30.11.2018

Predviđeni datum obrane:
04.12.2018

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

SADRŽAJ

IZJAVA.....	3
SADRŽAJ.....	5
POPIS SLIKA.....	8
POPIS KRATICA.....	10
SAŽETAK.....	11
1. UVOD.....	13
2. DOSADAŠNJI RAZVOJ ADITIVNE PROIZVODNJE.....	14
2.1. Postupci brze izrade prototipova (RP).....	17
2.1.1. AMF I STL datoteke.....	21
2.1.2. Prednosti i nedostaci brze izrade prototipova.....	22
2.2. Postupci brze izrade alata i kalupa (RT).....	23
2.3. Postupci brze proizvodnje (RM).....	23
3. PODJELA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA.....	24
3.1. STEREOLITOGRAFIJA (SLA).....	26
3.1.1. Prednosti STEREOLITOGRAFIJE	29
3.1.2. Nedostaci STEREOLITOGRAFIJE.....	29
3.2. TALOŽNO OČVRŠĆIVANJE(FDM).....	30
3.2.1. Vrste materijala.....	34
3.2.2. Primjena FDM postupaka.....	35

3.2.3. Prednosti FDM postupaka.....	35
3.2.4. Nedostaci FDM postupaka.....	35
3.3. IZRADA OBLIKA LAMINIRENJE (LOM).....	36
3.3.1. Proces izrade LOM postupkom.....	37
3.3.2. Prednosti LOM postupka.....	37
3.3.3. Nedostaci LOM postupka.....	37
3.4. SELEKTIVNO SRAŠĆIVANJE (SLS).....	38
3.4.1. Proces izrade SLS postupkom.....	39
3.4.2. Vrste materijala kod SLS postupka.....	40
3.4.3. Prednosti SLS postupka.....	40
3.4.4. Nedostaci SLS postupka.....	41
3.5. 3D TISKANJE (3DP).....	42
3.5.1. Postupak 3D tiskanja.....	43
3.5.2. Vrste materijala kod 3D tiskanja.....	44
3.5.3. Prednosti 3DP postupka.....	45
3.5.4. Nedostaci 3DP postupka	45
3.5.5. Primjena 3DP printera.....	46
4. PRIMJENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U RAZLIČITIM INDUSTRIJSKIM GRANAMA	47
4.1. Primjena u medicini.....	48
4.2. Primjena u zrakoplovnoj industriji.....	50

4.3. Primjena aditivne tehnologije u automobilskoj industriji.....51

5. ZAKLJUČAK

6. LITERATURA

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Ciklus proizvodnje prototipova [1]

Slika 2.2. Faze brze proizvodnje prototipova [2]

Slika 3.1. Shematski prikaz aditivne proizvodnje [3]

Slika 3.2. Princip rada SLA [3]

Slika 3.3. Model od epoksidne smole načinjen postupkom stereolitografije-SLA [4]

Slika 3.4. FDM postupak [5]

Slika 3.5. Proces izrade dijela FDM postupkom [6]

Slika 3.6. Proizvod izrađen FDM postupkom [7]

Slika 3.7. Izrada proizvoda FDM tehnologijom [8]

Slika 3.8. LOM postupak [9]

Slika 3.9. Izrada dijela SLS postupkom [3]

Slika 3.10. 3D tiskanje [10]

Slika 3.11. Shematski prikaz proizvodnje dijelova 3D tiskanjem [11]

Slika 3.12. 3D printer tvrtke Z Corporation, model Z 650 [12]

Slika 4.1. Područje primjene aditivne tehnologije [3]

Slika 4.2. CAD model [13]

Slika 4.3. Izrađena kost [13]

Slika 4.4. Implementacija na pacijentu [13]

Slika 4.5. Turbina izrađena primjenom aditivne proizvodnje [14]

Slika 4.6. Izrađeni dijelovi automobila [15]

POPIS KRATICA

Kratika	Engleski naziv	Opis
3DP	3D printing	3D tiskanje
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene	Akrilonitril-butadien-stiren
AMF	Additive Manufacturing File	format datoteke
CAD	Computer Aided Design	Konstruiranje pomoću računala
CAM	Computer Aided Manufacturing	Proizvodnja podržana računalom
CNC	Computer Numerical Control	Računalno numeričko upravljanje
FDM	Fused Deposition Modeling	Taložno očvršćivanje
LOM	Laminated Object Manufacturing	Proizvodnja laminiranih objekata
RM	Rapid Manufacturing	Brza proizvodnja
RP	Rapid Prototyping	Brza proizvodnja prototipa
RT	Rapid Tooling	Brza proizvodnja alata
SLS	Selective Laser Sintering	Selektivno lasersko srasčivanje
SL/SLA	Stereolithography	Stereolitografija

SAŽETAK

U radu je predstavljen dosadašnji razvoj aditivne tehnologije. Aditivna tehnologija je relativno nova i u procesu je razvijanja. U radu su opisana 4 poglavlja. U uvodu je opisana tema rada.

Prvo poglavlje opisuje dosadašnji razvoj aditivne tehnologije. Drugo poglavlje podjelu postupaka aditivne tehnologije. Treće poglavlje primjenu aditivnih tehnologija u različitim industrijskim granama. Četvrto poglavlje proizvodnju gotovih proizvoda aditivnom tehnologijom.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, brza izrada prototipva, brza izrada alata i kalupa, brza pojedinačna proizvodnja, 3D printeri

SUMMARY

Additive Manufacturing Technology and its development was presented in this paper.

Additive technology is somewhat new and still developing. There are four chapters in this paper. The theme of this paper is described in the introduction.

The first chapter describes the development of additive technology. The second chapter deals with the categories of processes within additive technology. The third chapter is about implementation of additive technology in different industrial branches. The fourth chapter describes the manufacturing of products using additive technology.

Key words: additive manufacturing, rapid prototype manufacturing, rapid tools and moulds manufacturing, 3D printers

1.UVOD

Da bi započela izrada bilo kojeg proizvoda potrebna je ideja. Da bi ideju pretvorili u gotovi proizvod potrebno je proći nekoliko faza od razrade koncepta, dizajna, razrade potrebne dokumentacije, izrade prototipa, prepravljanje nedostataka prototipa i konačno izrada gotovog proizvoda. Sve ove faze predstavljaju određeni trošak i gubitak vremena. Veliku prednost u proizvodnji predstavljalo bi smanjenje troškova i vremena izrade od ideje do proizvodnje konačnog proizvoda. Smanjenje ovih troškova moguće je primjenom aditivne proizvodnje (eng. Additive Manufacturing-AM).

Aditivna proizvodnja je pojam pod kojim se podrazumijeva izrada proizvoda dodavanjem materijala (eng. Add-dodati). Glavna značajka aditivne proizvodnje je dodavanje materijala najčešće sloj po sloj, do izrade cijele tvorevine. Aditivna proizvodnja omogućuje proizvodnju geometrijski vrlo kompliciranih proizvoda koje bi drugim klasičnim postupcima bilo vrlo teško i nemoguće načiniti. Ovakav način izrade proizvoda ima puno manje škarta nego kod konvencionalnih postupaka obrade, te materijal koji se nije upotrebio za izradu proizvoda može ponovo upotrijebiti. Za izradu prototipa ovim postupkom potreban je 3D model, koji se izradi u nekom 3D programu(Catia,Solidworks i dr.), prebaci na stroj i nakon toga se izrađuje prototip. Pomoću prototipa lakše je uvidjeti nedostatke budućeg proizvoda, kako će on izgledati i vršiti na njemu razna ispitivanja.

2.DOSADAŠNJI RAZVOJ ADITIVNE TEHNOLOGIJE

Razvoj aditivne tehnologije dogodio se razvijanjem drugih tehnologija. Kao i kod drugih proizvodnih tehnologija napreci u računalnoj snazi i smanjenje u troškovima skladištenja omogućili su obradu velike količine podataka, tipičnih za moderne 3D modele u razumnim vremenskim okvirima. Iako je na početku razvoja računala bilo vrlo malo naznaka da bi računala proizvedena 1940-ih godina kao što su Zuse Z3, ENIAC i dr., mogli promijeniti naše živote na način kao što su ih današnja računala promijenila. Izumi kao što su tranzistor i mikročip omogućili su da računala postanu manja, brža i jeftinija sa većim mogućnostima. Isto tako jedan od glavnih razloga za to što su računala pogodna za AM tehnologiju je to što mogu riješavati probleme u realnom vremenu, što u prošlosti nije bilo moguće. U prošlosti, računalima je bilo potrebno nekoliko sati ili čak i nekoliko dana da bi mogli pokrenuti i obraditi neki ozbiljan zadatak. To što je obrada zadataka trajala tako dugo, predstavljalo je ograničenje za korištenje računala svakodnevno. Isto tako razvoj grafike kod računala je jako doprinio tome da se računala više koriste, a samim time i AM jer se boljom grafikom na računalu mogu vidjeti bolje slike crteža i modeli u 3D programima. AM koristi mnoge važne značajke računalne tehnologije i to direktno u strojevima za AM (npr. manje dimenzije kućišta stroja), a koriste to i indirektno kroz potporu tehnologiji, u što spada:

Snaga obrade podataka: podatkovni zapis dijela koji se crta može biti jako velik i može zahtijevati veliku procesnu snagu da bi se ti podaci obradili za vrijeme namještanja stroja.

Grafička sposobnost: iako AM tehnologija ne zahtijeva jaku grafiku, osim što je potrebno vidjeti datoteku podataka dok namještamo stroj. AM strojevi imaju koristi od bolje grafike zbog lakše upotrebe stroja, tj. jednostavniji su za upotrebu i lakše ih je održavati.

Kontrola stroja: AM tehnologija zahtijeva opremu kojom se može postići precizno pozicioniranje kao što se koristi kod CNC strojeva. Ova oprema zahtijeva, tj. koristi

kontrolere koji dobivaju informacije iz senzora i aktuatora koji određuju pozicioniranje motora, leće i dr.

Umrežavanje: gotovo svako računalo danas ima neku metodu za komunikaciju sa drugim računalom u svijetu, pa tako i ovu značajku. AM koristi na način da se datoteke mogu poslati internetom.

Integracija: kao što je naznačeno, raznovrsnošću funkcija, računalo tvori centralnu (središnju komponentu), koja povezuje različite procese zajedno. Svrha računala je da komunicira sa osalim dijelovima procesa sustava.

Bez računala ne bi bilo kapaciteta za prikazivanje 3D modela, a bez 3D grafike ne bi bilo računalom potpomognutog dizajna CAD (eng. Computer Aided Design). A bez mogućnosti prezentiranja dijela digitalno u 3D programima nebi se moglo pomoću strojeva proizvoditi ništa osim najjednostavnijih oblika. I zato bez računala koje imamo i koristimo danas nebi se mogla razviti AM.

Godine 1981. Hideo Kodama iz Instituta za industrijsko istraživanje iz Nagoyju objavio je svoj sustav brze izrade prototipova koji koristi fotopolimere. U slojevima je izgrađen čvrsti, tiskani model, od kojih je svaki sloj odgovarao poprečnom presjeku modela. 1984. Charles Hull izumio je stereolitografiju.

Stereolitografija omogućuje dizajnerima stvaranje 3D modela pomoću digitalnih podataka, koji se zatim mogu koristiti za stvaranje proizvoda.

Razvoj postupaka aditivne proizvodnje (AM) počinje 1987. godine pojavom stereolitografije (eng. Stereolithography SL/SLA), postupka razvijenog u tvrtki 3D Systems(SAD). Postupak je omogućio očvršćivanje kapljevitoeg fotopolimera osjetljivog na djelovanje ultraljubičastog zračenja u tankim slojevima s pomoću lasera. Prvi komercijalno raspoloživi sustav za aditivnu proizvodnju bio je SLA-1, preteća nekad vrlo popularnog uređaja SLA 250. Tvrtka 3D Systems poslije je plasirala sustav Viper SLA, koji je zamjenio SLA 250.

Aktivnu proizvodnju (eng. Additive Manufacturing-AM) moguće je ostvariti na tri načina:

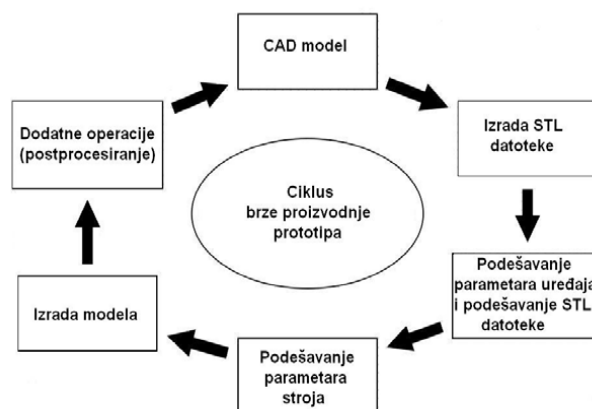
- postupke brze proizvodnje prototipova (eng. Rapid Prototyping-RP)
- postupke brze proizvodnje alata i kalupa (eng. Rapid Tooling-RT)
- postupke brze (izravne) proizvodnje (eng. Rapid Manufacturing – RM)

2.1 POSTUPCI BRZE IZRADE PROTOTIPOVA

Brza izrada prototipova (eng. Rapid Prototyping-RP) odnosi se na postupke koji mogu automatski izraditi fizičke modele iz CAD podataka. RP postupci sve se više upotrebljavaju za proizvodnju konačnih tvorevina i temelji se na izradi proizvoda sloj po sloj. Postupci RP su najbolji za proizvodnju manjih serija i kompliciranih oblika. Prototipovi zahtijevaju od 3 do 75 sati za proizvodnju, ovisno o veličini i složenosti postupka. To se naizgled čini sporo, međutim to je dosta brže od nekoliko tjedana ili mjeseci potrebnih da bi se tvorevina načinala klasičnom proizvodnjom.

Brza proizvodnja prototipova (RP) jedna je od trenutno najbrže rastućih tehnologija.

Uređaji za brzu proizvodnju prototipova izrađuju tvorevinu sloj po sloj aditivnim metodama, za razliku od CAM (eng. Computer Aided Manufacturing) postupaka koji geometriju ostvaruju odvajanjem čestica.. tj. uklanjanjem materijala. Kako bi se došlo do prototipa, potrebno je proći proces dizajna. Nakon toga izrađuju se skica, tehnički crtež ili 3D model. Nakon toga slijedi proizvodnja prototipa pomoću kojeg se verificira oblik, dimenzije, točnost ili se koristi za testiranje mehaničkih svojstava. Svi nedostaci i greške koje se pronađu na prototipu ispravljaju se na 3D modelu, i ponovo se vrši postupak proizvodnje novog prototipa. Ciklus proizvodnje prototipa prikazan je na slici 2.1



Slika 2.1. Ciklus proizvodnje prototipa [1]

RP postupak se sastoji od nekoliko faza koje počinje sa 3D modelom, a završavaju fizičkim dijelom. Prototipovi se koriste u različite svrhe. Tako naprimjer jednostavni proizvodi brzo izrađene prototipe koristi u svrhu vizualizacije gotovog proizvoda, dok veliki i kompleksniji proizvodi prototipe koriste u brojnim fazama razvoja. U ranim fazama razvoja potrebni mogu biti samo grubi prototipi, te se RP koristi samo zbog svoje brzine, dok u kasnijim fazama razvoja prototipa može zahtijevati dodatna čišćenja i naknadnu obradu (pjeskarnje, bojanje ...). RP se koristi zbog kompleksnosti oblika pa se ne mora trošiti vrijeme na tehnološku razradu. RP postupci sastoje se od faza na slici 2.2.



Slika 2.2.Faze brze proizvodnje prototipa [2]

Prva faza: CAD model

U prvoj fazi izrađuje se 3D CAD model koji u potpunost iopisuje vanjsku geometriju. U tu svrhu mogu se upotrebiti gotovo svi profesionalni CAD programi. Isto tako se može upotrijebiti 3D skener za izradu 3D modela.

Druga faza: Pretvorba u STL

RP strojevi gotovo svi podržavaju STL format datoteke, i gotovo svi CAD sustavi mogu spremiti model u tom obliku. STL datoteka opisuje vanjske zatvorene površine originalnog CAD modela, i stvara osnovu za proračun slojeva.

Treća faza: Prebacivanje na RP stroj i manipuliranje STL datotekom.

Na RP stroj se prebacuje STL datoteka gdje omogućena njena osnovna manipulacija, kako bi se prototip postavio u odgovarajuću poziciju, te namjestila veličina i smjer izrade.

Četvrta faza: Postavke RP stroja

Prije proizvodnje prototipa, RP stroj mora biti ispravno podešen. Postavke se odnose na parametre proizvodnje poput ograničenja materijala, izvora energije, debljine sloja itd.

Peta faza: Proizvodnja prototipa

Proizvodnja prototipa uglavnom je automatiziran postupak, i stroj ga velikim dijelom napravi bez potrebe za nadgledanjem. Jedino je potreban umjetni nadzor kako bi se izbjegle greške poput nedostatka materijala, energije ili greške u softweru.

Šesta faza: Vađenje prototipa

Prototip se vadi iz stroja nakon izrade. Ovaj korak može zahtijevati interakciju sa drugim uređajem koji ima sigurnosne blokade kako bi se osiguralo da su npr. radne temperature dovoljno niske, ili da trenutno nema dijelova koji se kreću i sl.

Sedma faza: **Naknadna obrada**

Vađenjem iz stroja, tvorevina može zahtijevati dodatnu obradu, najčešće čišćenje prije nego je spremna za upotrebu. U ovoj fazi ponekad je potrebno dodatno očvrnuti prototip ili odstraniti potporne dijelove. Postupak često zahtijeva čvrstu, mirnu te iskusnu ruku.

Osma faza: **Primjena**

Prototip je spreman za upotrebu, Međutim može još uvijek zahtijavati tretman prije nego se može koristiti. Može zahtijevati temeljni premaz ili bojanje kako bi imao prihvatljivu teksturu površine ili je potrebno sastavljenje sa drugim mehaničkim ili elektroničkim komponentama kako bi se dobio gotovi proizvod.

2.1.1. AMF i STL DATOTEKE

STL (eng. Standard Tessellation Language) datoteka je standardni format za prijenos podataka koji koriste RP uređaji. Svi CAD uređaji imaju mogućnost eksportiranja STL datoteke. STL format datoteke osmislila je 1989. godine tvrtka 3D Systems. To je prikaz geometrije trodimenzionalnih površina u mrežnom obliku. Površina modela je sastavljena od trokuta, tzv. lica (eng. Faces), koji su određeni smjerom, orijentacijom i trima točkama u prostoru. Datoteka u tom obliku koristi se za izrezivanje modela na slojeve horizontalnih poprečnih presjeka (eng. Layers). STL datoteka mora biti optimalna za izradu modela, mreža ne smije biti previše gusta, jer onda opterećuje računalo i na taj način se povećava vrijeme pripreme. Mreža ne smije biti ni previše gruba, jer nedovoljno dobro prikazuje površine zakrivljenih površina, slobodnih formi i sitnih detalja.

Od 2011. godine ASTM je zamijenio STL format datoteke AMF (eng. Additive Manufacturing Files) formatom datoteke koja je postala normom. AMF datoteka za razliku od STL datoteke podržava prijenos više informacija poput boje i materijala. AMF datoteka se može spremiti kao običan i kao komprimiran tekst, pa je uglavnom upola manja od ekvivalentne komprimirane STL datoteke. Ključne značajke pri razvoju datoteke bile su: sposobnost specificiranja geometrije visoke točnosti imale veličine datoteke, podrževanje više materijala, boja i mikro-strukture.

2.1.2. PREDNOSTI I NEDOSTACI BRZE PROIZVODNJE PROTOTIPA

Automatizirani sustavi brze proizvodnje prototipa mogu izravno proizvesti funkcionalne dijelove u malim količinama. Kvaliteta površina i točnost dimenzija dijelova proizvedenih na ovaj način uglavnom je inferiorna proizvedenim klasičnim postupcima obrade. Najvažnije vrijeme proizvodnje dijela, nakon što su dostupni konstrukcijski podaci, mjeri se u satima. Prednosti RP sustava su brojne. Moguće je eksperimentiranje fizičkim dijelom, bilo koje razine kompleksnosti u relativno kratkom vremenu. Vrijeme i troškovi razvoja proizvoda su smanjeni, te ubrzano vrijeme dolaska proizvoda na tržište. Mogući su složeniji oblici kako bi ispunili estetske i funkcionalne zahtjeve. Moguće je prilagoditi dizajn proizvoda kako bi se udovoljilo zahtjevima potrošača bez ograničenja nametnutih proizvodnjom. Zbog manje dijelova nije više potrebno trošiti vrijeme na montažu i sklopne crteže, te se također uklanja potreba za vijcima ili drugim spojnim elementima. Prednost je i precizno definiranje potrebnih alata za proizvodnju proizvoda, te ispitivanje funkcijskih prototipova prije izrade alata za proizvodnju proizvoda.

Nedostaci brze izrade prototipa su ograničen izbor materijala za izradu, inferiorna kvaliteta površine i visoka cijena stroja. Postupci nisu ekonomični kod velikih serija, i ograničene su dimenzije prototipa.

2.2. POSTUPCI BRZE PROIZVODNJE ALATA I KALUPA (RT)

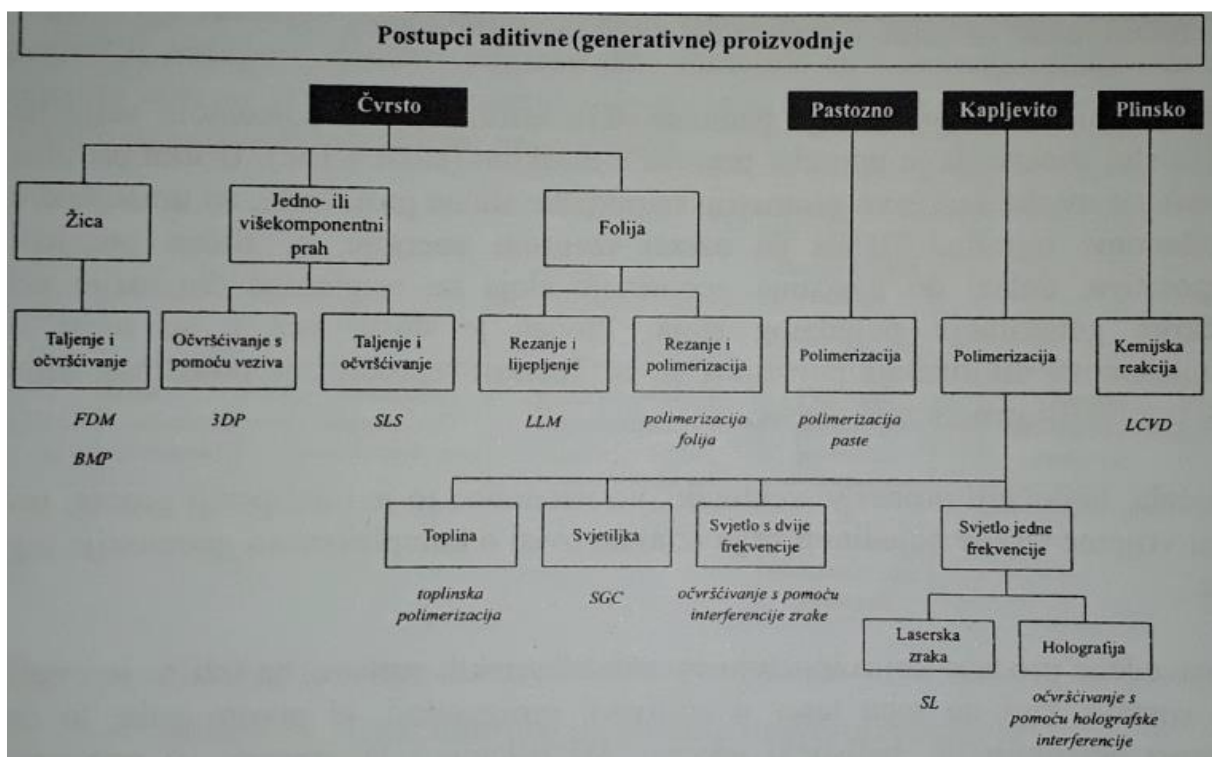
Primjenjuju se za proizvodnju alata i kalupa, ili njihovih najkompliciranijih dijelova za proizvodnju prototipnih ili probnih serija proizvoda uporabom istog procesa proizvodnje kojim će se proizvoditi konačni proizvod. Pri tom se koristi jedan ili više postupaka brze proizvodnje prototipova , a u čitavom se procesu mogu kombinirati i klasični postupci izrade alata i kalupa.

2.3. POSTUPCI BRZE PROIZVODNJE (RM)

Postupak brze (izravne) proizvodnje (RM) podrazumijeva primjenu postupaka aditivne proizvodnje za proizvod koji će se primjeniti kao i proizvod načinjen u serijskoj proizvodnji. Ovaj dio aditivne proizvodnje još donekle je ograničen, zbog ograničenog broja raspoloživih materijala. Razvijanjem novih materijala širit će se i uporaba aditivne (izravne) proizvodnje.

3. PODJELA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA

Aditivni postupci proizvodnje (AM) kvalificirani su u nekoliko područja pomoću vrste materijala koji se koristi za izradu proizvoda. Prvo se gleda u kakvom obliku se koristi materijal, koristi li se u tekućem obliku (fotoosjetljive polimerne smole, epoksidne smolei dr.), čvrstom stanju (polimeri, papir, polimerne žice ..) ili praškastom obliku (keramik, metali, polimeri). Nakon toga se gleda na koji način se materijali spajaju, da li taljenjem, polimerizacijom, laminiranjem ili povezivanje pomoću veziva. Na slici 3.1. prikazan je shematski prikaz klasifikacije aditivnih postupaka.



Slika 3.1. Shematski prikaz aditivnih postupaka [3]

Početno stanje postupaka koji upotrebljavaju materijal na bazi kapljevine pretvara se u kruto postupkom polimerizacije. U ovu skupinu spadaju sljedeći postupci: stereolitografija (eng. Stereolithography –SL ili SLA), polyjet, tonografski postupak (eng. Solid Ground Curing –SGC)

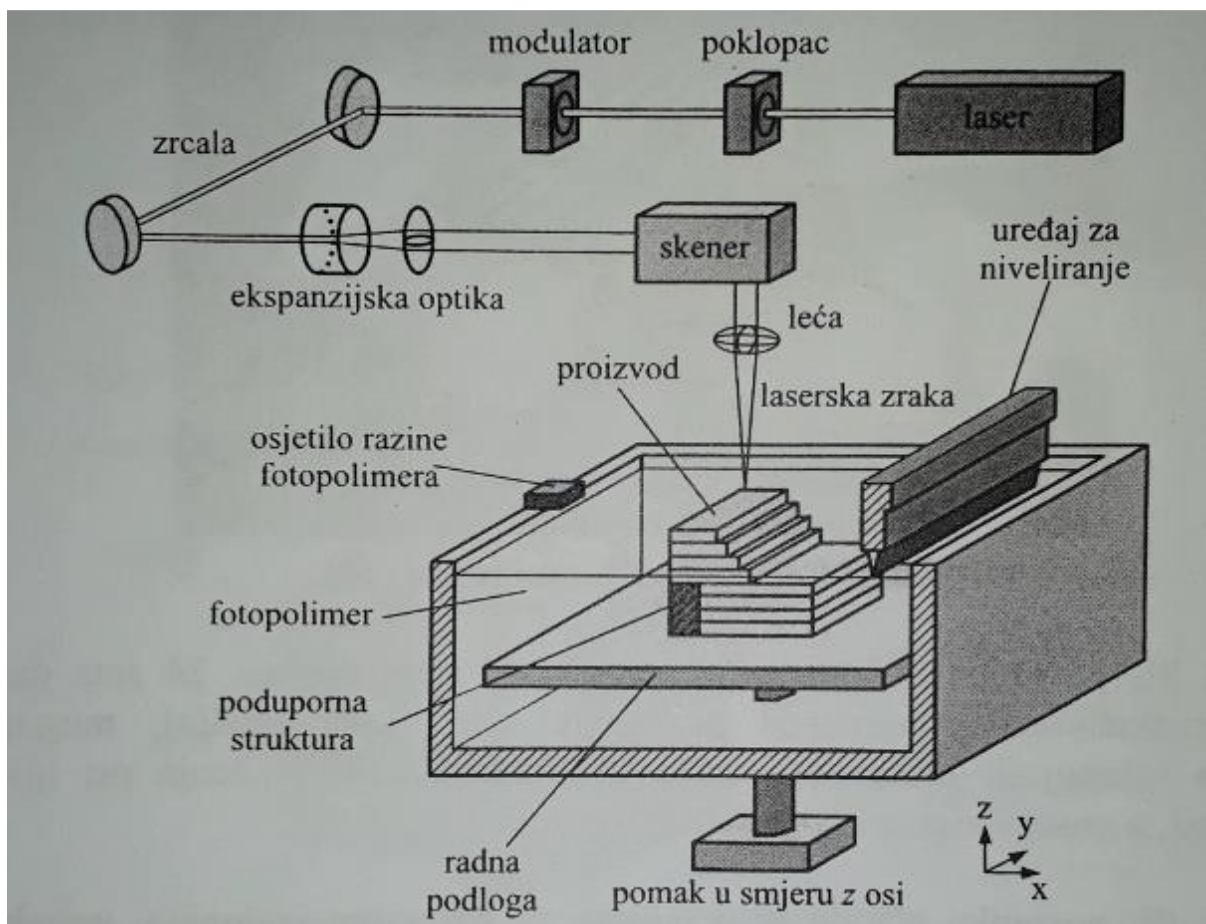
Izuzev praha, postupci koji upotrebljavaju materijal na bazi krute tvari trebali bi obuhvatiti sve oblike materijala u čvrstom stanju. U ovom kontekstu čvrsto stanje

materijala uključuje oblike poput žice, laminata, peleta. Postupci su: taložno očvršćavanje (eng. Fused Deposition Moeling – FDM), proizvodnja laminarnih objekata (eng. Laminated Objekt Manufacturing – LOM).

Strogo govoreći, prah je u čvrstom stanju, no postupci su namjerno svrstani u posebnu kategoriju kako bi se naglasio zrnati oblik praha. Postupci koji spadaju u ovu skupinu su :selektivno lasersko sraščivanje (eng. Selective Laser Sintering –SLS), 3D tiskanje (eng. 3D printing – 3DP)

3.1. STEREOLOGRAFIJA - SLA

Stereolitografija je najčešće upotrebljavana tehnologija aditivne proizvodnje. Postupak omogućuje očvršćivanje kapljevito fotopolimera osjetljivog na djelovanje ultra ljubičastog zračenja u tankim slojevima pomoću lasera. Stereolitografijom se uglavnom prerađuju fotopolimeri temeljeni na akrilnim, vinilnim ili epoksidnim smolama. Slika 3.2. prikazuje princip rada.



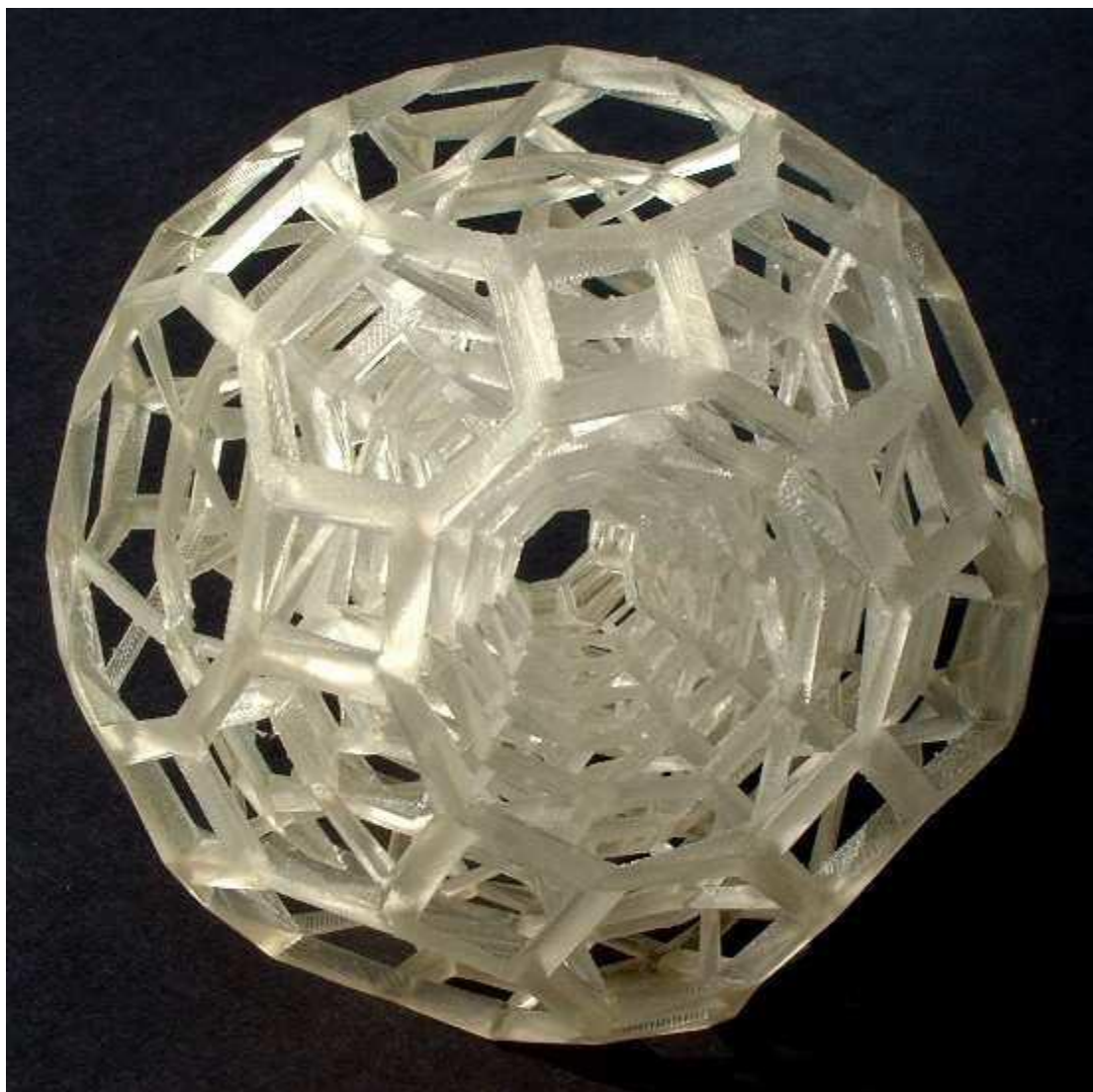
Slika 3.2. Princip rada SLA [3]

Elementarni dijelovi SLA uređaja su Ar ili He-Cd laser i njegova optička oprema, zrcalo koje je potrebno za usmjeravanje zraka, posuda sa fotopolimerom i pokretna podloga s mogućnošću kretanja u smjeru okomite osi dužinom razmaka sloja CAD modela

Princip rada temelji se na generiranju i usmjeravanju lasereke UV zrake koja se potom preko pomičnih zrcala usmjerava na različite horizontalne ravnine fotopolimera.

Molekule fotopolimera se selektivno očvršćuju prilikom zračenja, sukladno tome osim očvršćivanja fotopolimer se i srašćuje, i time prijanja na prethodni sloj. Početni sloj se najčešće 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. Objekti izrađeni stereolitografijom općenito imaju glatku površinu, ali kvaliteta objekta ovisi i o kvaliteti SLA uređaja koji se koristi za ispis. Vrijeme potrebno za stvaranje objekta stereolitografijom također ovisi o veličini SLA uređaja.

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 zrake, u određenim sustavima vidljiva svjetlost. U SL sustavima UV-zrake i vidljiva svjetlost su najčešće u upotrebi. U mikroelektronskoj industriji koriste se UV zrake i snopovi elektrona, dok u dentalnoj industriji pretežito dominiraju zrake iz vidljivog spektra.



Slika 3.3. Model od epoksidne smole načinjen postupkom stereolitografije-SLA [4]

3.1.1. Prednosti stereolitografije:

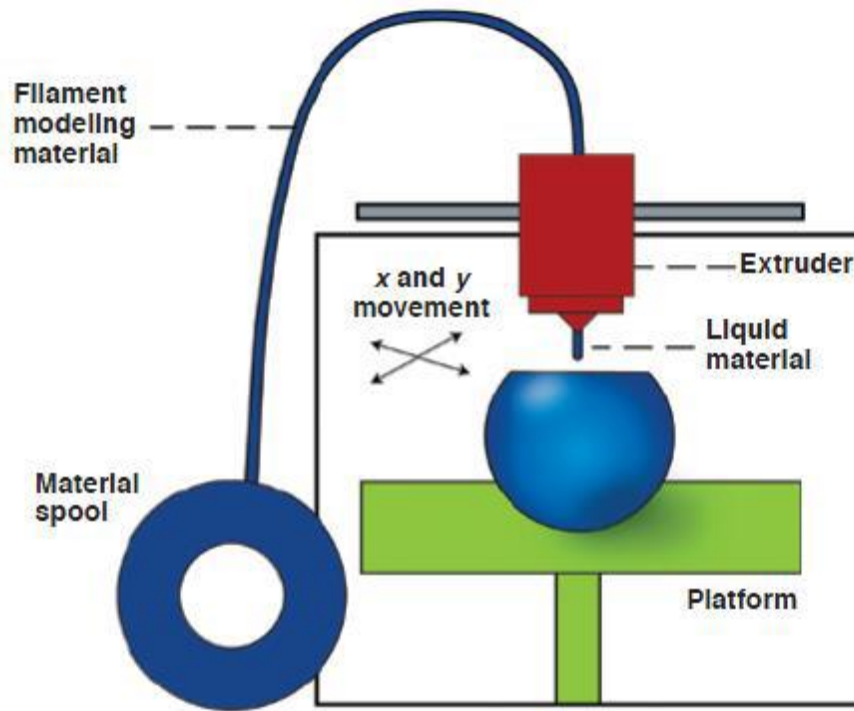
- visoka rezolucija
- nema geometrijskih ograničenja što je vidljivo iz slike 3.3.
- potpuna automatiziranost procesa
- pravljenje višebojnih proizvoda
- mogućnost rada 24h

3.1.2. Nedostatci:

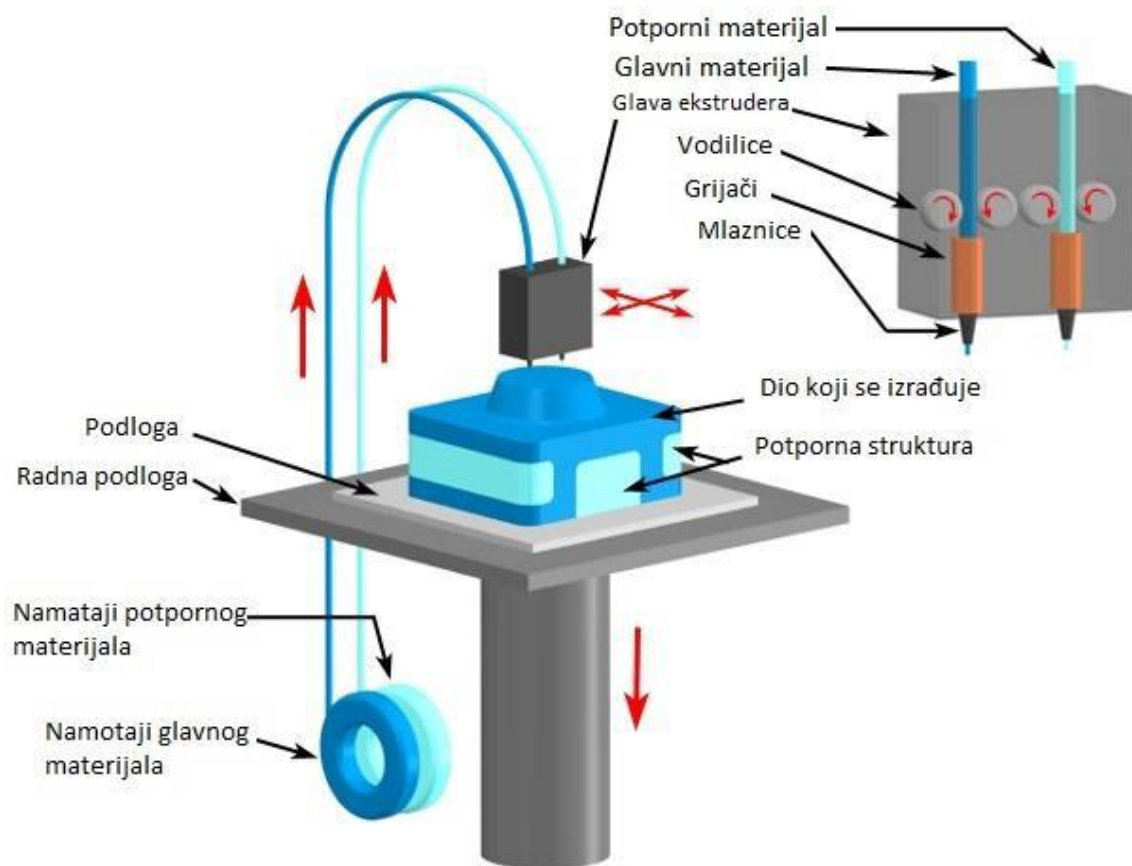
- potreba za podupor i naknadno uklanjanje istog
- potrebna naknadna obrada proizvoda
- deformacija polimara pri čvršćivanju
- razvijanje otrovnih plinova
- ograničenje materijala na fotopolimere
- ograničena primjena proizvoda
- u kompliciranim geometrijama može ostati zarobljena tekućina

3.2. TALOŽNO OČVRŠĆIVANJE – (FDM)

Postupak brze izrade protoipova razvijen je u tvrtki Stratasys iz SAD-a. U postupku se koriste polimernimaterijali u obliku žice kao što su:ABS (akrilonitril butadien stiren), medicinski ABS,E20 (elastomer na bazi poliestera), vosak za precizno ljevanje, PP, PE-LD, PE-HD,...Na koloturu je namotana nit od polimernog materijala koja ulazi u mlaznicu za ekstrudiranje. Mlaznica je grijana, tako da u njoj dolazi do rastapanja materijala, a takodjer ostoji mogućnost reguliranja dobave materijala. Ekstruzijska glava pričvršćena je na 3-osi sustav koji omogućuje da se pomiče u smjeru X, Y i Z. Materijal je ekstrudiran u tankim nitima i položen sloj po sloj na unaprijed određenim mjestima gdje se hladi i učvršćuje. Ponekad se hlađenje materijala ubrza pomoću ventilatora za hlađenje pričvršćenog na ekstruzijsku glavu. Da bi se područje u potpunosti popunilo potrebno je više prolaza. Također bitno je spomenuti materijal koji se ekstrudira preko druge ekstruzijske glave i služi kao potpora materijalu modela koji se izrađuje. Navedeni potporni materijal naknadno se ukloni. Kada se sloj završi, platforma za gradnju se pomiče prema dolje, ili u drugim postavkama stroja, glava za ekstruziju se pomiče prema gore.



Slika 3.4. FDM postupak [5]



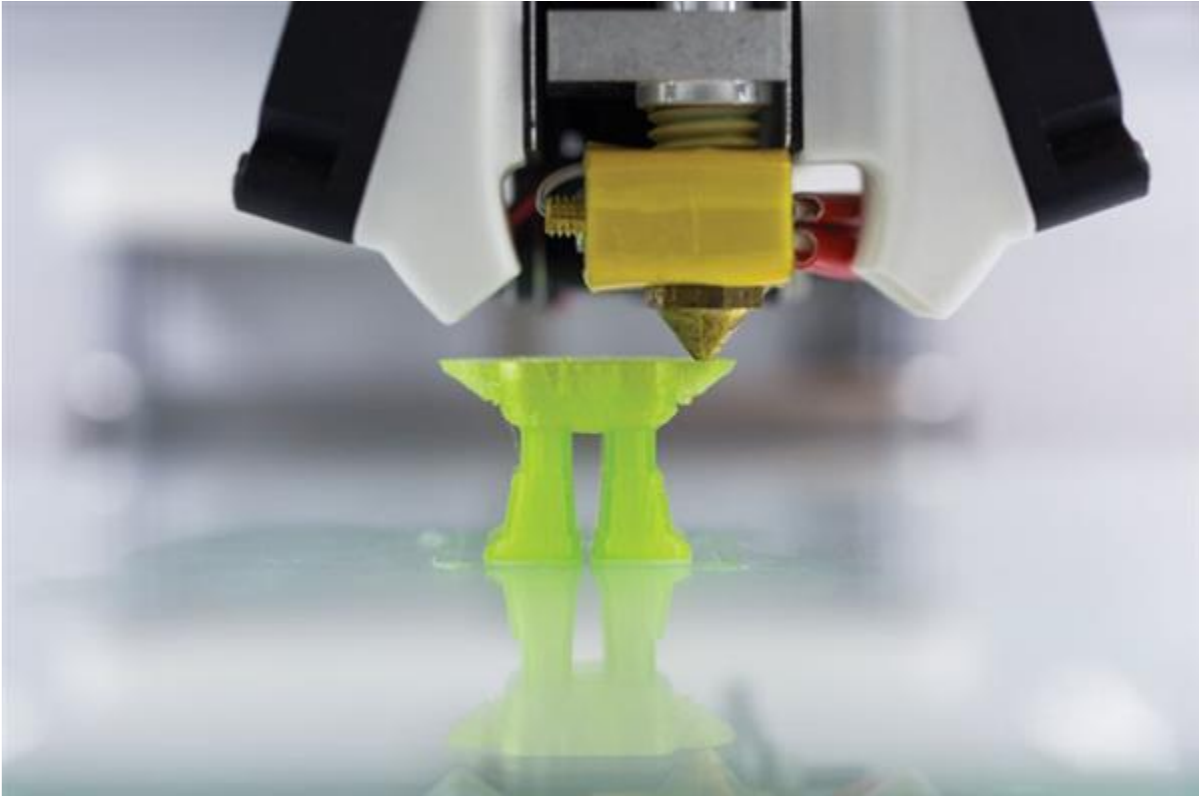
Slika 3.5 Proces izrade dijela FDM postupkom [6]

Debljina sloja materijala i vertikalna dimenzijska točnost je određena promjerom mlaznice, koja može biti između 0,127-0,33 mm. Kod pomicanja po x-y površini moguće je postići točnost od 0,254 mm.

Na slici 3.6. prikazan je proizvod izrađen FDM postupkom



Slika 3.6. Proizvod izrađen FDM postupkom [7]



Slika 3.7. Izrada proizvoda FDM tehnologijom [8]

3.2.1 VRSTA MATERIJALA

Materijali koji se koriste kod FDM postupka su dovoljno čvrsti da se mogu izrađivati prototipovi, dijelovi za funkcionalna testiranja i za upotrebu. Termo plastika za realne proizvode je stabilna i nema značajnijeg iskrivljenja, skraćivanja ili apsorpcije vlage, kao kod smola ili praškastih materijala koji se koriste u konkurentnim procesima (SLS,3DP)Zbog toga što je termoplastika ekološki stabilna, točnost izrade dijela se ne mijenja sa vremenom ili promjenom stanja okoliša.

ABSplus termoplastika (eng. Acrylontrile Butadiene Styrene)

- ekološki stabilan
- 40 % čvršći nego standardni ABS materijal

ABS M-30 termoplastika

- 25-70 % čvršći nego standardni ABS materijal
- dobra vučna čvrstoća i čvrstoća na savijanje
- spajanje slojeva je značajno jače za trajnije proizvode

PC termoplastika (polikarbonati-eng.Polycarbonate

- najčešće korištena termoplastika u industriji
- visoka vučna čvrstoća i visoka otpornost na temperature
- trajan i stabilan materijal za čvrste dijelove

3.2.2.PRIMJENA FDM POSTUPKA

Dijelovi proizvedeni FDM postupkom su idealni za modeliranje, podešavanje i funkcionalno testiranje, zbog toga jer su u stanju izdržati rigorozna testiranja, i neće se smanjiti, iskriviti ili upiti vlagu. Dijelovi izrađeni ovim postupkom su trajni i idealni za dijelove malog volumena, konceptualne modela (vizualizacija), funkcionalne prototipove za testiranje, proizvodne alate i inženjerske modele.

3.2.3. PREDNOSTI FDM POSTUPKA

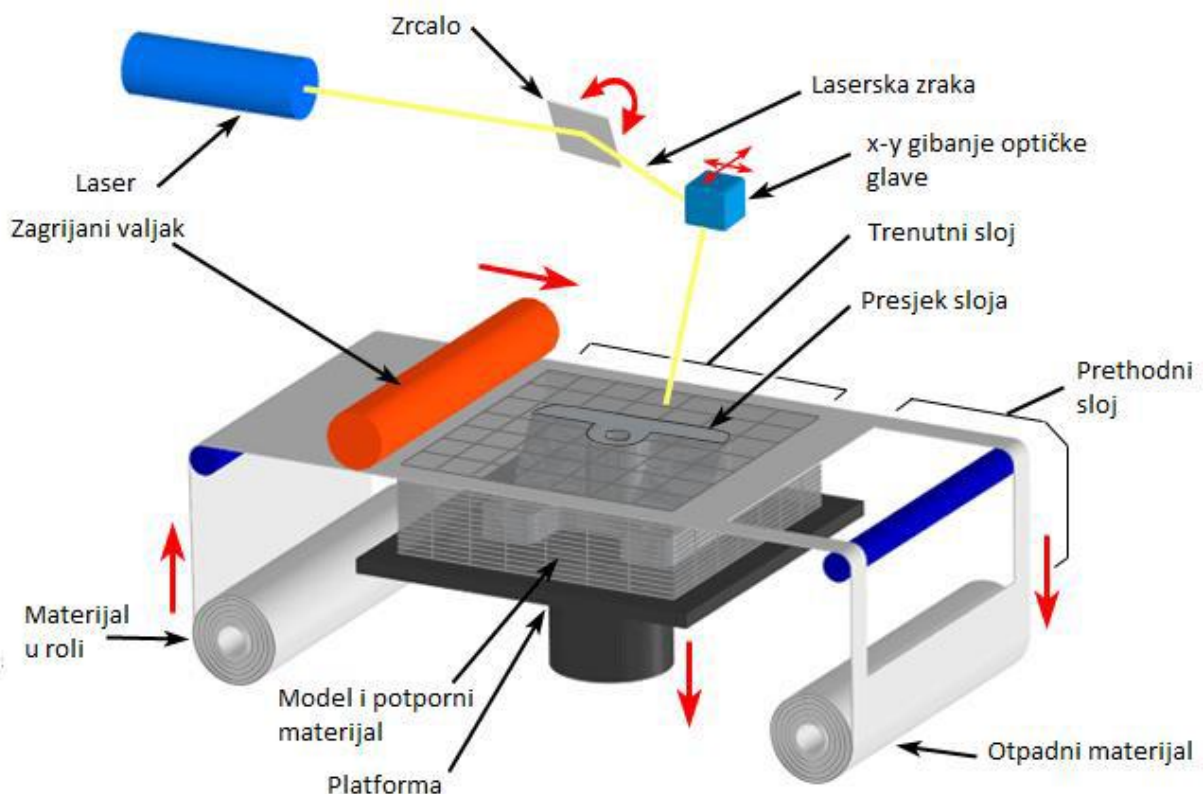
- izrada vrlo trajnih proizvoda
- postojanost oblika
- visoka vlačna čvrstoća izrađenih dijelova
- malo rasipanje materijala
- moguća izrada dijelova u više boja
- moguća izrada dijelova visoke točnosti

3.2.4. NEDOSTATCI FDM POSTUPKA

- cijena materijala
- ograničen broj materijala
- cijena stroja
- ograničene veličine izrađenih dijelova

3.3. IZRADA OBJEKATA LAMINIRANJEM (LOM)

Izrada objekata laminiranjem (eng. Laminated Objekt Manufacturing - LOM) je postupak brze izrade prototipova koja izrađuje 3D modele iz papira, plastike i kompozita. Tvrtna koja je prva razvila postupak izrade objekata laminiranjem je tvrtka Helisys Corp. iz Torrance u Kaliforniji. LOM je zapravo hibridni proces koji se sastoji od procesa oduzimanja i dodavanja materijala, u tom procesu model se izrađuje slojevima materijala, koji se režu individualno pomoću lasera u obliku koji odgovara presjku izrađivanog komada. Stoga kako se slojevi dodaju, višak materijala koji nije potreban za izradu presjeka se izrezuje van. Ovaj postupak je jedan od brzih postupaka RP tehnologije za dijelove velikih presjeka, te za dijelove složene geometrije. Slika 3.8. prikazuje LOM postupak.



Slika 3.8. LOM postupak [9]

3.3.1. PROCES IZRADE LOM POSTUPKOM

U procesu izrade LOM postupkom (slika 3.8.) zagrijani valjak prelazi preko radne površine, ili prethodnog sloja kako bi se materijal mogao zaljepiti za isti. Zatim se pomoću laserske zrake izrezuje kontura presjeka dijela proizvoda koji se izrađuje, tj. izrezuje se dio materijala koji se ne koristi kao budući proizvod, a zatim zagrijani valjak ponovo 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 odstanjuje sa platforme kako bi se olakšalo odvajanje gotovog proizvoda sa radne podloge.

3.3.2. PREDNOSTI LOM POSTUPKA

- izdržljivi, jaki metalni dijelovi
- visoka točnost
- široki raspon upotrebe metalnih materijala

3.3.3. NEDOSTATCI LOM POSTUPKA

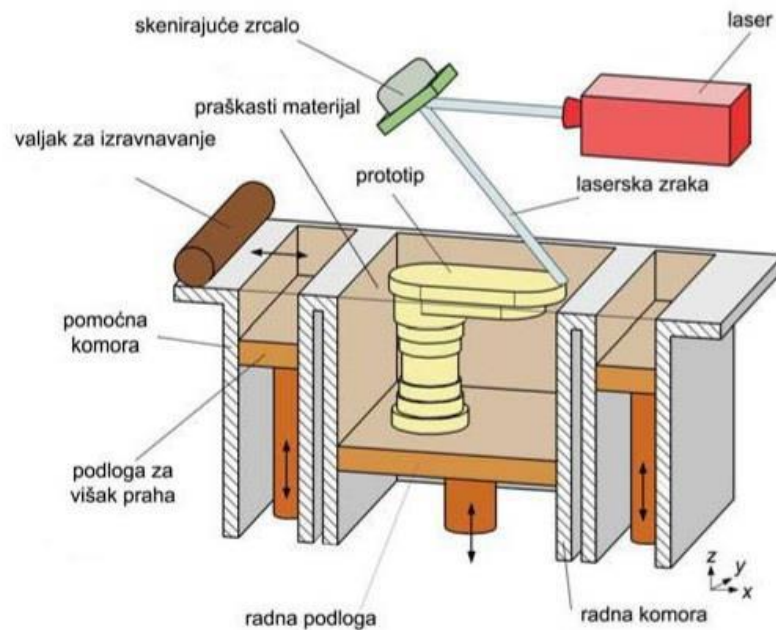
- gruba površina proizvoda, naknadna obrada
- manja točnost izmjera naspram SLS postupkom
- potrebna opskrba inertnim plinom
- visoki troškovi

3.4. SELEKTIVNO LASERSKO SRAŠĆIVANJE (SLS)

U SLS postupku laseri selektivno sintiziraju čestice polimernog praha spajajući ih zajedno i izgrađujući dio sloj po sloj. SLS postupak patentiran je 1989. godine u SAD-u. Za sinteriranje praškastih materijala (poliamid, elastomer, keramika, voskovi, metali ...) koristi se također laserski snop. Jedna od glavnih prednosti ovog postupka je mogućnost primjene različitih vrsta materijala. Postupak počinje od STL datoteke koja je dobivena na temelju CAD modela. Prvi SLS sistem je 1992. godine lansiran na tržište, i trenutno je nekoliko sistema u uporabi širom svijeta.

3.4.1. PROCES IZRADE SLS POSTUPKOM

Sloj praškastog materijala nanosi se na platformu, nakon toga laserska zraka prati presjek jednog sloja dijela koji se izgrađuje, te laserska zraka pogađa praškasti materijal, što utječe na to da se čestice materijala spajaju (sraščuju) zajedno. Sljedeći sloj praška se nanosi na prethodno napravljen sloj, koristeći valjak i idući sloj dijela se spaja sa već sraščenim slojem. Materijal koji nije spojen sa prethodnim dijelom, tj. materijal koji ostane u posudi ne iskorišten u ovom procesu služi kao potpora dijelu koji se izgrađuje. Kada je komad gotov materijal koji nije iskorišten može se bez problema izbrusiti sa gotovog komada. Pricio rada SLS postupkom prikazan je na slici 3.9.



Slika 3.9. Izrada dijela SLS postupkom [3]

3.4.2. VRSTE MATERIJALA KOD SLS POSTUPKA

Proces SLS dopušta razne vrste materijala. Neke od tih vrsta materijala čine ovaj proces superiornim u odnosu na druge procese brze izrade prototipova. Neki materijali koji se koriste kod ovog procesa su vosak, parafin, polimerno –metalni prašak, razne čelične legure, polimeri, najlon i karbonati. Polikarbonatni prašci su zapravo prvi materijali koji su se koristili u SLS procesu. Srašćivanjem se mogu postići bolje performanse ako se koriste prašci koji se sastoje od mješavine dvije grupe materijala, a to su:

- termoplastični materijali (najlon, poliester, vosak, neke vrste mješavine najlona i polikarbonata)
- kompletni materijali čija mehanička i toplinska svojstva određuju upotrebu novih proizvoda (metali, nemetali, kompoziti ...)

3.4.3. PREDNOSTI SLS POSTUPKA

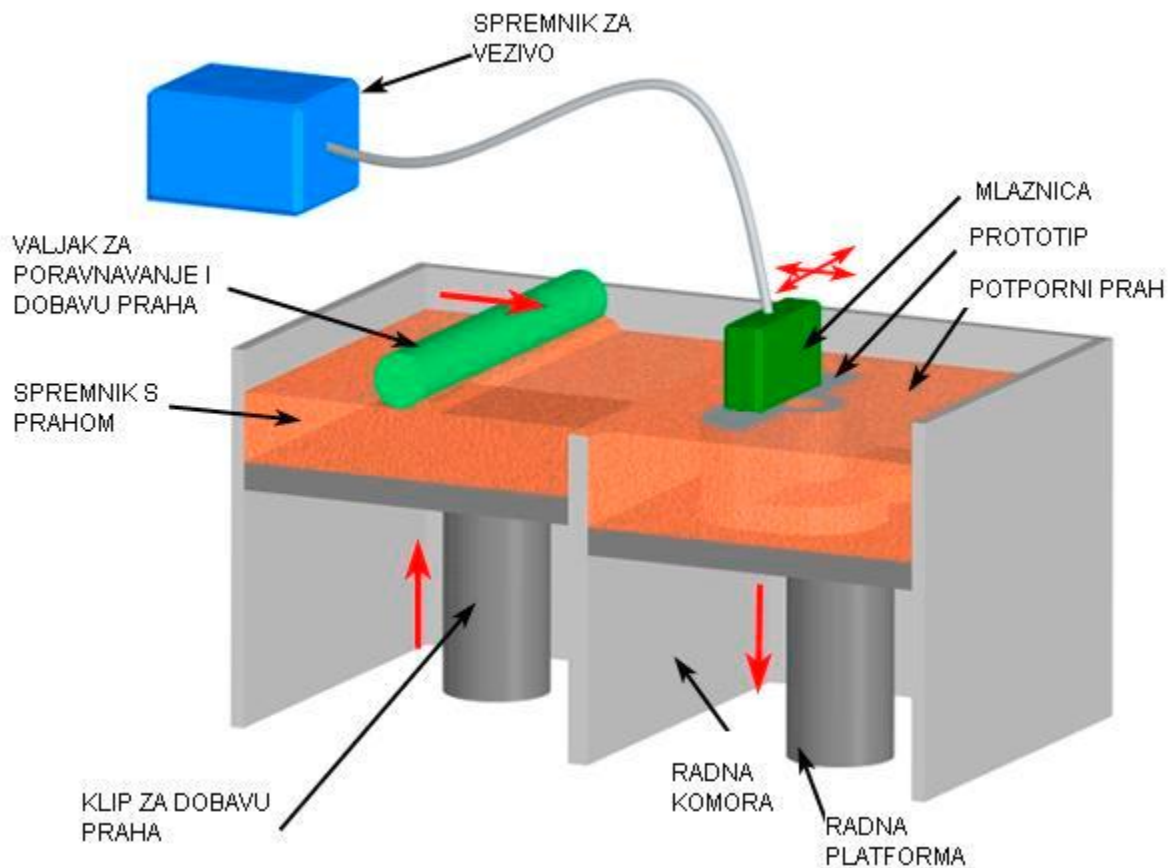
- postupak je brži od stereolitografije
- moguća je primjena većeg broja materijala
- dijelovi se mogu izgraditi bez dodatne potporne strukture
- nema škarta, ne upotrebljeni prah se može koristiti za izgradnju sljedećeg dijela

3.4.4. NEDOSTATCI SLS POSTUPKA

- površine proizvedenog komada su porozne
- stroju treba duže vrijeme da se ugrije i ohladi
- dijelovi se mogu značajno iskriviti
- pri korištenju pojedinih materijala potrebna je zaštitna atmosfera radi pojave otrovnih plinova tijekom spajanje (sraščivanja)

3.5. 3D TISKANJE (3DP)

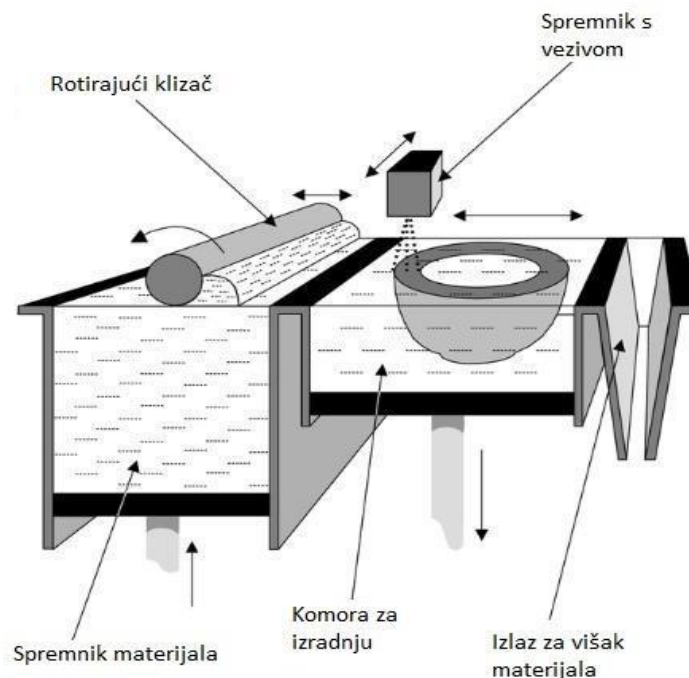
Postupak 3D tiskanja (eng. 3D Printing – 3DP) razvijen ja na MIT-u (eng. Massachusetts Institute of Technology) u SAD-u. Postupak se temelji na inkjekt mlaznicama s pomoću kojih se nanosi tekuće vezivo na praškasti polimerni materijal kojeg povezuje. 3D tiskanje je jedan od najkasnije razvijenih tehnika modeliranja, razvijen 1989.godine. U ovom procesu tekuće vezivo je utisnuto u praškasti medij koristeći mlaznice boje za ispisivanje fizičkog dijela iz CAD modela. Na slici 3.10. prikazan je postupak 3D tiskanja.



Slika 3.10. 3D tiskanje [10]

3.5.1. POSTUPAK 3D TISKANJA (3DP)

Komora sa materijalom sadži određenu količinu specijalno pripremljenog praškastog materijala. Proces počinje zagrijavanjem komore, a zatim se ispunjava slojem od polimernog praha na kojem se prototip izrađuje kako bi se olakšalo vađenje. Za nanošenje materijala u tankim slojevima koristi se glava printera koja radi na principu ink-jet printera. Tiskanje sloja odvija se tako da se prvo uz pomoć valjka nanosi sloj od 0,1 mm, zatim se kroz mlaznicu najprije nanosi vezivno sredstvo za prah, zatim se nanosi boja, pa sljedi posmak po osi Z, te ponovo nanošenje veziva i praha za sljedeći sloj. Ostatak praha koji se nalazi van kontura služi kao potporna kontura, a kasnije se reciklira. Spremnik s vezivom pomiče se po X i Y osi, dok se radna podloga pomiče po Z osi. Nakon toga radna podloga se spušta za debljinu sloja koji može iznositi 0,080 do 0,250 mm. Nakon toga klizač ponovo nanosi sloj materijala u komoru za izradu i postupak se ponavlja. Kada su svi slojevi otisnuti (isprintani) materijal koji nije spojen sa vezivom može se očistiti sa komada, te se može ponovo upotrijebiti.



Slika 3.11. Shematski prikaz proizvodnje dijelova 3D tiskanjem [11]

3.5.2. VRSTE MATERIJALA KOD 3D TISKANJA

Trenutno je na tržištu više vrsta materijala koji se mogu koristiti kod izrade dijelova 3DP postupkom . U tablici 1.1. navedeni su neki materijali i njihova svojstva.

- Tablica 1.1. Vrste materijala za 3DP postupak

Materijal	Cijena	Čvrstoća	Ostala svojstva
Smola	Relativno niska	Vrlo dobra čvrstoća	Vrlo glatka površina,dobra mogućnost bojanja
Keramika	Niska	Vrlo niska	Otporna na vodu i toplino,može se koristiti razne boje
Poliamid	Niska	Vrlo dobra čvrstoća	Vrlo glatka površina,otporan na vodu
Alumide	Niska	Dobra čvrstoća	Metalni izgled,neproziran Gruba površina,

3.5.3. PREDNOSTI 3DP POSTUPKA

- kraće vrijeme izrade u odnosu na druge RP postupke
- jeftiniji sirovi materijal kada se uspoređuje sa materijalima koji se koriste kod drugih RP postupaka
- suvišni materijal se može ponovo upotrijebiti
- kod izrade 3DP postupkom nije potrebna potporna struktura, što omogućuje izradu vrlo složenih oblika.

3.5.4. NEDOSTATCI 3DP POSTUPKA

- tek isprintani dijelovi su krhki, i potrebno im je vrijeme infiltracije
- ograničen broj primjenjivih materijala
- loša kvaliteta površine

3.5.5. PRIMJENA 3DP PRINTERA

- 3DP postupak se koristi za izradu keramičkih kalupa za izravno lijevanje metalnih dijelova, strukturne keramike, raznih složenih funkcionalnih dijelova, dijelova koji se koriste u medicini, razne makete i dr.

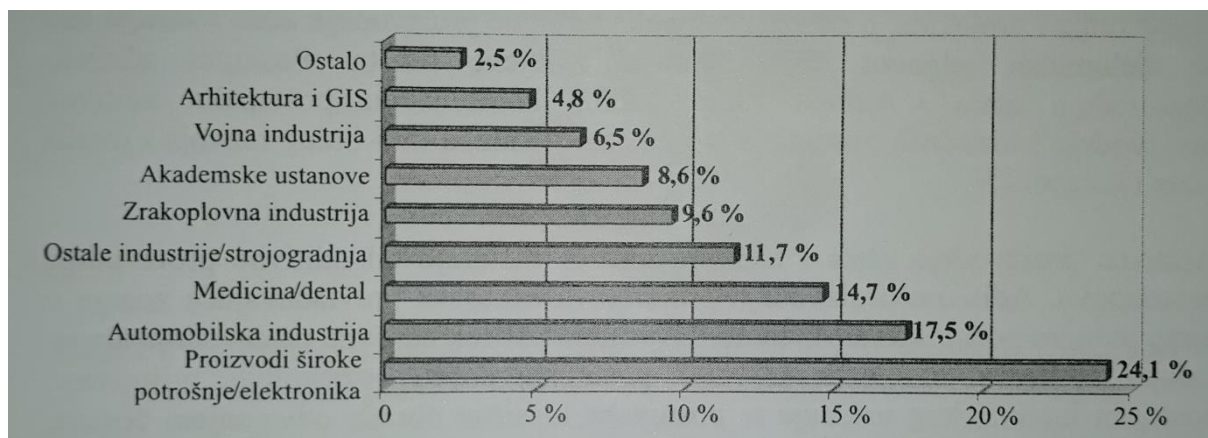
Z Corporation je vodeći proizvođač 3D printera. Na slici 3.12. prikazan je 3D printer tvrtke Z Corp.



Slika 3.12. 3D printer tvrtke Z Corporation, model Z 650 [12]

4. PRIMJENA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U RAZLIČITIM INDUSTRIJSKIM GRANAMA

Područje primjene aditivne tehnologije nalazimo gotovo u svim granama, od akademskih ustanova, potrošačke elektronike, vojne industrije, automobilske industrije, medicinske industrije pa sve do grana poput umjetnosti. Svrha proizvodnje može biti vizualizacija (prezentacija), izrada prototipa, izrada gotovih proizvoda, dijelova, alata i izrada kalupa. Slika 5.1. prikazuje udio aditivne tehnologije u pojedinim granama.

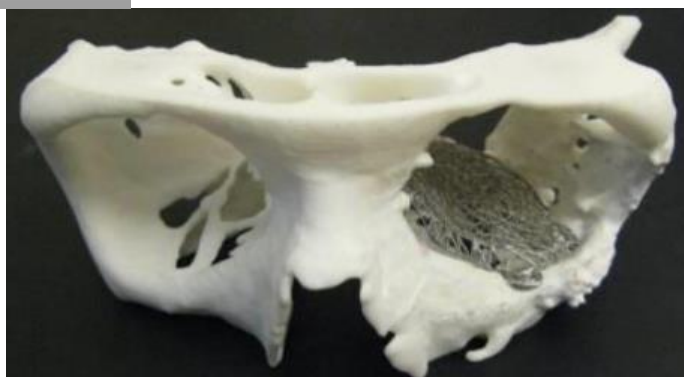
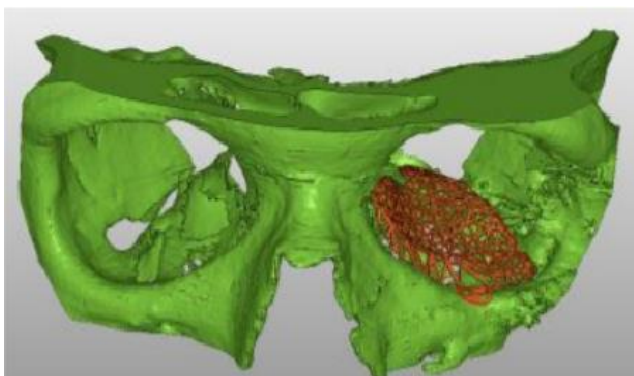


Slika 4.1. Područje primjene aditivne tehnologije [3]

4.1. PRIMJENA U MEDICINI

Aditivna tehnologija ima jako dobru primjenu u medicini, od izrade proteza, implantata pa sve do izrade organa što daje rezultat u obliku dizanja kvalitete života na višu razinu.

Slika 5.2. prikazuje model u CAD programu, Slika 5.3 kost u izrađenom fizičkom obliku, dok slika 5.4. prikazuje implementaciju na pacijenta.



Slika 4.2. CAD model [13]

Slika 4.3. Izrađena kost [13]



Slika 4.4. Implementacija na pacijentu [13]

Izrada samog vizualnog prototipa rađena je u CAD programu, dok je fizička izrada realizirana primjenom SLS postupka korištenjem materijala polyamid 2200. Prototip na slici 5.3. rađen je od čelika. Prednost takvog načina primjene tehnologija, naspram klasične rekonstrukcije lica jest ta da je implantat proizveden po mjeri pacijenta, te su korišteni materijali koji su pogodni njegovom organizmu, kako bi se spriječilo moguće odbacivanje.

4.2. PRIMJENA U ZRAKOPLOVNOJ INDUSTRIJI

Primjena aditivne proizvodnje u zrakoplovnoj industriji omogućuje proizvodnju kompleksnih proizvoda u kraćem vremenu, neovisnost o dobavljačima zbog izrade zamjenskih dijelova, poput funkcijskih dijelova motora, rashladnog sistema, nosača itd.



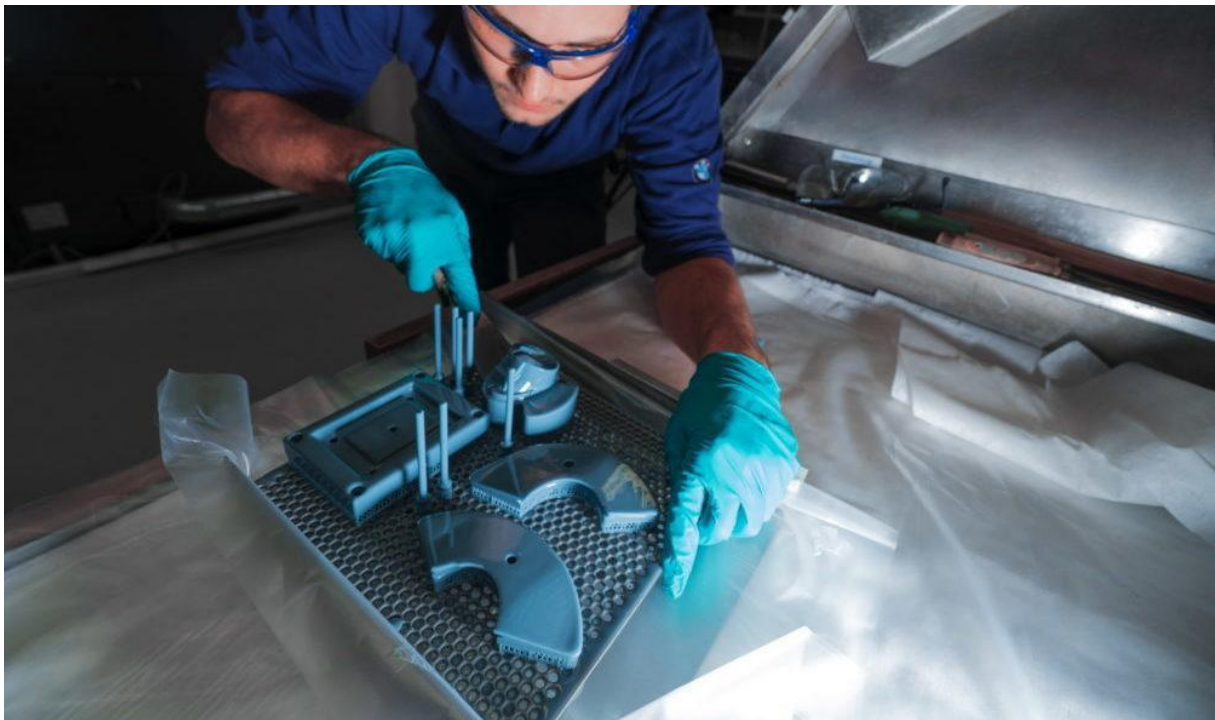
Slika 4.5. Turbina izrađena primjenom aditivne proizvodnje [14]

Na slici 5.5. prikazana je turbina helikoptera izrađena sa strane EOS-manufacturing.

Proizvod je funkcionalan prototip, te proizvodu nije potrebna završna obrada prilikom preuzimanja proizvoda. Za razliku od klasične izrade, proizvod je izrađen u kraćem vremenu i proizvedeno je manje otpadnog materijala.

4.3. PRIMJENA ADITIVNE TEHNOLOGIJE U AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

Primjena aditivne proizvodnje u automobilske industriji pruža mogućnosti brže i jeftinije izrade gotovih i rezervnih dijelova za automobile, od klipova cilindra, kotača, turbina, nosača za motor itd.



Slika 4.6. Izrađeni dijelovi automobila [15]

Tvrtka BMW izradila je model Rolls-Royce automobila nazvanog Phantom, automobil je poznat potome što je više od deset tisuća dijelova napravljeno aditivnom proizvodnjom.

ZAKLJUČAK

Aditivna tehnologija je brz, jednostavan i efikasan način izrade prototipova, funkcionalnih dijelova i alata. Postupci aditivne proizvodnje su alternativa konvencionalnim postupcima proizvodnje, jer kod njih nema potrebe za specijalnim alatima, a mogu se izrađivati jako komplicirani oblici. Iako aditivne tehnologije pružaju puno prednosti, one imaju i nedostatke. Neki od nedostataka su visoka cijena materijala, visoka cijena uređaja i ograničen broj materijala koji se mogu koristiti kod određenog postupka. Izbor aditivne proizvodnje je dobar kod relativno male i komplicirane proizvodnje. Jedan od izazova aditivne tehnologije je kontrola kvalitete izradjenog proizvoda. U usporedbi sa proizvodima načinjenim tradicionalnim postupcima, svojstvu materijal, točnosti izmjera i kvaliteti površine u većini slučajeva su inferiorni.

LITERATURA

- [1] . Vrbanec, D.: *Analiza dostupnih postupaka brze izrade prototipova*, Završni rad, Strojarski Fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2011.
- [2] . Nino Krznar, Mladen Šercer, Ana Pilipović: tehničke znanosti: Razvoj i izrada polimernog proizvoda pomoću taložnog očvršćivanja, 22. Lipnja, 2018, str 10-11
- [3] . Godec D., Šercer M., Aditivna proizvodnja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, lipanj 2015
- [4] . <http://www.georgehart.com/cccg/rpgm.html>
- [5] . SOLIDFILL 3D Printing Solutions; Fused Deposition Modeling; <http://solidfill.com/wp-content/uploads/2014/11/FDM1>. (22.06.2018.)
- [6] https://www.google.hr/search?q=FDM+proces&biw=1920&bih=979&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjPz67P7aLNAhVBPRoKHS35BScQ_AUICCGB#imgrc=eQGIfCNvii9bnM%3A , dostupno, 22.6.2018
- [7] . maxresdefault.jpg <https://i.ytimg.com/vi/WHO6G67GJbM/maxresdefault.jpg>
(22.06.2018.)
- [8] . new-research-project-help-make-fdm-3d-printing-whole-lot-faster-2.jpg <https://www.3ders.org/images2017/new-research-project-help-make-fdm-3d-printing-whole-lot-faster-2.jpg> (22.06.2018.)
- [9] https://www.google.hr/search?q=laminated+object+manufacturing&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjJ5o7lh6fNAhVIWBoKHWKRBS4Q_AUICCGB&biw=1920&bih=979#imgrc=0UO6peleea7xVM%3A (22.06.2018.)
- [10] . Additive Fabrication, <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
(22.06.2018)

[11] . Horvat, M; Pregled aditivnih postupaka proizvodnje; Završni rad br 188/PS/2016; str 18 (22.06.2018)

[12]. <http://www.zcorp.com/es/Products/3D-Printers/ZPrinter-650/spage.aspx>
(22.06.2018.)

[13] . Salmi, M; Patient-specific reconstruction with 3D modeling and DMLS additive manufacturing; Emerald Group Publishing; <https://tinyurl.com/y7jogd9n> (22. 06. 2018)

[14] . EOS-manufacturing; <http://tinyurl.com/y7hqw5j5> (22.06.2018.)

[15] . 3Dprint.com; The Rolls-Royce Phantom Now Has More Than 10,000 3D Printed Parts, BMW Looks to Expand Use Across Entire Line of Cars; <https://3dprint.com/142364/3d-printed-parts-bmw/> (22.06.2018)