

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET

IVAN ZELJKO

**SVOJSTVA I VIZUALNA ANALIZA
PROIZVODA OTISNUTIH 3D TISKOM**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2016.



Sveučilište u Zagrebu
Grafički fakultet

IVAN ZELJKO

**SVOJSTVA I VIZUALNA ANALIZA
PROIZVODA OTISNUTIH 3D TISKOM**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

doc.dr.sc. Mile Matijević

Student:

Ivan Zeljko

Sažetak

Nove tehnologije i nove inovacije stvorile su novu 3D tisk tehnologiju. Pojavom 3D tehnologije tiska na tržištu, polako se počeo mijenjati odnos industrije prema proizvodnji. Sve veća uporaba ove tehnologije definitivno ugrožava tradicionalnu konvencionalnu metodu proizvodnje. Mnogi stručnjaci 3D tehnologiju tiska oslovljavaju kao „treća industrijska revolucija“. S takvom reputacijom na svjetskom tržištu rijetko se koja industrijska grana može pohvaliti, pa je potencijal velik. S toga se ovaj rad odnosi upravo na istraživanje i mogućnosti 3D ili aditivne tehnologije tiska kroz nove materijale. To su kompozitni materijali većinom na bazi polimera koji sa drugim kompozitnim materijalom daju poseban efekt imitacije.

Cilj ovog rada bio je utvrđivanje kvalitete i mogućnosti materijala s efektima, FDM tehnologijom tiska. Materijali s efektima su se pokazali kao prava revolucija među materijalima za 3D tisk, ne samo zbog efekata nego zbog kvaliteta i načina primjene. FDM tehnologija se pokazala kao jednostavna, stabilna i sigurna opcija tiska. Metodologija rada se odnosi na teorijski i praktični dio u kojem se pored eksperimenta sa 3D tiskom odradila i anketa o dobivenim proizvodima. U radu se također prikazuju najpopularnije i nabolje tehnike tiska, nove inovacije i nove kombinacije materijala. Istaknuti treba metal kao najbrže rastući materijal u 3D tisku. Obzirom na relativno kratku povijest ove tehnologije, razvilo se jako puno tehnologija i materijala, a materijali s efektima upravo daju novi obol, pa se postavlja hipoteza da takvi materijali pored sposobnosti izrade replika, mogu iznijeti vrlo kvalitetne i estetski lijepe materijale koji su i jeftiniji od običnih.

Ključne riječi:

3D tisk, materijali s efektima, prototipovi, polimeri

Abstract

New technologies and new innovations have created new 3D printing technology. With the advent of 3D printing technology on the market, slowly began to change the industry approach to production. The increasing use of this technology is definitely endangering traditional conventional production method. Many experts 3D printing technology are referred to as the "third industrial revolution". With such a reputation on the world market is seldom that industrial sector boasts, but the potential is huge. Therefore, this article refers to research the possibilities of 3D printing or additive technology through the new material. These are composite materials mostly based polymers with other composite materials give a special effect imitation. The aim of this study was to determine the quality and possibilities of materials with effects, FDM technology press. Materials from the effects have proved to be a real revolution among the materials for 3D printing, not only because of the effects but because of the quality and methods of application. FDM technology is proven to be fast, stable and secure option press. The methodology of work refers to the theory and practice which in addition to experiment with 3D printing and did a survey of compensating products. The paper also shows the most popular and better printing techniques, new innovations and new combinations of materials. Prominent be metal as the fastest growing material in 3D printing. Given the relatively short history of the technology, developed a lot of technology and materials, and materials with effects just make new contribution, which raises the hypothesis that such materials in addition to the ability of making a replica, can bring high-quality, aesthetically pleasing materials that are cheaper than ordinary..

Keywords:

3D printing, materials with effects, prototypes, polymers

Sadržaj

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Prvi koraci 3D tiska kroz povijest	2
2.1.1 Nagli razvoj i komercijalizacija trodimenzionalnog tiska	3
2.2. RepRap tehnologija	6
2.3. Brza izrada prototipova	7
2.3.1. STL datoteka	9
2.5.1. Stereolitografija (SLA)	12
2.5.2. Izrada modela nanošenjem topljenog materijala (FDM/FFF)	16
2.5.3. Selektivno lasersko srastanje (SLS)	20
2.5.4. Selektivno lasersko taljenje (SLM)	24
2.5.5. Direktno lasersko srastanje metala (DMLS)	28
2.5.6. Taljenje pomoću snopa elektrona (EBM)	30
2.5.7. Višeslazni 3D tisak (Multy Jet Printing)	33
2.5.8. Laminirana proizvodnja objekata (LOM)	35
2.5.9. Trodimenzionalno tiskanje (3D Printing-3DP)	39
2.6. Usporedba 3D tiska sa konvencionalnom metodom proizvodnje	42
2.6.1. Proizvodnja prototipova	42
2.6.2. Korištenje materijala	44
2.6.3. Masovna proizvodnja	45
2.6.4. Dostupnost specifičnih materijala	45
2.6.5. Skale proizvedenih dijelova	46
2.7. Primjene tehnika trodimenzionalnog tiska u industriji	46
2.7.1. Autoindustrija	47
2.7.2. Zrakoplovna industrija	48
2.7.3. Svemirska industrija	49
2.7.4. Medicina	50
2.8. Materijali za 3D tisak	51
2.9. Budućnost aditivne tehnologije	53

3. EKSPERIMENTALNI DIO	56
3.1. Praktični dio	56
3.1.1 Izrada 3D modela i pokretanje procesa 3D tiska.....	57
3.1.2. Materijali s efektom imitacije.....	59
3.2. Metodologija i plan istraživanja.....	65
3.2.1. Anketni upitnik.....	66
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	71
5. ZAKLJUČAK.....	75
6. LITERATURA	76

1. UVOD

Razvoj tehnologije 3D tiska od samog početka ide u korak sa tehnološkim inovacijama i novim materijalima. Nove tehnologije i novi načini 3D tiska konstantno su obogaćivali grafičku tehnologiju kroz povijest. Osobit napredak tiska u grafičkoj tehnologiji osjetio se u dvadesetom stoljeću, a kruna razvoja tehnologije je pojava 3D tiska. Za mnoge stručnjake 3D tehnologija tiska pokreće treću industrijsku revoluciju. Razlog pojave na tržištu 3D tisak opravdava potpuno drugačijem pristupu izradi tvorevina od konvencionalne metode. Klasična metoda proizvodnje podrazumijeva izradu predmeta raznim kalupima i metodom oduzimanja materijala da se bi dobio konačan produkt, dok je 3D tisak u suprotnosti jer je na bazi tzv. aditivne tehnologije proizvodnje, koja podrazumijeva slaganje produkta metodom sloj na sloj. Takav način proizvodnje u početnom razvoju koristio se isključivo za razvoj prototipova. Međutim s razvojem novih tehnologija i materijala, aditivna tehnologija proizvodnje je prešla na izradu naprednih prototipova, konceptnih modela i u konačnici na produkcijske dijelove koji se koriste za krajnju uporabu. Iako se još i danas ponajviše koristi za brzu proizvodnju prototipova i modela, napredak u proizvodnji gotovih proizvoda naglo raste jer raste broj industrija koje koriste usluge 3D tiska. Aditivna tehnologija proizvodnje raste neslućenim brzinama, stoga se iscrpno rade istraživanja na novim tehnologijama i novim materijalima jer glavni cilj tehnike 3D tiska je uzeti što veći dio kolača konvencionalnoj proizvodnji. U radu se prikazuje tehnologija 3D tiska kroz sve parametre, te se opisuju sve glavne tehnike. Cilj ovog rada je prikazati mogućnosti 3D tiska sa FDM tehnologijom kroz posebne materijale koji imaju sposobnost efekta imitacije. Kroz rad se prikazuje i predstavlja dio novih materijala korištenih u 3D tisku, pri čemu je poseban naglasak stavljen na rezultate koje daju materijali s dodanim efektima. Upravo su ti materijali i rezultati njihovog korištenja obuhvaćeni i eksperimentalnim dijelom ovog rada u vidu analize specijalnog materijala, samog procesa te u konačnici gotovog proizvoda koji se analizira i kroz anketno ispitivanje na krajnjim korisnicima. Potrebno je istražiti koliko materijali sa efektima mogu biti vjerodostojni i koje su njihove kvalitete i nedostaci. S toga se postavlja hipoteza da se s ovakvim materijalima na FDM stroju mogu dobiti proizvodi koji daju vjernu repliku nekog drugog materijala po njegovoj strukturi i materijalu.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Prvi koraci 3D tiska kroz povijest

Početni oblici grafičkog izražavanja i primitivni načini otiskivanja sežu u daleku povijest ljudskog roda. Kronološki gledano razvoj grafičke tehnologije i otiskivanja uopće, prožima se kroz ljudsku povijest u potrebi čovjeka da misli i riječi prenese na neki medij koji bi se mogao lako umnožiti i distribuirati. Prava prekretnica i nagli razvoj tiskarstva dogodio se nakon izuma Gutenbergove preše, odnosno prvog službenog pojavljivanja tiskarskog stroja. Nakon toga slijedi nagli razvoj unutar grafičke tehnologije sa raznim načinima otiskivanja, te raznim vrstama strojeva. Pojam trodimenzionalnog tiska ima daleko veću prošlost nego što je percepcija ljudi kad se govori o takvoj tehnici. Tehnika 3D tiska svoje korijene vuče još od početka 1980., stoga je iznenađujuće da je rođena prije trideset godina i da je još i danas nedovoljno istražena i relativno mlada grana tehnologije [1].

Implementiranje 3D tehnologije u grafičku struku dolazi krajem 20. stoljeća nakon razvoja i prvih primjena 3D tehnologije u fotografijama i filmovima. Točnije prvi puta 3D tehnologija u procesu tiska pojavljuje se krajem osamdesetih godina 20. stoljeća, u obliku brze „Rapid Prototyping“ (RP) tehnologije. Prvenstveno je bilo zamišljeno za brzu proizvodnju prototipa proizvoda uz što manji trošak i uz što kraći vremenski period. Prvi patent je razvijen još 1980. od dr. Kodame ali zbog spleta okolnosti taj patent nije prošao tada. Međutim prvi početak 3D tiska veže se uz 1986. godinu kada je izrađen prvi patent u formi aparata za stereolitografiju (SLA). Izumitelj ovog je bio Charles Hull koji je potom osnovao društvo 3D Systems Corporation koja je još i danas jedna od najvećih i najproduktivnijih kompanija u sektoru aditivne proizvodnje. U narednim godinama pojavljuje se komercijalni Rapid Prototyping (RP) sustav u kompaniji 3D Systems. Iako je stereolitografija (SLA) prva krenula sa radom, ipak nije bila prva aditivna tehnologija tiska, jer je iste godine priznat patent koji uključuje postupak selektivnog laserskog srastanja (Selective Laser Sintering). Sve se odvijalo krajem osamdesetih kada je Scott Crump suosnivač Stratasysa pokrenuo zahtjev za priznanje tehnologije 3D tiska sa taloženjem rastaljenog materijala (Fused Deposition Modeling).

FDM je aditivna tehnologija spajanja sloj po sloj koja se danas upotrebljava za realizaciju 3D modela putem 3D tiska. Početkom devedesetih godina licencirana je FDM tehnologija kada stupaju na snagu i novi 3D postupci tiska poput proizvodnje balističkim česticama (Ballistic Products Manufacturing), zatim proizvodnja laminiranih objekata (Laminated Object Manufacturing), tehnikom očvršćivanja materijala i sl. [2].

Godine 1992. 3D Systems je napravio prvi pravi 3D printer. Bazirao se na tehnologiji aditivne proizvodnje spajanjem slojeva koji su se stvarali laserskim zagrijavanjem praha od pojedinog materijala. 1993. Massachusetts Institute of Tehnology (MIT) razvija i patentira tehnologiju 3D tiska baziranu na principu ink-jet tehnologije. Korištenjem ovakve tehnologije, jedan materijal se mogao mlaznicama prenijeti na drugi, a zatim su se spajali kako bi se omogućila što brža i što točnija proizvodnja 3D objekta. Kompanije Stratasys i Z Corporation su brzo uvidjele prednosti ovakvog načina izrade prototipa i način na koji bi se ovakva tehnologija mogla implementirati u različita područja industrije. Već tada se krenulo sa 3D tiskanjem materijala na bazi plastike i metala. Dolaskom ovakvih materijala i njihovim nanokompozitnim miješanjem, mogu se dobiti iskoristivi materijali čvrstih struktura. Razvojem ovakvih nanokompozita u 3D tisku došlo je do otvaranja novih mogućnosti i načina primjene u medicini i industrijskoj proizvodnji. Do početka 21. stoljeća pojavilo se mnoštvo novih tehnologija za trodimenzionalan tisak, međutim one su još bile ograničene na industrijske primjene i uglavnom se radilo o postupcima za izradu prototipa. Nakon toga uslijedio je postupak ojačavanja tehnologije koja se primjenjuje za 3D tisak i važno je spomenuti da je aditivna proizvodnja (AM) postala prihvaćeni krovni termin za sve postupke [3].

2.1.1 Nagli razvoj i komercijalizacija trodimenzionalnog tiska

Na prijelazu iz 20. u 21. stoljeće događaju se masovna istraživanja i razvoj na području 3D tiska. Pokreću se komercijalne operacije kao što su Sandersov prototip, ZCorporation, Arcam, Object Geometries, zatim MPC Technologies koji je priznati proizvođač vakumske opreme i koji je uveo SLM tehnologiju. Tako su se početkom 2000. godine uvele mnoge tehnologije na tom području, premda su još uvijek bile usredotočene na industrijske primjene. Kasnije se pojavljuje EnvisionTec, ExOne osnovan 2005. od društva Extrude Hone Corporation, a društvo Sciaky Inc prvo je uvelo

vlastiti aditivni postupak temeljen na vlasničkim pravima zaštićenoj tehnologiji koja koristi elektronske snopove za varenje materijala. Sva prethodno nabrojana društva doprinijela su novu snagu zapadnog društva na globalnom tržištu. Iako je razvoj 3D tiska u prvih nekoliko godina 21. stoljeća bio sve veći i očito su se stvari pokretale u dobrom smjeru ipak je ta tehnologija još bila rezervirana za posebne i skupe usluge, još i dalje najčešće industrijske. Postojao je visoki cjenovni razred 3D tiska, gdje je u prvom planu bila proizvodnja visokovrijednih, vrhunski projektiranih i složenih tvorevina. Takvi proizvodi su prvenstveno patentirani za sektore zrakoplovstva, auto industrije, medicine i finog draguljarstva. Sva prethodna istraživanja tek su se kasnije počela isplaćivati, a sve njihove razvojne jedinice sa 3D tiskom vjerojatno nikad neće ni prispjeti u javnosti. S druge strane neki su se proizvođači sustava za 3D printere pozabavili unaprjeđenjem i razvojem koncepata koji bi kasnije mogli imati dobru podlogu za razvoj učinkovitijih sustava jednostavnih za upotrebu.

Tek 2007. pojavljuje se sustav 3D tiska od strane 3D Systems koji može biti komercijaliziran ali njegova cijena od 10000\$ nije bila primamljiva, kao što ni sustav nije dobro doraden. Nakon toga željno se iščekivao dolazak Desktop Factoryja, 3D printera kojem bi najviša cijena bila 5000\$ i koji bi napravio pravi odjek na tržištu. Međutim od toga nije bilo ništa jer je organizacija odustala od proizvodnje a Desktop Factory kupilo je društvo 3D Systems. Unatoč tome što je ideja Factoryja propala 2007. je bila prekretnica u razvoju 3D printera koji imaju pristupačnu tehnologiju za širi sloj kupaca. Unatrag nekoliko godina ranije, prije Factoryjevog izuma pojavila se RepRap tehnologija koju je izumio Dr. Bowyer. RepRap tehnologiju je osmislio kao otvoreni i samo-replicirajući sistem u 3D printeru i to je nemjerljiv uspjeh ljudi poput Bowyera za drugo vremena. Tada je bila u svom samom začetku, no kasnije se postepeno razvijala proporcionalno. Nakon dugo godina od samog pokušaja dobivanja 3D tiska dogodio se 2009. prvi komercijalni dostupni 3D printer koji je temeljen na konceptu RepRap, a dobio je ime BfB RapMan (Slika1.).



Slika 1. Prvi komercijalni RepRap 3D pisac

Izvor: <http://rinstruct.com/products/bfb-rapman/>

Makerbot Industries je društvo koje je u stopu pratilo razvoj događaja i koji su bili aktivno uključeni u razvoj RepRap uređaja. Od pojave prvog komercijalnog printera BfB RapMana pojavio se velik broj sličnih printera s postupkom taloženja. Još jedna zanimljiva stvar oko RepRap uređaja je ta da je pomogao u komercijalizaciji brojnih uređaja, ali da se njihova filozofija bazira na otvorenim konceptima za 3D tiskanje što ujedno dovodi do udaljavanja od komercijalizacije njihovih printera. Slijedeći veliki period za 3D printere je 2012. kada su se na tržištu pojavile inačice sa manjom cjenovnom razinom sa alternativnim postupcima tiskanja. Jedan od prvih takvih je 3D printer B9Creator (DLP tehnologija), da bi poslije toga izašao Form1 (stereolitografija). Oba ova printera su postigla ogroman uspjeh. U slijedećim godinama ispred slijedio je rast na tržištu, što zbog veće uloge u medijima a što zbog novih printera [2].

2.2. RepRap tehnologija

RepRap je 3D uređaj koji je kako je prethodno navedeno nastao 2009. izumom Dr. Bowyera i koji je uveo pravu revoluciju na području 3D printera. Ovakav uređaj označava stroj opće namjene u 3D tisku otvorenog tipa koji može sam sebe proizvoditi samo-umnožavanjem. RepRap dolazi u formi otvorenog dizajna koji ispisuje plastične i druge dijelove koji su spremni za upotrebu. Ovaj uređaj je prvi od 3D pisača niske cijene za kupce sa manjom kupovnom moći koji je pokrenuo „open-source“ revoluciju među 3D printerima [4]. Pošto je RepRap otvoreni dizajn, svi tipovi pisača su proizvedeni u projektu pod licencom za slobodni softver. Do danas ovaj projekt je objavio četiri 3D stroja za tiskanje: „Darwin“ iz 2007., „Mendel“ iz 2009., „Prusa Mendel“ i „Huxley“ objavljeni 2010. Same nazive su dobili po poznatim biologima pošto je i svrha RepRapa da stvaraju replike i evoluciju u 3D tiskanju. Konstruktori ovakvih uređaja su ponajviše imali namjenu ovakve uređaje približiti širokoj masi ljudi kako bi mogli neke stvari napraviti umjesto da ih se kupuje. RepRap printeri se sastoje od ekstrudera termoplastike postavljenog na kompjutorski kontroliranoj XYZ platformi. Takva platforma je izgrađena od čeličnih šipki i nosača povezanih tiskanim plastičnim dijelovima. Sve tri ose su spojene motorima, u X i Y preko zupčastog remena a u Z preko navojnih vretena. U središtu uređaja je ekstruder termoplastike koji je ranije koristio motor sa zupčanikom istosmjerne struje kako bi pokretao vijak koji bi čvrsto pritiskao plastični snop prisiljavajući ga da prođe kroz zagrijanu komoru za topljenje i uđe u usku sapnicu ekstrudera. Problem istosmjerne struje je bio jer nije mogla kontrolirati precizno zaustavljanje i pokretanje uređaja. Zbog toga ekstruderi novijeg datuma koriste „step“ motore koji pokreću vlakno na način da pritišću vlaknu između nazubljene osovine i ležaja. Elektronika u RepRap modelu koristi se platformom otvorenog koda Arduino s dodatnim pločama pri upravljanu motorima. Međutim današnja elektronika koristi Sangiva matičnu ploču koja se sastoji od dva Arduino od kojih jedan koristi ploču za kontrolu ekstrudera. Ovakav način izrade omogućuje proširenje ekstrudera da svaki bude sa svojim kontrolama [5].

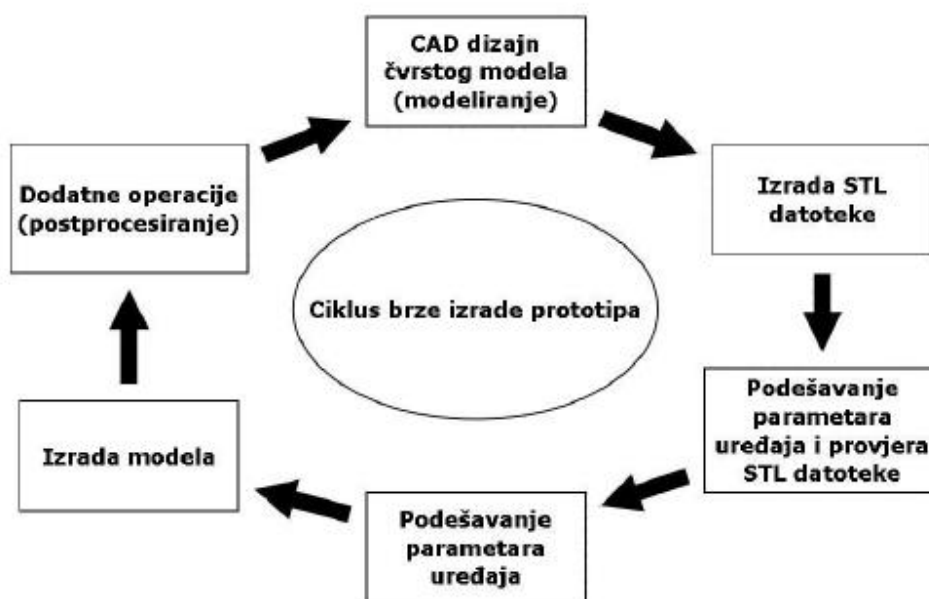
3D stolni uređaji su postali široko dostupni pa je to dovelo do intenzivnog istraživanja u svim područjima. Tehnika 3D tiska je bila ograničena na uski krug profesionalaca koji su se time bavili ali pojava RepRap promijenila je stanje te se počela bazirati na nova područja i nove korisnike.

Tehnologije izrade slojeva kod profesionalnih 3D pisaa su različite, pa se tu nalaze profesionalni pisaa koji povezuju različite prahove na bazi gipsa pa sve do laserskog povezivanja metala. Kod običnih stolnih pisaa najviše se pojavljuju plastične mase sa FDM tehnologijom polaganja topljenog materijala. ABS i PLA su materijali koji se najviše koriste a danas postoje tehnike koje dodatno očvršćuju materijal poput lasera ili digitalnih projektora. Dimenzije proizvoda kod stolnih 3D printera su daleko skromnije od proizvoda dobivenih profesionalnim 3D pisaa, pa su tako dimenzije stolnih pisaa najčešće 200x200x200mm. Na tržištu se mogu nabaviti stolni uređaji koji rade ispis s četiri boje ili četiri vrste materijala. Isto tako činjenica je da printer koji tiska s dva materijala može olakšati rad i ukloniti najveći nedostatak stolnih uređaja, a to je ispis takozvanih istaka na modelu koji se pojave na nekoj određenoj visini na proizvodu. Takvi problemi se također učinkovito rješavaju korištenjem praha umjesto tvrde materije jer se nefiksirani slojevi praha koriste kao potpora istakama na modelu. Iako je 3D tisak ima već trideset godina svoju povijest, pojava RepRap ideje i novog impulsa koji je taj projekt obuhvaća razvojem stolnih uređaja za razne slojeve kupaca dovelo je do početka razvoja u području digitalne proizvodnje [6].

2.3. Brza izrada prototipova

Industrijski 3D pisaa postoje još od ranih 1980-ih, te su se kasnije počeli opsežno koristiti za brze istraživačke svrhe. U svom početku izrada prototipova se odvijala uz pomoć stereolitografije. To je tehnika u kojoj se fotopolimeri stvrdnjavaju u slojevima pod utjecajem ultraljubičaste zrake svjetlosti. Kod tehnike izrade prototipa, radi se uglavnom o većim strojevima koji koriste metal u prahu, pijesak, plastiku ili papir a koriste se za brzu izradu prototipova za industrijske a ponekad i sveučilišne potrebe. Definiranje brze izrade prototipova bi bila proizvodnja čvrstih oblika uz pomoć trodimenzionalnog računalnog dizajna (CAD) koji koristi automatiziranu aditivnu proizvodnju. Razlozi brze izrade prototipa su zbog povećanja učinkovite komunikacije u razvoju inženjeringa, smanjenje vremenskog razvoja i vrijeme isporuke, povećani broj različitih oblika proizvoda, povećanje složenosti proizvoda, smanjenje skupih pogrešaka, smanjenje održavanja tehničkih promjena i sl. Produljenje života prototipa se može učiniti dodavanjem nekih dodatnih elemenata u ranoj fazi dizajniranja objekta.

Metodologija brze izrade 3D prototipa se može podijeliti u četiri koraka. Prva faza bi bila izrada modela u CAD programu koja se nakon toga prevodi u STL format. Usput se popravljaju i razlučivosti kako bi se smanjile stepenice između slojeva. Nakon toga 3D printer obrađuje STL datoteku stvarajući prvi deblji sloj modela. Poslije toga se debljina sloja smanjuje kako proces ide dalje, pa sve do završetka. U zadnjoj fazi se radi proces doradivanja na objektu raznim metodama, ovisno o tehnici tiska, od uklanjanja prašine do daljnjeg brušenja i uklanjanja nepoželjnih dijelova, ovisno o korištenoj tehnici. (Slika 2.)



Slika 2. Ciklus brze izrade prototipa

Izvor: <http://infoteh.etf.unssa.rs.ba/zbornik/2013/radovi/STS/STS-14.pdf>

Izrada prototipova brzom tehnikom 3D tiska je relativno jednostavan i brz proces. Pošto se takve odlike na današnjem tržištu traže, ova tehnika izrade prototipa je idealan način za proizvodnju istih. Brza izrada prototipova je automatizirana izrada modela koja se temelji na formiranju slobodnih oblika. Danas je ova tehnika toliko porasla da se koristi i kod proizvodnje maloserijskih dijelova proizvoda. Brzina i jednostavnost ove tehnologije je brzo prepoznata, pa je vrlo brzo dobila mjesto u širokim spektrima proizvodnje [7] [8]. Važna prednost slojevite proizvodnje izrade prototipa u odnosu na konvencionalnu je u tome što se kompleksniji oblici proizvoda mogu lakše izraditi nego kod konvencionalne metode uporabom alata. Međutim svaki proces izgradnje ima svoje procesne parametre (smjer izrade, debljina sloja, raspor između susjednih slojeva,

temperatura itd.) koji utječu na strukturu prototipa. Kad se govori o nedostacima proizvodnje 3D prototipa FDM tehnologijom onda se misli na nehomogenost strukture koja proizlazi iz osnovnog principa te tehnike. Čvrstoća i snaga prototipa izrađenih 3D tiskom pate od anizotropije i čvrstoće prijanjanja između slojeva jer su ti slojevi puno slabiji u odnosu na kontinuirani vez [9].

Kao što je prethodno navedeno, brza izrada prototipova se koristi za stvaranje fizičkih maketa uz pomoć trodimenzionalne tehnike, CAD (Computer Aided Design). Tehnologija brze izrade prototipa radi direktno iz digitalnog prostornog prikaza modela nekog objekta ili modela napravljenog u CAD-u, stvara njegovu fizičku reprezentaciju te funkcionalan i relativno kompleksan radni prototip. Standardnim CAD programima se kreira virtualna geometrija tijela, koja se onda šalje na perifernu jedinicu koja izgrađuje prototip dodavanjem sloja na sloj. Modeli koji se kreiraju pri brznoj izradi prototipova u 3D tehnici baziraju se na digitalno rezanim slojevima modela koji se u realnom fizičkom prostoru nanose sloj na sloj stvarajući gotov objekt. Na ovakav način se omogućava stvaranje kompleksnih modela sa tankim stjenkama te kompliciranom unutrašnjom strukturom koju je gotovo nemoguće izraditi sa tradicionalnom supstraktivnom metodom [10]. Prema tome treba reći da brza izrada prototipova pruža fleksibilnost i smanjuje cijenu ispitivanja u metodi pokušaja i pogreške tijekom proizvodnje. Fizički modeli napravljeni kao prototipovi dolaze u ruke suradnicima, trgovcima i klijentima te se lakše stvaraju nove ideje, nego što je slučaj kod računalnih modela koji su ograničeni. Brzi prototipovi daju jasne i detaljne povratne informacije bitne za uspjeh proizvoda. Širok raspon materijala za 3D tisak može proizvesti prototipove za vrlo precizno testiranje ili realne modele koji izgledaju kao gotovi proizvodi. Fotopolimeri, termoplastike, metali i drugi kompozitni materijali pružaju cijeli spektar svojstava materijala koji mogu izdržati sekundarne procese kao što su brtvljenje, poliranje, slikanje, metalizacija ili galvanizacija. Brza izrada prototipa je krenula sa tehnikom stereolitografije a proširila se i na druge tehnike o kojima će detaljnije biti spomenuto u nastavku [11].

2.3.1. STL datoteka

STL datoteka je format koji koriste različiti softveri u izradi prototipova, pa tako i u digitalnoj proizvodnji za generiranje informacija koji se koriste za izgradnju 3D modela.

STL datoteka je standardni format koji se koristi za prijenos podataka pri izradi brzih prototipova. Sa ovom datotekom se aproksimira površina proizvoda ili skeniranih modela sa trokutićima (triangles). Danas mogu izraditi STL datoteku skoro svi CAD sistemi. Ovakav proces je korisnicima jednostavan kao i samo selektiranje datoteka [12]. STL datoteka nema boje, pa je 2009. uvedena AMF datoteka (Additive Manufacturing File). AMF uz STL datoteku postaje standard za AM (Additive Manufacturing) postupke pa s time čini osnovu za rezanje u slojeve, na čemu se temelji aditivna proizvodnja. AMF datoteka predstavlja jedan ili više objekata koji su raspoređeni u vektore, a svaki je objekt opisan kao skupina ne preklapljenih volumena koji su opisani kao mreža trokuta koja povezuje tu skupinu točaka koje se mogu podijeliti između volumena. Isto tako AMF datoteka može opisati boju pojedinog volumena i boju svakog trokuta u mreži, te njihov materijal. Kod nekih postupaka, primjerice (SLA, FDM, PolyJet) je potrebno izgraditi potpurnu strukturu koja bi trebala slijediti obod donjeg sloja prototipa, uključujući i njegove kutove. Izgradnjom potporne strukture na dnu prototipa, sprječava se odstupanje tvorevine tijekom izrade slojeva na prototipu. Nakon računalne faze pripreme, podešavaju se i ostali parametri stroja (debljina sloja, brzina, snaga, temperatura i dr.) nakon čega slijedi izrada gotovog prototipa [13].

2.4. Sistem rada trodimenzionalnog pisača

Svi uređaji koji koriste 3D tehniku tiska rade uglavnom na istom principu a to je princip aditivne tehnologije. To je tehnologija dodavanja sloja na sloj pri čemu stvara strukturu predmeta. Trodimenzionalni tisak se odnosi na grupu tehnologija koje za stvaranje objekta koriste procese bazirane uglavnom na aditivnoj tehnici premda su se i druge tehnike razvile. Trodimenzionalni pisači se izrađuju od različitih materijala, različitih veličina i kvalitete. Stolni pisači su većinom jednostavnije građe jednostavnog oblika koji je u kombinaciji metala, plastike a ponekad i drveta. Profesionalni pisači su pretežito većih dimenzija i koriste skuplje sastavne dijelove koji su izdržljiviji i koji podnose velika opterećenja i veću temperaturu tiska. Naravno sve ovisi i o kojoj tehnici 3D tiska se radi pa se veličina i struktura stroja prilagođavaju tehnici izrade. Aditivna izrada zasniva se na stvaranju objekta na način da se dodaje upravo onoliko sirovine

koliko je potrebno za neki gotov proizvod. Sirovina se može dodavati na različite načine, primjerice slaganjem u vrlo tankim slojevima međusobno povezanim vezivnim sredstvom, laserom gdje se topi pri visokoj temperaturi, samostalnim zgrušavanjem nakon što sirovina u rastaljenom stanju napusti jako zagrijanu glavu i još drugi slični procesi. Ispravan postupak ovisi o tehnologiji 3D ispisa i one se međusobno razlikuju karakteristikama i namjenom zbog čega nisu usporedive. 3D printere je najjednostavnije podijeliti prema materijalu koji koriste, pa se danas mogu naći materijali poput plastike, papira, voska, metala, raznih kompozita, materijala koji oponašaju druge materijale i sl. Aditivni način dodavanja materijala ima razne prednosti u odnosu na drugačije tehnike poput CNC-a gdje se materijal oduzima dok se ne dođe do željenog objekta. Jedne od takvih prednosti su te da se nepotrebno ne troši sirovina, nema potrebe za skupim alatima koji se u opisanom destruktivnom procesu i sami troše, a sami proces izrade nerijetko zna biti i brži. 3D pisači predstavljaju mini sustave s numeričkim upravljanjem u tri ose (X,Y,Z). Na taj način ekstruder se pomiče u svim smjerovima po zadatku iz zadane datoteke te tako precizno ide po svim svojim putanjama. Bez obzira koju metodu 3D printer koristi, cijeli postupak je gotovo isti [14][15].

Znanstvenici su podijelili postupak tehnologije 3D tiska proizvoda u nekih osam faza. Prva faza je da proizvodnja 3D modela ide uz pomoć potpomognutog dizajna softvera. Softver može u tijeku stvaranja datoteke dati neki prijedlog ili dati mišljenje na osnovu nekih znanstvenih činjenica o korištenom materijalu. Na taj način se može predvidjeti ponašanje objekta u različitim uvjetima tiskanja. Danas postoji nekoliko besplatnih softvera za modeliranje kao što su Google SketchUp, Blender ili 3DCrafter. Druga faza se sastoji od transformacije u STL jezik (standardizirani jezik). Skice koje su u CAD formatu se pretvaraju u STL, što je već odavno pokrenuto radi SLA aparata koji su izumljeni već 1987. Treća faza bi bila kada kompjuter cijelu STL datoteku prebacuje u 3D pisac. Četvrta faza je postavljanje uređaja. Svaki novi uređaj ima svoje pretpostavke o tome kako ga koristiti za svaki novi tisak. To bi značilo dodavanje ili ponovno punjenje različitog materijala, ovisno kojeg će se koristiti. Peta faza bi bila stvaranje proizvoda, a ona se odvija uglavnom automatski. Debljina slojeva se vrti oko 0,1mm za svaki pojedinačno, a mogući su i deblji i tanji ovisno o potrebi. Ovisno o veličini stvari, stroja i zadatka, postupak može potrajati nekoliko sati pa sve do nekoliko dana. Uz sve to treba povremeno provjeravati dali se u procesu događaju neke greške. Sljedeći korak je uklanjanje objekta iz 3D uređaja, zatim dodatna obrada uklanjanja

preostalog praha, uranjanje u tekućinu da se otope neželjeni dijelovi ili fizičko uklanjanje nekih neželjenih dijelova, te se u konačnici dobiva gotov proizvod koji se spreman za upotrebu ili za dodatnu obradu [16].

2.5. Tehnike izrade proizvoda kod 3D pisača

3D tehnika tiska je po nekima pokrenula treću industrijsku revoluciju. Svakako treba se složiti s tim da je ona promijenila i da mijenja mnogo stvari od svoje pojave na tržištu. 3D tisak se već sada pokazao veoma korisnim u različitim industrijskim granama, a za očekivati je da će u sljedećim godinama biti još dostupniji i korišteniji. Ono što danas postupci 3D tiska nude su mogućnosti izrade vrlo kompliciranih oblika prototipa ili proizvoda u relativno kratkom vremenu na temelju računalnog 3D objekta koji se izrađuje. S ovakvom tehnikom proizvodnje moguće je dobiti gotove objekte koje klasičnim tehnikama proizvodnje nije moguće postići. Također, 3D ispis omogućuje izradu raznih dijelova koji spajanjem daju čitav sklop koji naizgled daje dojam kao da je iz jednog komada proizveden. 3D pisači omogućuju izradu proizvoda koje se koriste u svim sferama života, pa bi na takav način mogli utjecati i na proizvodnju. Premda je nerealno očekivati da će konkurirati masovnoj industrijskoj proizvodnji, realnije je za očekivati da im neće biti premca u području prilagođenih proizvoda.

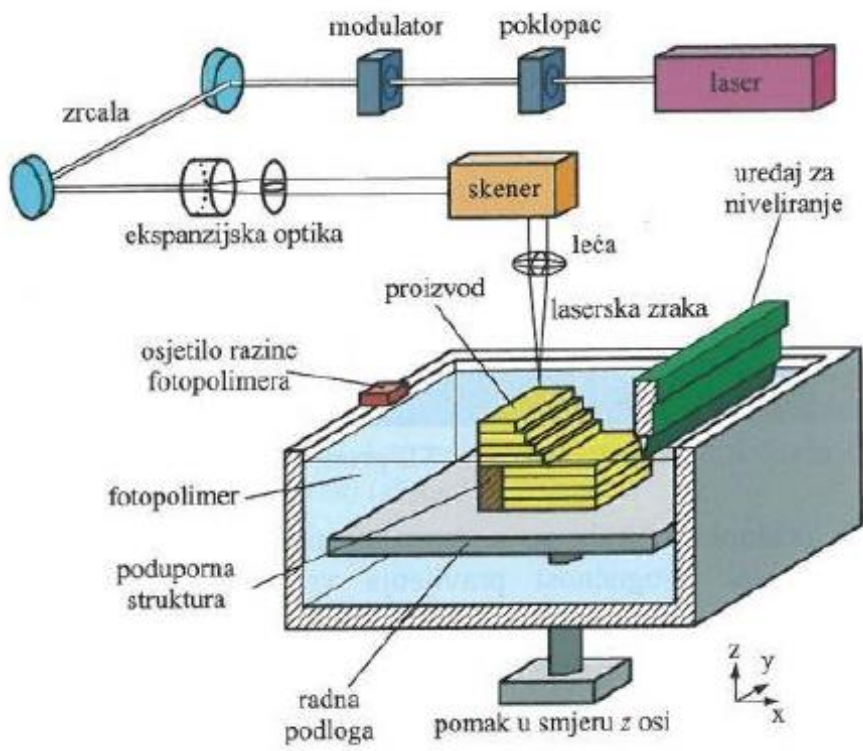
Prva tehnika na kojoj se bazirao početni oblik izrade prototipa sa 3D pisačem, bila je tehnika stereolitografije a kasnije su došle i ostale usporedno sa razvojem tehnologije [17].

2.5.1. Stereolitografija (SLA)

Stereolitografija je oblik tehnologije aditivne proizvodnje koju je patentirao Charles Hull 1986. iz 3D Systems kompanije, koja se koristi za izradu modela, prototipova i proizvodnih dijelova dodavanjem sloja na sloj. Strojevi koji koriste ovakvu tehnologiju sastoje se od četiri osnovna dijela: računala koje obrađuje podatke i kreira slojeve, kontrolnog računala koji nadzire proces, laserske jedinice i prostorijske u kojoj se modeliranje izrađuje.

Stvaranje slojeva odrađuje računalo koje čita CAD model i izrađuje slojeve koje kontrolno računalo radi pomoću laserske jedinice i hardvera printera koji stvara temeljne slojeve [18].

Postupak se odvija procesom fotopolimerizacije, kada se tekućina na bazi monomera uz pomoć utjecaja svjetla (UV-ultraljubičasto svjetlo) pretvara u tvrde polimere koji postaju čvrsto trodimenzionalno tijelo. To je laserski postupak jer svjetlo lasera reagira sa fotopolimernim smolama koje očvrstnu na vrlo precizan način kako bi se dobili precizni objekti. Fotopolimerna smola se drži u spremniku s pomičnom platformom, dok se laserska zraka usmjerava po osima X-Y preko površine smole prema STL podacima koji su već unijeti u stroj. Fotopolimerna smola otvrdnjava točno na mjestima kuda je prošla laserska zraka. Nakon završetka jednog sloja platforma unutar spremnika se spušta obično od 0,05mm do 0,15mm (na osi Z), polimer ponovno dolazi na površinski sloj te se izlaže laserskom svjetlu koji opet stvrdnjava osvijetljene dijelove. Tako se postupak nastavlja do formiranja cijelog proizvoda kad se platforma može izvaditi iz spremnika (Slika 3.). Za objekte koji imaju izbočene ili udubljene dijelove dodaju se potporni elementi koji se na završetku ručno skidaju. Potporni elementi služe radi potpunije geometrije, točnog držanja 2D presjeka bez pomicanja, zbog sprječavanja savijanja i propadanja modela radi sile teže, te zbog vezivanja za platformu. Nakon tiska slijedi doradni proces uklanjanja smole sa dobivenog objekta uranjanjem u kemijsku smjesu. Nakon toga slijedi sušenje objekta koje se odvija u stroju koji nalikuje na pećnicu u kojoj se smola dodatno eksponira intenzivnoj UV svjetlosti sve dok ne dobije čvrstu strukturu. Količina vremena za stvaranje objekta ovisi o veličini predmeta i 3D printerima. Manji predmeti se ispisuju u manjim strojevima, stoga proces traje od šest do dvanaest sati, dok ispis velikih objekata koji mogu ići preko metra može potrajati danima. Zbog laserskog osvjetljavanja i izvrsne obrade površine, stereolitografija se smatra jednom od najpreciznijih postupaka 3D ispisa [19][20].



Slika 3. Shematski prikaz stereolitografije

Izvor: <https://repozitorij.sfsb.hr/islandora/object/sfsb%3A60/datastream/PDF/view>

Još jedna metoda ispisa u stereolitografiji je metoda ispisa „odozdo prema gore“.

Komora sa tekućim fotopolimerom se nalazi u komori koja je sa dna transparentna, te se kroz dno osvjetljava sa ultraljubičastim laserom. Platforma na kojoj se gradi model se spušta na dno komore koja je ispunjena fotopolimernom tekućinom, osvjetljava se UV laserom koji otvrdnjava osvjetljena područja i podiže za u vis za debljinu jednog tiskanog sloja. Kad se platforma izdiže za jedan sloj, onda iza nje ostaje fotopolimer koji nije osvjetljen i koji teče prema rubovima djelomično osvjetljenog polimera, dok se stvrdnuti materijal izdiže iznad i nastavlja graditi. Prednost ovakvog načina gradnje je u tome što volumen objekta koji se izrađuje može biti puno veći od same komore u kojoj se gradi. Jedino bitno u takvom procesu je da dno komore bude konstantno ispunjeno sa fotopolimernom tekućinom da bi se proces mogao kontinuirano odvijati[21].

Prednosti stereolitografije

- visoka rezolucija
- preciznost izrade
- brzina izrade modela
- nema geometrijskih ograničenja oblika
- moguća izrada dvobojnih prototipova
- potpuna automatiziranost procesa [22]

Nedostatci stereolitografije

- zahtjevna analiza
- ograničen broj upotrebljivih materijala (polimer)
- slabija mehanička svojstva prototipa
- tehnika zahtjeva uporabu potporanja koji se moraju ukloniti
- očvršćivanje fotopolimera može uzrokovati naprezanja i pucanja
- fotopolimer je otrovan u tekućem stanju
- dodatna obrada dobivenog objekta
- relativno skupa metoda izrade objekata [22]

Stereolitografija je idealan način za proizvodnju prototipa, jer stvara vrlo precizne, čvrste i konzistentne prototipe. Međutim stereolitografija spada u najskuplje metode 3D tiska. Najskuplji strojevi koštaju i do 250,000\$, premda su se na tržištu relativno kasno pojavili i jeftini manji 3D stereolitografski strojevi poput Form 2 3D stroja iz 2015. godine ili Nobel 1.0. koji koštaju manje od 3,500\$. Ovu tehniku primjenjuju mnoge industrije, od medicine (biomedicine) za izradu modela implantata, autoindustrije za izradu modela dijelova, zrakoplovne industrije, industrije elektroničke opreme i drugih gdje je potrebna proizvodnja prototipa (Slika 4.) [20][21].



Slika 4. Stereolitografski izrađeni prototipovi

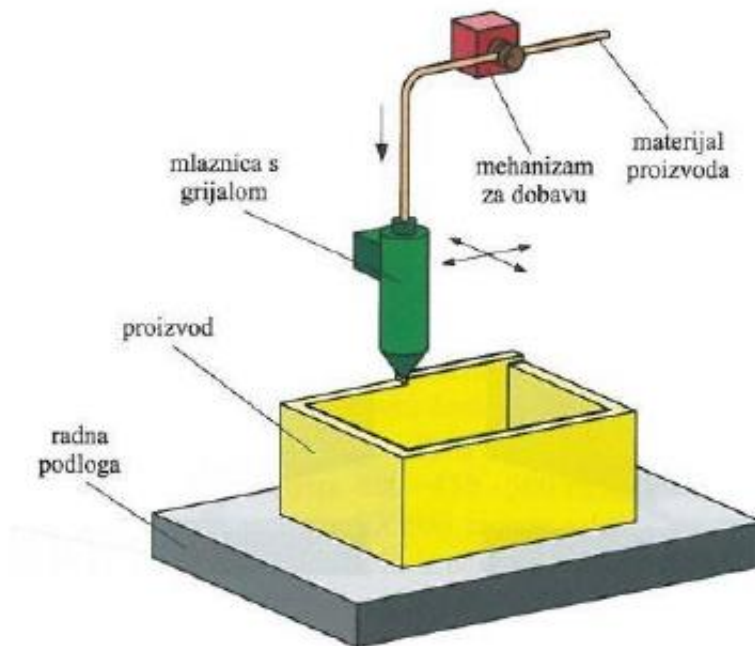
*Izvor: <http://redrockspd.com/stereolithography-printers/>,
<http://www.asminternational.org/emails/enevs/april232008/enevs04232008.html>,
<https://www.youtube.com/watch?v=y5zsWBNIUgw>*

2.5.2. Izrada modela nanošenjem topljenog materijala (FDM/FFF)

Tehnika aditivne proizvodnje prototipa ili 3D tisak, postala je popularna već početkom 1980. zbog brze i prilagodljive izrade prototipa. Metoda izrađivanja prototipa koja najviše koristi tehniku aditivne proizvodnje je upravo FDM (modeliranje topljenim materijalom) metoda. FDM je tehnologija koju je 1980. izumio Scott Trump, suosnivač i predsjednik vodeće kompanije za izradu 3D printera, Stratasys Ltd. Ova kompanija je 1990. komercijalizirala FDM tehnologiju. Tvrtka MakerBot iz Brookyna koja je sada u vlasništvu Stratasysa, osnovala je gotovo identičnu tehnologiju poznatiju kao modeliranje topljenim filamentom (Fused Filament Fabrication). Nazvali su je takvom samo iz razloga što je FDM naziv bio zaštićen i licenciran, a FFF su izmislili članovi RepRap projekta. Ova tehnika je bila znana i po nazivu PJP (Plastic Jet Printing), tiskanje sa plastičnim mlazom [23].

Kao što je rečeno ova tehnologija spada u aditivne procese izrade objekata, tehnikom spajanja sloj na sloj. Prije početka stvaranja proizvoda, objekt mora biti izrađen u CAD (kompjutorski potpomognut dizajn) datoteci pomoću računala. CAD datoteka nakon toga mora biti pretvorena u format koji 3D stroj razumije, a to je STL format. FDM pisači koriste dvije vrste materijala, jedan je materijal za modeliranje koji služi za izradu gotovog objekta a drugi materijal je onaj koji djeluje kao skela i potporanj za

objekt što ga nosi. Isto tako 3D stroj može dijeliti više materijala kako bi se postigli različiti ciljevi, primjerice da se jedan materijal koristi za izgradnju objekta, a drugi materijal kao potporanj, što je prethodno navedeno, dok se isto tako može koristiti više boja termoplastike za isti model. FDM metoda 3D tiska se zasniva na izradi objekta pomoću čvrstih materijala na principu ekstruzije kroz mlaznicu. Tijekom tiska ti materijali imaju oblik plastične žice ili niti koji su omotani na koloturu u obliku spirale i koji pune mlaznicu za ekstrudiranje. Niti ili filamenti se konstantno dobivaju kroz mlaznicu malog promjera. Mlaznica je zagrijana, te se dobavljeni materijal topi u ekstruderu koji izbacuje slojeve na bazu, platformu ili stol za ispisivanje (Slika5.). Mlaznice mogu pokrenuti i prekinuti dotok mase u bilo kojem trenutku. One koriste servo motore koji služe za pomicanje glave ekstrudera. Mlaznica i baza se kontroliraju putem računala, sa CAD programskim paketom koji šalje dimenzije objekta u X, Y i Z koordinati. Kod tipičnog FDM sistema ekstruder sa mlaznicom ide preko platforme i kreće se horizontalno i vertikalno [24].



Slika 5. Shematski prikaz modeliranja topljenim materijalom

Izvor: <https://repositorij.sfsb.hr/islandora/object/sfsb%3A60/datastream/PDF/view>

Tijekom nanošenja materijala mlaznica se giba u X i Y ravnini ravnomjerno istiskujući materijal na platformu, koji se odmah hladi i stvrdnjava. Nakon završetka prvog sloja, platforma vrši pomak po osi Z te kreće nanošenje idućeg sloja povrh prethodnog. To kretanje platforme je negdje oko 0,25mm koliko je širina nanesenog sloja, te pravi mjesta za sljedeći sloj. FDM omogućava izradu funkcionalnih dijelova materijala za daljnja ispitivanja koji imaju isti ili približno isti sastav. Vrijeme tiska FDM tehnikom ovisi normalno o veličini objekta koji se izrađuje. Usporedbom s drugim tehnikama 3D tiska kao što je stereolitografija (SLA) ili selektivno lasersko srastanje (SLS), FDM tehnologija je relativno spor proces. Nakon izrađenog objekta može biti potreban proces uklanjanja nosivih materijala namakanjem u vodu ili deterdžent. Ako se radi o termoplastičnim objektima onda se on može brusiti, mljeti, lakirati ili oblagati kako bi poboljšali svoju funkciju i izgled [18][24].

Materijal koji se najčešće koriste u FDM tehnologiji je ABS (Akrilonitil Butadien Stiril) plastika kojom je moguće postići gotovo identičnu čvrstoću u odnosu na gotov proizvod koji je izrađen na klasičan način. Materijali koji se također često pojavljuju kod FDM tehnologije su razne vrste polimera ili voskova. Pored ove dvije najčešće skupine koriste se još materijali od polikarbonata, poliamida, stiropora, lignina i gume sa različitim čvrstoćama i temperaturnim svojstvima. Na neke materijale čak i boja može utjecati na njihovu čvrstoću nakon ispisa. Danas su dostupni i zanimljivi materijali na bazi ABS ili PLA koji u sebi sadrže čestice nekog drugog predmeta i koji praktički imitiraju premete, poput drveta, željeza, kamena, karbona, bronce i sličnih predmeta [23]. Glavni predstavnik 3D pisaa na bazi FDM postupka je RepRap tehnologija. To su ustvari pisaa koji su izrađeni isključivo da bi se smanjila cijena 3D tiska. RepRap uređaji su većinom uređaji kućne uporabe, ili stolni pisaa koji su cijenom dostupni široj potrošačkoj skupini. Prema tome FDM metoda je najkorištenija i najzastupljenija tehnologija danas, upravo zbog toga što je i najjeftinija tehnika tiska. Trošak 3D printera sa FDM metodom se 2010. dramatično smanjio, primjerice strojevi koji su koštali 20000\$ danas imaju cijenu manju od 1000\$. Nekoliko kompanija i nekoliko pojedinačnih entuzijasta se udružilo 2013. te su pokrenuli liniju jeftinih 3D pisaa čija cijena ide ispod 500\$. Namjera im je bila napraviti 3D strojeve za opću uporabu.

Takvi uređaji mogu tiskati sve što može stati proći kroz mlaznicu, stoga je moguće ispisivati stvari od plastike, kemijskih reaktanata, silikona, pa sve do čokolada tijesta i sl. FDM metoda je stoga danas sveprisutna na današnje tržištu 3D tehnologije tiska [23].

Prednosti FDM tehnologije

- najjeftinija i najpristupačnija
- manja potrošnja energije
- ne koristi se laserski snop
- ne zahtjeva posebnu ventilaciju i hlađenje
- jednostavna primjena
- brza izrada pojedinačnih uzoraka
- pristupačna cijena uređaja i niski troškovi održavanja
- office friendly
- sposobnost izrade više prototipova istovremeno
- nema deformacije prototipova
- male dimenzije uređaja
- materijali nemaju toksične supstance [22]

Nedostatci FDM tehnologije

- porozna struktura
- funkcionalnost prototipova ograničena je izborom materijala
- nedovoljno velik broj dostupnih materijala
- neophodna je uporaba potpornja
- uočljive su linije između slojeva
- relativno velika debljina slojeva 0.1-0.3mm
- niska čvrstoća na naprezanju u smjeru Z osi
- dugo vrijeme ispisa za veće serije [22]

FDM tehnologija nudi široku paletu proizvoda od termoplastike sa jedinstvenom karakteristikom što ga čini idealnim za mnoge industrije (Slika 6.). Primjerice medicinska industrija često koristi FDM materijale koji su biokompatibilni i

transparentni. FDM materijale koriste industrije teških strojeva, transportna industrija, a pogoduju i za aeronautičke primjene [25].



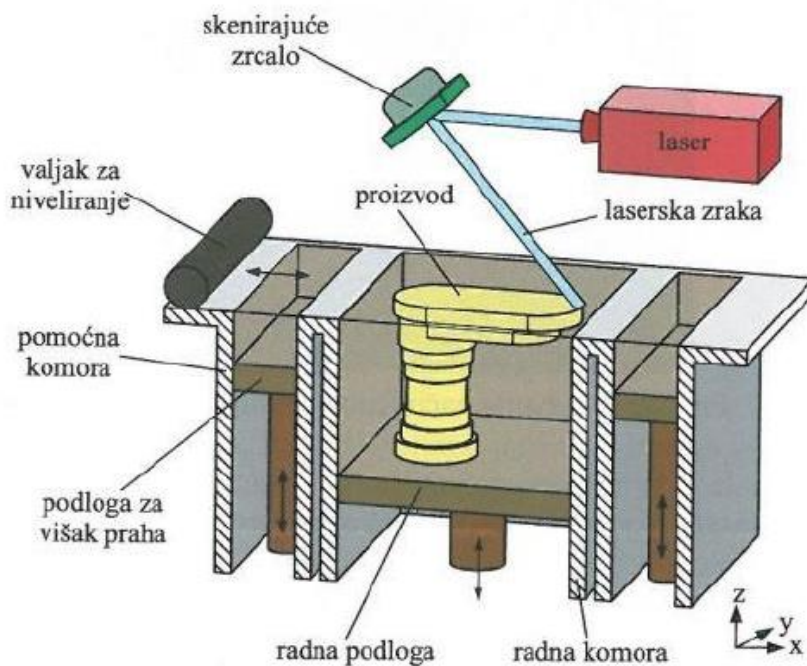
Slika 6. Prototip i gotovi proizvodi izrađeni FDM tehnologijom

Izvor: <http://www.javelin-tech.com/3d-printer/industry/commercial-products/>,
<http://www.stratasys.com/materials/fdm/nylon#content-slider-1>,

2.5.3. Selektivno lasersko srastanje (SLS)

Selektivno lasersko srastanje (SLS) je proces 3D tiska koji je patentiran 1987. u Teksasu od strane Carla Deckarda studenta sa sveučilišta, i njegovog profesora strojarstva Joesa Beamana. Deckard i Beaman su bili uključeni u osnivanje i pokretanje tvrtke DTM 1989., koja je osnovana za projektiranje i izgradnju SLS strojeva. Ova tvrtka je 2001. prodana 3D Systems kompaniji, koja je ranije već razvila svoju vlastitu metodu 3D tiska, poznatija kao stereoitografija. Kad su Deckard i Beaman patentirali ovu metodu tiska, još je sve to daleko bilo od prvog korištenja srastanja, procesa stvaranja 3D predmeta iz praška koristeći atomsku difuziju [26]. Kao i sve ostale metode 3D tiska, tako i SLS koristi CAD datoteku koja se pretvara u STL format. Selektivno lasersko srastanje ili lasersko taljenje je 3D postupak sa praškastim materijalima. SLS metoda se služi snažnim laserima koji su najčešće na bazi karbondioksida i koji pretvaraju sitne čestice praha u 3D objekt. Prah može biti od plastike, metala, čelika, titana, keramike, stakla, smjesa legura, raznih kompozita ili najlona koji se koristi kao sloj na površini platforme u SLS stroju. Komora za izradu proizvoda je potpuno zatvorena jer je tijekom postupka potrebno održavati preciznu temperaturu,

koja ovisi o točki taljenja praškastog materijala koji se koristi. Nakon što je faza računalne primjene završila slijedi proces izrade proizvoda (Slika7.)



Slika 7. Princip izrade objekta SLS metodom

Izvor: <https://repositorij.sfsb.hr/islandora/object/sfsb%3A60/datastream/PDF/view>

Zbog gustoće koju je potrebno dobiti u gotovom proizvodu obično se koristi pulsirajući laser koji ima vršnu snagu, koja je važnija od duljine trajanja izloženosti laseru. Pulsirajuća laserska zraka prelazi preko ležišta gusto zbijenog praha u skladu sa podacima unesenim iz stroja po osima X-Y. Prolaskom lasera i dodirrom sa površinom, materijal (prašak) stvrdnjuje, odnosno povećava se adhezija između čestica praha, pa se prah grupira u veću krutinu točno određenog oblika. Kako se slojevi izrađuju, tako se i platforma spušta, s tim da valjak izravnava prah preko površine platforme prije nanošenja sljedećeg sloja kako bi se sljedeći sloj mogao spojiti sa prethodnim [27]. Nakon što se formira početni sloj, debljina ostalih slojeva obično bude manja od 0,1mm. Kad predmet bude u potpunosti formiran ostavi se jedno vrijeme u stroju da se ohladi, nakon čega se vadi van sa platformom na kojoj se nalazi izrađen predmet sa ostatkom praška koji se uklanja da bi se dobio čist proizvod. SLS metoda za razliku od FDM i SLA metode, ne zahtijeva posebne strukture i potporne materijale za izgradnju premeta, jer je predmet u cijelom procesu tiska okružen sa prahom koji koristi kao

potporna konstrukcija do kraja procesa. Još jedna pozitivna stvar ove metode je uvijek ispunjena komora sa materijalom do kraja, što omogućuje izradu više premeta iz jedne količine praška te samim time snižava i cijenu rada. Jedna od ključnih prednosti SLS postupka jest u tome što ležište praha tijekom postupka služi kao potporni element za izbočene i udubljene dijelove, pa je s ovakvim postupkom moguće proizvesti složene produkte koji ne bi bili izvedivi niti jednim drugim postupkom. Veliki nedostatak SLS metode je taj što ne može proizvoditi potpuno zatvorene predmete, iz razloga što se zaostali materijal na posljetku ne može izbaciti. Pojedini SLS strojevi koriste jednokomponentne prahove, ali većina SLS strojeva koristi dvokomponentne. Kod Jednokomponentnih prahova se topi samo površina čestica, pa te spojene čestice ne budu dovoljno otporne. Usporedbom sa drugim 3D metodama tiska, SLS metoda može ispisivati relativno puno materijala koji se nude na tržištu. Stoga u zavisnosti o materijalu, fizički proces može biti potpuno taljenje, djelomično taljenje, ili u tekućoj fazi srastanjem. Isto tako može se postići 100%-na gustoća ovisno o materijalu, pa je SLS metoda u rangu sa konvencionalnim načinom proizvodnje.

SLS tehnologija je dobra za stvaranje prototipa i gotovih proizvoda, te je u širokoj uporabi diljem svijeta zbog svoje sposobnosti da lako izradi vrlo složene geometrijske podatke iz CAD datoteke. Ova 3D metoda tiska se neočekivano proširila i na primjenu u umjetnosti [28]. SLS metoda se pokazala posebno korisnom za industrije koje trebaju samo malu količinu premeta napravljenih sa vrlo kvalitetnim materijalom. Čisti primjer toga je svemirska industrija, u kojoj se SLS koristi za proizvodnju prototipa dijelova za avione. Konvencionalna proizvodnja takvih dijelova nije baš isplativa, s obzirom da se avioni ne proizvode tako često. Kalupi bi bili preskupi, pa bi dugo vremena stajali neiskorišteni i trebali bi se čuvati od oštećenja. Koristeći SLS metodu, kompanije mogu stvoriti prototipe koji su pohranjeni digitalno kao STL format koji se mogu redizajnirati ili ponovno upotrijebiti. Zbog toga SLS strojevi mogu tiskati razne predmete u rasponu od vrlo kvalitetnih materijala, fleksibilne plastike pa sve do keramike za prehrambenu uporabu. S ovom metodom se mogu izrađivati prilagođeni proizvodi, poput slušnih pomagala, stomatoloških naprava i protetike. 3D printeri za kućnu uporabu ili stolni pisači su većinom printeri koji koriste FDM tehnologiju tiska. Što se tiče SLS tehnologije ona je jako malo zastupljena kao metoda 3D tiska koja se koristi za kućnu uporabu, što zbog puno većeg ulaganja, što zbog potencijalno opasnog rukovanja sa laserskom tehnologijom koja se lako pregrijava, zbog velikog utroška

energije ili zbog problema sa održavanjem konstantne temperature u sve tri glavne faze. Međutim ipak postoje i izumitelji koji rade na svojim vlastitim verzijama SLS printera. Među takvima je mladi student, inženjer Andreas Bastian koji je nedavno izradio jeftine SLS printere koji tiskaju predmete od ugljika i voska. Danas postoje stranice na webu koje sadrže točne upute kako izgraditi samostalno SLS stroj, stoga za očekivati je sve veći broj SLS printera u domaćinstvima [26].

Prednosti SLS tehnologije

- prah se koristi kao materijal i potporni element
- neiskorišteni prah se upotrebljava za sljedeće proizvode
- proizvodi posjeduju visoku čvrstoću i krutost
- dobra kemijska otpornost
- SLS postupak je brži i ima bolja mehanička svojstva od SLA
- omogućuje razne doradne procese
- bio-kompatibilna tehnika tiska
- široka paleta materijala za tisak
- nadomješta injekcijsko lijevanje plastike
- najbrža izrada složenih dijelova i funkcionalnih prototipova [29]

Nedostatci SLS tehnologije

- tiskani dijelovi su podložni poroznosti
- potencijalna opasnost od pregrijavanja izrazito snažnog lasera
- određeni materijali ispuštaju otrovne plinove prilikom tiskanja [29]



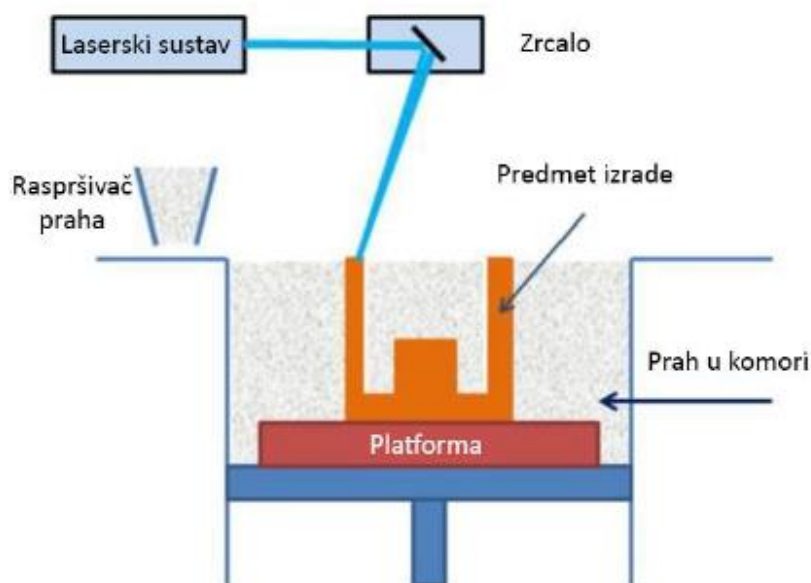
Slika 8. Prototipovi i proizvod izrađeni SLS metodom

Izvor:<http://www.hometone.com/chrisco-marvelous-3d-printed-chair-bringing-futuristic-realism-alive.html>, <http://www.metflo.com/prototyping/>,
<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/laser+sintering>

2.5.4. Selektivno lasersko taljenje (SLM)

Selektivno lasersko taljenje također spada u skupinu aditivne izrade predmeta. SLM tehnologija je započela sa svojim radom 1995. na Fraunhofer institutu u Achenu. Poznata još pod imenom ILT SLM, kao njemački istraživački projekt. Osnivači ovog projekta su dr. Wilhelm Meiners and dr. Konrad .Vrlo brzo nakon pokretanja SLM projekta dolazi do pokušaja suradnje sa tvrtkom u Paderbornu koja se bavi stereolitografijom, a pokretači toga su bili dr. Dieter Schwarze i dr. Matthias Fockele. Potpuna suradnja se ostvarila 2000. kada se tvrtka ILT SLM, ali pod drugim imenom tada (SLM solutions GmbH) partnerski povezala sa Mainersovom i Konradovom tvrtkom pod imenom F&S GmbH. Cilj selektivnog laserskog taljenja je da se dobiju kvalitetni proizvodi visoke gustoće, na način da se metalni prah potpuno tali i stvara čvrstu strukturu. Upravo ta činjenica u potpunom taljenju je osnovna razlika između selektivnog laserskog srastanja i selektivnog laserskog taljenja. Proces 3D tiska SLM metodom kreće sa standardnim procesom u CAD datoteci gdje počinje brojčano rezanje 3D CAD modela kao niz konačnih slojeva stvarajući 2D sliku. Obično su debljine od 20 do 100 mikrometara. Većina SLM strojeva ima sposobnost gradnje proizvoda dimenzija od 250mm u X i Y osi do 350mm, iako veći strojevi mogu proizvoditi u veličini i do 500mm u sva tri

smjera [30]. Nakon toga CAD datoteka šalje model u STL format koji dodjeljuje različite parametre proizvodnom postupku. Laser prati upute svakog dijela odrezanog sloja modela iz računala te s tim kreće stvarati početne konture. Materijal koji se koristi je sitno usitnjeni metalni prah koji je ravnomjerno raspoređen na površini na kojoj se tiska proizvod i koji se kreće u smjeru osi Z. Pod utjecajem vrlo snažnog snopa svjetlosti lasera od iterbijuma, otapa se metalni prah na mjestima kuda je laser prošao te se stvaraju čvrste metalne strukture. Laserska zraka je usmjerena u X i Y pravcima sa dva jaka ogledala visoke frekvencijske snage. Proces se odvija u komori u kojoj se nalazi strogo kontrolirani inertni plin od aragona ili dušika uz mali postotak kisika (Slika 9.). Nakon što laserska zraka otopi metalni prah, taj otopljeni dio se pretvara u čvrste i vrlo precizne strukture koje stvaraju slojeve. Svakim novim slojem platforma za gradnju modela se spušta za jednu razinu, nanosi se novi sloj metalnog praha, pa se takav postupak ponavlja do formiranja gotovog predmeta [31].



Slika 8. Princip rada SLM tehnologije

Izvor: <https://repozitorij.sfsb.hr/islandora/object/sfsb%3A60/datastream/PDF/view>

Čvrsta rešetkasta struktura u sloju materijala dobiva se samo sa SLM metodom u okviru ostalih 3D postupaka. Strukture proizvoda su čvrste a ujedno i lagane zbog dobre optimizacije materijala u proizvodnji. Komponente izrađenog predmeta pomoću SLM tehnologiju su apsolutno nepropusne i izrazito kvalitetne, pa su u rangu kvalitete sa uobičajenim proizvodnim postupkom izrade metala. SLM metoda je najbrži i najekonomičniji postupak izrade brzih prototipova od metala [32].

Metali koji se najviše koriste za SLM proces izrade modela su nehrđajući čelik, alatni čelik, kolbat-krom, titan i aluminij. Potrošnja materijala je vrlo racionalna i ništa se ne baca jer se neiskorišteni prah upotrebljava za sljedeće procese izrade. SLM je učinkovit proces za proizvodnju inženjerskih komponenti i prototipova. Ulaskom ovakve tehnologije na tržište, otvorio se potpuno novi i drugačiji pristup proizvodnji metalnih prototipova i gotovih proizvoda. Za razliku od konvencionalnih metoda SLM metoda osigurava slobodu dizajniranja prototipova sa puno manjim troškovima izrade. SLM metoda potpunim taljenjem omogućuje izradu krutih i gustih metalnih dijelova iz samo jednog postupka, pa ne zahtijeva korištenje veziva i naknadnu obradu kao što je slučaj kod SLS tehnike. Selektivno lasersko taljenje se upotrebljava u različitim industrijskim sektorima kao što su zrakoplovna, industrija nafte i plina, medicini i sl. Upotrebljava se upravo iz razloga što je u mogućnosti proizvesti geometrijski kompleksne predmete uz jednostavan postupak izrade, te su odlični izmjenjivači topline. U medicini se koriste za pojedine implementacije, dok se u zrakoplovnoj industriji koriste kao čvrsti i izdržljivi materijali koji ujedno smanjuju buku motora [31]. Konvencionalne tehnike proizvodnje dijelova od metala imaju velike troškove pripreme, dok SLM tehnologija ima jeftiniju pripremu ali veći trošak proizvodnje. Stoga je SLM metoda idealna samo za proizvodnju specifičnih dijelova u zrakoplovnoj i medicinskoj industriji. NASA je radila eksperimente sa SLM tehnologijom i izradom dijelova za raketni pogon od legura nikla. Pokazalo se da je dosta teško napraviti mehanički i kemijski zahtjevne materijale koji se prave od praha metala. Međutim eksperimenti su se nastavili i postojeći problemi se nastoje ukloniti jer SLM tehnologija ne zahtjeva zavare koji su slaba točka kod metala, pogotovo u svemirskoj industriji [30].

Prednosti SLM tehnologije

- visoka preciznost izrade
- čvrsti i izdržljivi metalni dijelovi
- omogućuju izradu kompleksnih predmeta
- idealan proces proizvodnje u malim količinama
- širok raspon izbora materijala od metala
- optimalna potrošnja materijala, smanjenje troškova
- mogućnost sterilizacije
- poboljšani razvojni ciklus proizvodnje
- izrazito funkcionalna tehnika u vidu proizvodnje[31]

Nedostatci SLM tehnologije

- spor i skup proces izrade objekta
- gotovi proizvodi mogu biti porozni i imati hrapavu površinu [33]



Slika 9. Proizvodi izrađeni SLM tehnologijom

Izvor: <http://www.3dnatives.com/es/airbus-imprime-en-3d-piezas-para-vuelos-comerciales-12102015/>, <https://www.linkedin.com/pulse/3d-print-me-jet-engine-car-peter-diamandis>, <http://www.australiaunlimited.com/science/the-smart-leap-forward>

2.5.5. Direktno lasersko srastanje metala (DMLS)

Direktno lasersko srastanje metala spada u skupinu aditivne tehnologije izrade 3D modela koja je razvijena u Munchenu od strane EOS tvrtke. Naziv tehnologije otkriva da se metoda izrade bazira na laserskom procesu, kao i kod SLS i SLM procesa. Stroj za tisak 3D predmeta se sastoji od lasera koji je od Iterbija i vrlo je snažan zbog uloge otapanja metala, materijala za izradu koji je od metalnog praha, koji se nalazi u zatvorenoj komori sa plinom, platforme za kreiranje proizvoda i noža koji skida i nanosi novi materijal. Metalni prah se nalazi u zatvorenoj komori sa inertnim plinom koji se nanosi na platformu za tisak. Proces izrade kreće od standardnog računalnog procesa u 3D tisku, sa dizajniranjem predmeta u CAD datoteci koji se potom pretvara u STL format koji horizontalno reže model i stvara slojeve. STL format šalje naredbe za postupak proizvodnje i smjerove u kojem se laser mora kretati, te postupak fizičkog dijela procesa s tim započinje. Prah iz komore se nanosi nožem ravnomjerno na radnu podlogu, koja je izložena utjecaju fokusnog lasera koji se nalazi iznad radne podloge. Pod utjecajem fokusne zrake, metalni prah se djelomično topi na osvijetljenim mjestima do određene mjere, te se prah ujedinjuje i stvrdnjava. Isti postupak se ponavlja, nož nanosi novi sloj koji se opet osvjetljava laserom i nastavlja graditi strukturu. Na takav način se stvaraju čvrste strukture koje čine slojeve, koje imaju oko 20 mikrometara debljine [34]. DMLS je tehnika koja izrađuje kvalitetne prototipe ili potpuno funkcionalne predmete. Za proces tiska se koristi isključivo čisti metal ili legure metala. Prototipovi se izrađuju sa legurama metala pa su vjerodostojni modeli prije izrade gotovog predmeta. S toga dobiveni dijelovi s ovakvom metodom imaju izrazito čvrstu strukturu i izdržljive dijelove koji se proizvode u cijelosti bez zavarenih šavova što je poželjno u mnogim industrijskim pogonima [35].

DMSL ima mnoge prednosti u odnosu na konvencionalnu proizvodnju, a jedna je od rijetkih 3D tehnika koje se koriste u proizvodnji gotovih proizvoda. Prototipovi koji se izrađuju, podvrgavaju se rigoroznijim testiranjima, mogu biti složene geometrijske strukture i proizvode se relativno brzo. DMLS metoda omogućava izradu kompleksnih objekata koji mogu biti izrađeni od par komada dijelova izrađenih, i koji se jednostavno montiraju. Industrije koje najviše koriste proizvode otisnute DMLS tehnikom tiska su zubna medicina, automobilska, zrakoplovna. Međutim koristi se i kod drugih industrija koje zahtijevaju manje do srednje veličine dijelove sa kompleksnim dijelovima.

Ovakva laserska tehnologija nije jeftin proces, međutim ona se nadomještava sa brзом izradom prototipa koji smanjuju vrijeme razvoja novih proizvoda, a smanjuje troškove i vrijeme izrade kompleksnih dijelova alata.

Svemirska kompanija Space X u svibnju 2014. predstavila je svoj motor SuperDraco za svemirsku letjelicu, koji je u potpunosti izrađen DLMS 3D tehnikom. Dijelovi motora su od inkonela (super legura od nikal-kroma) i legura željeza i nikla, koji su tiskani u komori sa tlakom od 6.900 kP pri vrlo visokoj temperaturi. 3D motor je prošao sva testiranja, pa se očekuje njegov prvi let u svibnju 2017. [34].

DMLS i SLM su tehnologije koje u načelu koriste iste proizvodnje postupke, međutim postoji nekoliko ključnih razlika između njih. Metodom srastanja kod DMLS, prah se ne rastapa u potpunosti, nego se zagrijava do te mjere da se prah može ujediniti na molekularnoj razini. Dok se SLM tehnikom prah u potpunosti rastapa i stvara homogenu strukturu proizvoda. Srastanjem se poroznost materijala može kontrolirati, što nije slučaj kod laserskog topljenja. DMLS je prihvatljivija metoda za tiskanje legura metala, dok je SLM pogodnija za tisak čistog metala, titana primjerice [36].



Slika 10. Proizvodi izrađeni DMLS tehnikom

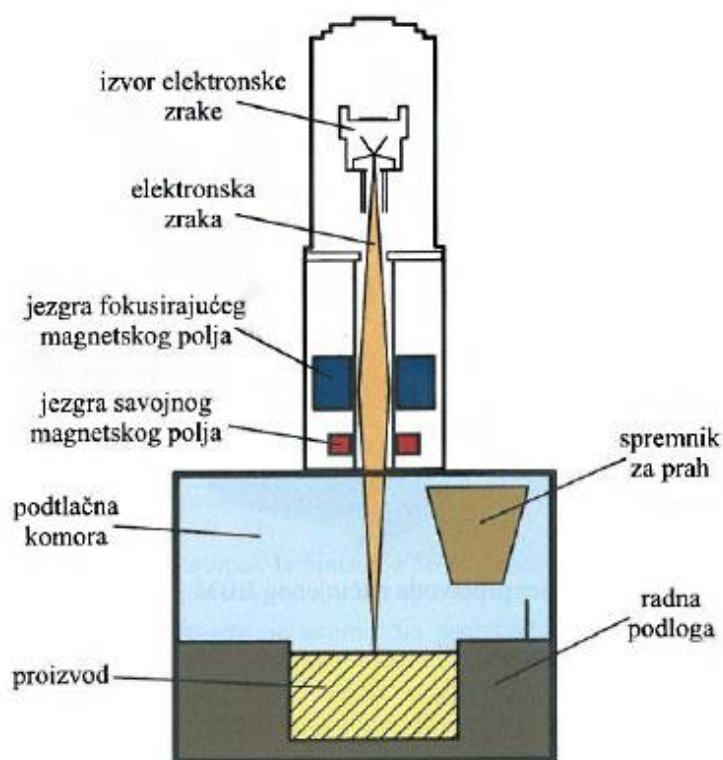
Izvor: <http://www.anonymousbr4sil.net/2013/11/primeira-pistola-real-feita-em.html>,

<https://www.rapidsol.org/dmlp.aspx>,

http://www.eos.info/press/customer_case_studies/kappius

2.5.6. Taljenje pomoću snopa elektrona (EBM)

Taljenje materijala pomoću elektronskog snopa spada u skupinu aditivne tehnologije izrade 3D objekta. EBM (Electron Beam Melting) je vlasničkim pravima zaštićen postupak kojeg je razvio Arcam, inženjersko društvo iz Švedske. Metoda 3D tiska pomoću elektrona je slična tehnici direktnog laserskog srastanja metala (DMLS) s obzirom da materijal za tisak koristi metalni prah. Osnovna razlika između EBM i DMLS tehnologije nalazi se u izvoru koji otapa metal. EBM koristi elektrone za otapanje metala, dok se u DMLS tehnici koristi laser [37].



Slika 11. Princip rada EMB tehnologije

Izvor: <https://repositorij.sfsb.hr/islandora/object/sfsb%3A60/datastream/PDF/view>

Stroj za EBM tehniku se sastoji od zatvorene komore u kojoj se nalazi radna podloga, spremnik za prah i izvor elektronske zrake. U komori se nalazi usitnjeni metalni prah koji se nanosi raspršivačem praša. Elektronski snopovi su visoki izvori topline koji su u stanju otopiti materijal čak do faze isparavanja. Magnetskim otklonom i brzim skeniranjem na visokim frekvencijama, elektronska zraka ima sposobnost da se usmjeri na više ciljeva u više oblika.

S toga je elektronska zraka najučinkovitiji izvor topline koji tali materijal [38].

EBM tehnologija proizvodi dijelove taljenjem metalnog praha, metodom sloj po sloj (Slika 11.) sa snopom elektrona u visokom vakuumu, jer se izrađuju predmeti od reaktivnog materijala u spoju sa kisikom. Metoda EBM postiže potpuno topljenje metala, za razliku od tehnike srastanja slojeva. Postupak se odvija na temperaturi većoj od 1000 stupnjeva, što može dovesti do razlike u fazama skrućivanja koje mogu pogrešno odraditi transformaciju sloja. Računalni postupak kreće standardno sa CAD i STL datotekama. 3D stroj očitava podatke iz STL datoteke, te daje upute elektronskom izvoru o smjeru i obliku izrade predmeta. Snop elektrona udara u metalni prah iz komore koji se trenutno tali i stvrdnjava, te prelazi u čvrste strukture. Nakon toga prevlači se novi sloj metalnog praha preko radne površine, pa se postupak ponavlja dok se cijeli predmet ne ispiše [39]. Izrađeni dijelovi imaju gustoću sloja čak do 100% jer snop elektrona ima veću koncentraciju otapanja metalnog praha. Veća koncentracija se postiže zbog različitog djelovanja elektrona u odnosu na fotone. Taljenjem elektronskim snopom postiže se temperatura između 700 i 1400°C, a ponekad i viša. Stoga ovakvom metodom mogu biti izrađeni proizvodi od metala koji su teško topljivi konvencionalnom tehnikom, primjerice titan-aluminid i legura titan-niobija. Komponente proizvedene procesom taljenja elektronskim snopom imaju neznatna naprezana u slojevima ili ih nemaju uopće, stoga ne podliježu toplinskom istezanju nakon topljenja. Kao takvi su odmah spremni za montažu i mehaničku obradu ako je potrebno. EBM tehnologijom se izrađuju metalni prototipovi ali i serijska proizvodnja dijelova, koji su spremni za uporabu. Ovakva vrsta tehnologije je idealna za re-inženjerstvo, stvaranje novih proizvoda ili komponenti koje su primjenjive u biomedicinskom i ortopedskom području (dijelovi za operaciju gornje čeljusti za ljude i životinje). Elektronskim snopom se dobiva izrazito hrapava površina proizvoda zbog velike gustoće materijala, i kao takva je posebno cijenjena kod dijela ugradnje ljudskih koštanih stanica. Cijenjena je upravo zbog savršene integracije hrapave površine implantata i koštanih stanica. Osim na polju medicine, EMB tehnologija danas ostvaruje velike uspjehe u aeronautici, zrakoplovstvu i industriji trkaćih automobila [40].

Prednosti EBM tehnologije

- smanjuje troškove materijala i vrijeme izrade
- najbrži i najisplativiji aditivni proces izrade velikih metalnih dijelova
- izrađuje guste proizvode, do 100%
- omogućuje kombiniranje više metalnih legura u komori sa prahom
- koristi vatrostalne legure koje proizvode znatno manje otpada
- sirovine legura nisu lako zapaljive [41]

Nedostatci EBM tehnologije

- visoka cijena opreme i pripreme
- ograničena veličina komore
- X-zrake nastaju tijekom procesa zavarivanja
- brzo skrućivanje produkta može uzrokovati pucanje kod nekih materijala [42]

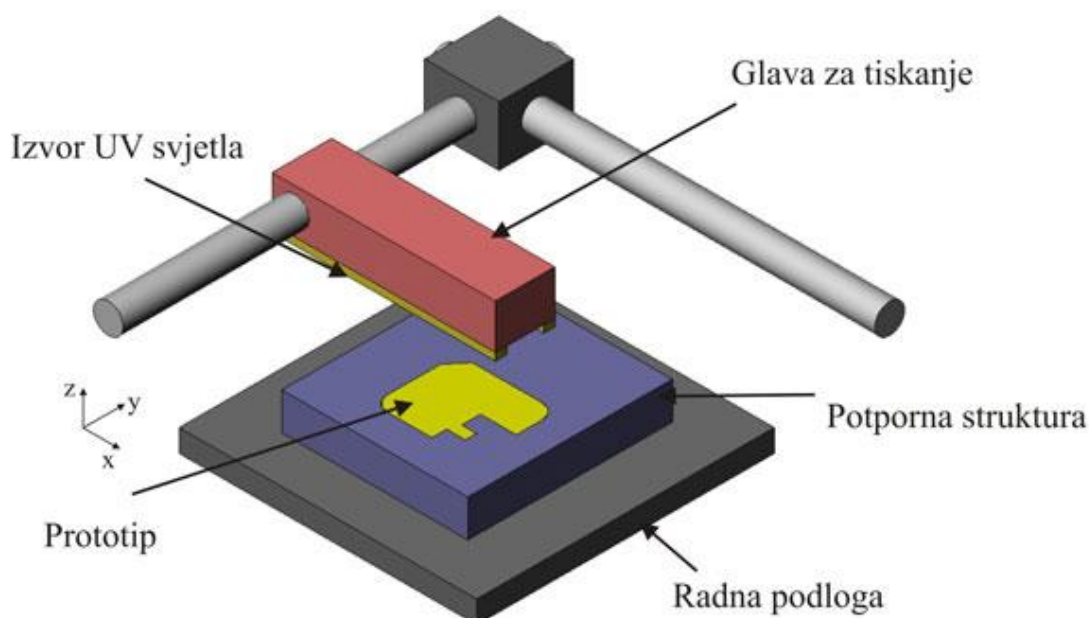


Slika 12. Primjerci 3D tiska EBM tehnologijom

Izvor: <http://www.3ders.org/articles/20151008-sebastiaan-deviaene-designs-3d-printable-medical-implants-video-game-software.html>, <http://www.pm-review.com/additive-manufacturing-machine-builders-state-their-case/>, <https://www.osti.gov/home/osti-collections-3-d-printing-and-other-additive-manufacturing-technologies>

2.5.7. Višezlazni 3D tisak (Multy Jet Printing)

Višezlazni 3D tisak spada u skupinu inkjet tehnologije na principu 3D aditivne tehnologije. Na početku razvoja mlazno tiskanje je služilo kao hibridna tehnologija, ali se kasnije razvila u proizvodnu prototipnu tehnologiju. MJP (Multy Jet Printeri) printeri rade na principu pisača koji istiskuju rastopljeni materijal u obliku termoplastike ili smole, koji se spajaju u slojeve i prave čvrstu strukturu. Koristi se za izgradnju dijelova, uzoraka i kalupa sa finim detaljima, koji imaju široke spektre primjene. MJP printeri nude najvišu rezoluciju u Z smjeru sa debljinom slojeva od 16 mikrona. Ovakva tehnologija je vrlo ekonomična, a kupcima se nudi mogućnost odabira rezolucije i brzine tiska da se zadovolje njihovi kriteriji.[43]



Slika 13. Princip rada MJP tehnologije

Izvor: <http://zg-magazin.com.hr/u-hrvatskoj-aditivnim-postupkom-izraden-umjetni-kraljezak/>

Višezlazno tiskanje kreće sa standardnim procesom računalnog dizajna CAD modela koji se šalje u STL datoteku i reže na slojeve. Nakon toga printer pohranjuje podatke i STL datoteke i kreće izrada objekta. MJP 3D printer ima više mlaznica poredanih jedna pored druge koje istiskuju rastaljeni materijal. Funkcionira na sličan način kao digitalni inkjet pisači, stoga i spadaju u inkjet tehniku. MJP glava pisača sa mrežom mlaznica je vođena izravno iz CAD podataka, te kliže naprijed-nazad i nanosi točno određen sloj

fotoosjetljivog polimernog materijala na radnu površinu (Slika 13.). Glavu printera slijedu UV lampa koja trenutno očvršćuje svaki tiskani sloj polimernog materijala na radnoj površini. Na radnoj podlozi se nalazi potporni materijal za izgradnju modela. Nakon završenog jednog sloja, radna podloga se spušta za debljinu sljedećeg sloja i tako se postupak ponavlja do kraja procesa [44][45].

MJP tehnologija je najpovoljniji izbor 3D tiska ako je potrebno tiskati kompliciranije dijelove na bazi fotopolimera ili voska, sa što finijom površinskom strukturom.

Pozitivna strana MJP printera je ta da su dostupni i kao uredski pisari koji mogu osigurati praktičan i jeftin pristup izradi visokokvalitetnih prototipa i neizravnih proizvodnih pomagala. Uredske kompatibilnosti MJP tehnologije u kombinaciji sa mogućnostima ovakve tehnologije, čine MJP tehnologiju idealnom za primjene u nakitu, stomatologiji, medicini i zrakoplovstvu. Na području MJP tiska sa voskom, nudi se aplikacija „drop in“ koja daje alternativu tradicionalnim metodama proizvodnje, te sprječava dugotrajan i skup proces stvaranja prototipa. S ovakvom tehnologijom se može izraditi gotovo bilo koji oblik predmeta u manjim dimenzijama, stoga je MJP vrlo popularna i raširena tehnika 3D tiska [43].

Prednosti MJP tehnologije

- jednostavna uporaba
- visoka rezolucija i točnost
- brza proizvodnja prototipa
- tanki slojevi (0,030 mm-0,016 mm)
- mogućnost izrade transparentnog modela
- mogućnost izrade kompliciranih modela
- prilikom izrade materijal ne isparava [45]

Nedostatci MJP tehnologije

- skupi uređaji i materijali
- nerijetka potreba potporne strukture
- ograničena funkcionalnost modela radi svojstava materijala (moraju imati dovoljno nisko talište i nisku viskoznost [45])



Slika 14. Primjeri 3D tiska MJP tehnologijom

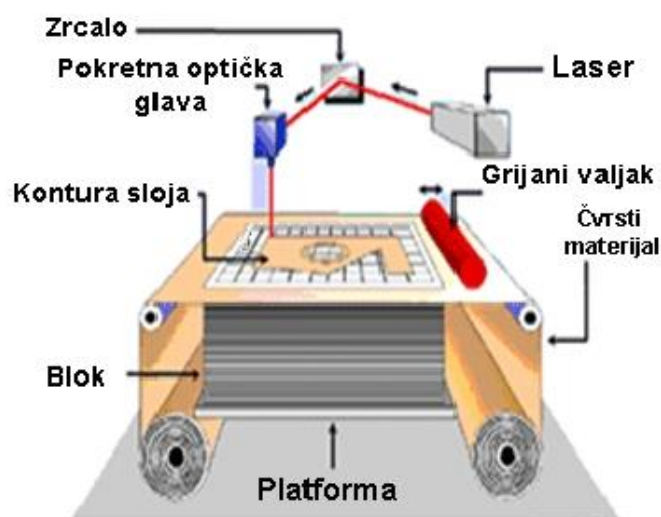
*Izvor: <https://sourcegraphics.com/landing-pages/jewelry-printers/>,
<http://www.4dconcepts.de/3d-druck/multijet-3d-druck-mjp/>,*

2.5.8. Laminirana proizvodnja objekata (LOM)

Laminirana ili slojevita proizvodnja predmeta je brzi sustav za proizvodnju prototipova ili gotovih objekata. Ovakav sustav proizvodnje razvijen je u tvrtki Helsys. Laminarna proizvodnja se obično koristi kod izrade većih dimenzija nekog predmeta. Pri izradi primjenjuju se čvrsti materijali u obliku folija ili ploča, koji se laserom (ugljični dioksid) ili nožem režu te spajaju. Materijali koji se najviše koriste za ovakav proces su papir i polimerna ili kompozitna folija koja je fiksirana i omotana na valjak. Pored papira i folije koristi se plastika i metal ali u puno manje slučajeva [46]. Mehanizam sustava LOM proizvodnje sastoji se od platforme na kojoj se izrađuje predmet, grijaćeg valjka na kojem je namotan materijal, te lasera ili noža koji reže taj materijal. Laserska zraka izrezuje konturu objekta preko sustava pomičnih ogledala, ili to čini čvrst oštar nož. Namotani materijal na valjku s donje strane ima disperzivno vezivno sredstvo koje osigurava čvrsto povezivanje slojeva tokom procesa [47].

Laminirana proizvodnja objekta na samom početku procesa ima iste korake kao i sve 3D metode tiskanja. CAD 3D datoteka sa virtualnim objektom se pretvara u STL ili 3DS format koji računalu mora biti poznat. a koji će kasnije te podatke izravno slati za proces ispisivanja.

LOM uređaj koristi kontinuirani sloj materijala koji je nategnut preko platforme pomoću sustava dovodnih valjaka. Na platformi se nalazi posebna traka na koju će u početku procesa doći materijal, obično bude od papira koji je sa stražnje strane premazan sa polietilenskim premazom. Grijani valjak prelazi preko sloja materijala i otapa taj premaz ostavljajući na materijalu ljepljivu površinu. Poslije toga računalo šalje upute kuda se laser ili nož kreće, odnosno daje upute koji dijelovi moraju biti odrezani. Laser se kreće u X i Y smjeru, te reže vanjske dijelove u poprečnom presjeku gornjeg sloja materijala i stvara obrub oko dijela koji će se nadograđivati. Na takav način se štiti dio koji će se izgraditi u predmet. U kontaktnu lasera i papira događa se dim pa je u stroju potrebno imati dio za odvod tog dima. Odrezani dio oko glavnog objekta služi kao oslonac u postupku izgradnje da ne bi došlo do nekakvog pomicanja tijekom procesa izgradnje. Laser reže i višak materijala koji se onda lakše uklanja kad proces završi. Nakon formiranja jednog sloja, platforma se spušta za jednu razinu koja je debljina jednog sloja (0,05-0,5mm). Novi materijal se ponovno povlači preko platforme, grijani valjak ponavlja postupak presvlačenja materijala sa vezivnim sredstvom, te tako spaja novi sloj sa prethodnim (Slika 15.). Nakon završetka jednog sloja aplicira se impregnacijsko sredstvo radi zaštite od vlage. Ovakav postupak se nastavlja dok se cijeli objekt ne dovrši.



Slika 15. Princip rada LOM tehnologije

Izvor: <https://repositorij.sfsb.hr/islandora/object/sfsb%3A60/datastream/PDF/view>

Nakon završetka procesa višak materijala se uklanja rezanjem, a ako je dobiveni predmet od papira sastavljen može ići na dodatno brušenje ili lakiranje [48][49].

LOM tehnologijom je moguće dobiti modele mase od 0,1kg do 50kg, dok debljina ovisi u vrsti materijala koji se upotrebljava (obično su u rasponu od 1-100mm). Hrapavost na površini objekata također ovisi o vrsti korištenog materijala. Hrapavost im se često kreće u rasponu od 100 do 140 mikrometara [7].

Laminirana proizvodnja objekata je relativno brz, jeftin i jednostavan način stvaranja 3D modela. Najčešće se koristi za izradu prototipova, a manje za gotove proizvode. Jedna od najkorištenijih i najdostupnijih metoda za izradu prototipa je upravo LOM metoda. To je metoda otvorenog tipa proizvodnje pa se mogu izrađivati objekti velikih dimenzija i ne sadrži nikakve opasne kemijske procese u postupku. Međutim LOM tehnika nije idealna za stvaranje objekata sa složenim geometrijskim strukturama. Preciznost tehnike zbog različitih karakteristika materijala nije na nivou kao kod nekih drugih 3D tehnika tiska, pa se ne koristi često za izradu pravih funkcionalnih prototipova.

LOM se prvenstveno upotrebljava za izradu modela ili konceptualnih prototipova, koji se testiraju za daljnja rješenja. Izrada metalnih konstrukcija s ovom metodom je rijetka pojava, jer je faza rezanja materijala od metala puno složenija i zahtjevnija od rezanja papira ili neke folije. Usporedno sa laminarnom objektom proizvodnjom, razvila se srodna tehnika tiskanja zvana, selektivno taloženje laminacijom (eng. SDL). Tehnologija se bazira na 3D tisku papira s dodatkom boje. Listovi papira se tiskaju u boji, selektivno lijepe, zatim režu nožem. Ljepilo se nanosi samo na površini odgovarajućeg predmeta, pa je s toga lakše doći do proizvoda nakon tiska. Stoga ovakva metoda izravno konkurira 3D tehnici spajanja mlazom (eng. binder jetting technologies), iako kvaliteta nije ista [50]. Tvrtnica Helisys koja je izumila LOM tehnologiju je prestala sa radom 2000. Druge tvrtke koje su nakon nje bile specijalizirane, posebice na tlu Azije su također prestale sa radom, međutim u Irskoj firma Mcor Technologies Ltd prodaje profesionalne 3D printere koji koriste LOM tehnologiju. Njihove strojeve koriste arhitekti, umjetnici, programeri, a ponekad i liječnici za izradu modela i gotovih proizvoda. Zahvaljujući upravo tvrtki Mcor koja se partnerski povezala sa firmom uredskog materijala Staples, omogućili su klijentima da samostalno tiskaju svoje dizajnirane objekte ili predloške u Mcor tvrtki.

Prednosti LOM tehnologije

- nije potrebna potporna konstrukcija u izradi prototipa
- obrađuje se samo opseg prototipa, za razliku od većine drugih 3D metoda
- niža cijena prototipova zbog niske cijene materijala
- sposobnost proizvodnje velikih dijelova modela
- potencijal za visoke proizvodne brzine
- nema zaostalih naprezanja u prototipu
- brz način izrade prototipa [51]

Nedostatci LOM tehnologije

- veza između slojeva nije pouzdana
- malo manja točnost izrade prototipa u odnosu na druge metode
- anizotropnost i higroskopsnost materijala prototipa
- potrebno je lakiranje proizvoda zbog upijanja vlage
- loša obrada površine
- uzak izbor materijala
- potrebna je dodatna obrada za kvalitetnije produkte
- velik udio otpadnog materijala
- poteškoće u proizvodnji šupljih dijelova [51]



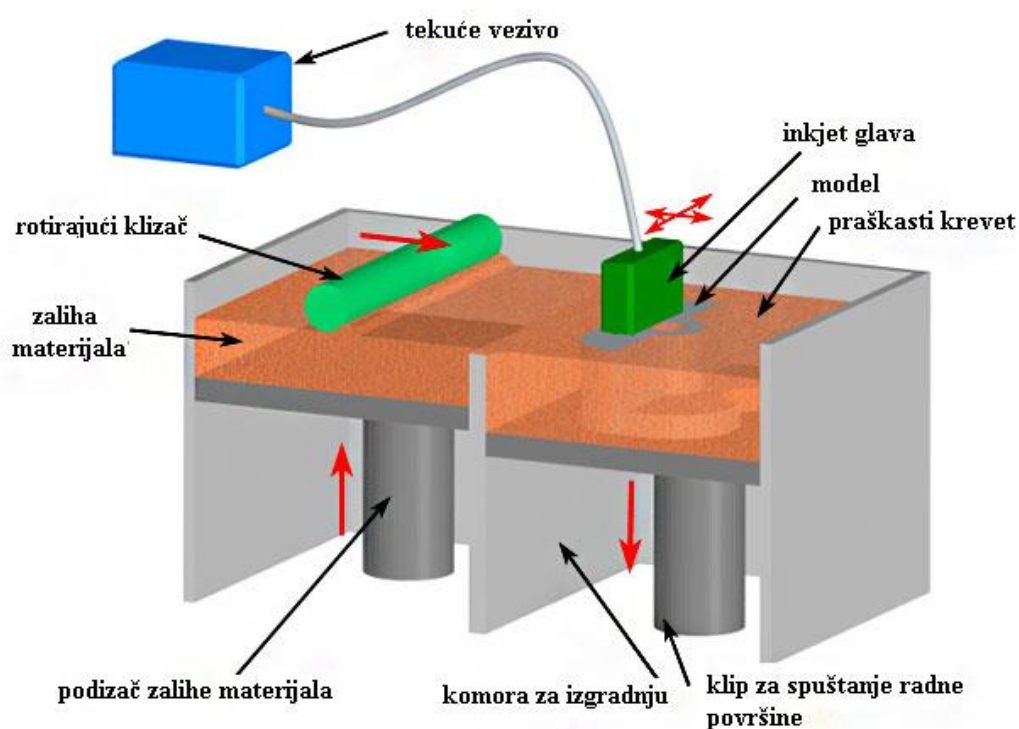
Slika 16. Primjeri prototipa 3D tiska tehnikom LOM

Izvor: <http://www.slideshare.net/AnkitRaghuwanshi1/laminated-object-manufacturing-61659654>, <http://www.raprotec.de/lomtechnik.htm>,

2.5.9. Trodimenzionalno tiskanje (3D Printing-3DP)

3D tiskanje je sustav tiska aditivnom tehnologijom koji je započeo sa svojim radom na Massachusetts institutu tehnologija 1993. Kompanija ZCorporation 1995. je prva dobila licencu za primjenu 3D tehnologije tiska [52].

3DP je tehnologija koja nudi mogućnost vrlo brze, jeftine i pouzdane izrade 3D proizvoda. Prvi proces tiska kreće sa dizajniranjem modela u CAD programu, koji zatim prosljeđuje model u STL datoteku koji se reže na puno tankih slojeva (0,076 do 0,254 mm). Nakon toga STL datoteka šalje model po određenim uputama na postupak tiskanja. Stroj za ovakvu tehnologiju se sastoji od glave s mlaznicama koje se gibaju u smjeru X-Y uz pomoć računala, spremnika sa prahom ispod radne površine koja se giba u smjeru osi Z i valjka za niveliranje praha. Postupak se temelji na povezivanju čestica specijalnog praha sa vezivom koje dolazi iz mlaznica (Slika17.)



Slika 17. Princip rada 3DP tehnologije

Izvor: https://bib.irb.hr/datoteka/527907.Diplomski_rad_-_Duan_Vrbanec.pdf

Vezivo može biti monokromatsko ili u boji, te se prvo nanosi na donji sloj. Nakon završenog prvog sloja, ponovno se nanosi tanki sloj praha uz pomoć rotirajućeg valjka i spaja sa vezivom iz mlaznica, pa se isti postupak ponavlja do završetka proizvoda. Ostatak praha koji je ostao izvan kontura služi kao potporna konstrukcija u procesu 3D tiska. Često se izrađeni produkt izlaže toplinskoj obradi, posebice za materijale na bazi gipsa i škroba. Na kraju se višak praha usisava iz komore u spremnike, a izgrađeni model propuhuje kompromitiranim zrakom u posebnoj komori. Dodatna obrada nakon zadnje faze propuhivanja modela uključuje proces infiltriranja epoksi ljepila (cijanoakrilat) ili uretana kako bi se produkt očvrstio i dobio na elastičnosti. Isto tako podvrgavaju se metodama pjeskarenja, bojanja i metaliziranja. Podešavanjem orijentacije modela i parametri izrade mogu bitno utjecati na točnost izrade i geometriju produkta. S toga se osjetljivi detalji stavljaju u vertikalni položaj. Brzina ispisa ovisi o traženoj kvaliteti i debljini sloja, a većina printera mogu ispisati nekoliko slojeva u minuti. Brzina tiska se određuje prije postupka tiskanja. Odlike tiska sa 3DP tehnologijom su iznimna točnost i kvaliteta izrade. Korisnici mogu kreirati predmete različitih svojstava odabirom vrste praha i punjenjem modela različitim potporama. Na taj način se, ovisno o tehničkim zahtjevima koje treba ispuniti postiže čvrstoća, temperaturna izdržljivost i elastičnost tiskanog predmeta [47][53].

Izradom modela na principu 3DP tehnologije, omogućava se brža komunikacija i ocjenjivanje različitih dizajnerskih rješenja i koncepcija. Rezultati se vide u tome što je skraćen proizvodni proces, skraćeno je vrijeme izrade i vrijeme dizajniranja [7]. 3DP tehnikom se izrađuju funkcionalni prototipovi, alati složenih oblika, kalupi i gotovi proizvodi. Veziva posjeduju svojstvo kontroliranja površinske napetosti, viskoznosti, točku vrelišta itd., a tu ulogu može imati i boja. Materijali koji se najviše upotrebljavaju kod ovakve tehnike su prahovi na bazi gipsa i škroba. Izumitelji i proizvođači u 3D tehnici tiska 2014., su osmislili sistem za dobivanje produkata kombinacijom pijeska i kalcijeva karbonata (dobivenog iz umjetnog mramora), akrilnog praha i cijano-akrilata, keramičkog praha i veziva, vode i šećera (za izradu bombona) i sl. 3DP tehnologija ima ograničene mogućnosti ponajviše zbog ograničenosti materijala. Trodimenzionalna tehnika je u većini slučajeva brža tehnologija od ostalih aditivnih proizvodnih tehnologija, poput FDM (taloženje topljenog materijala) i MJP (višeslazni 3D tisak) koja zahtjeva pomoćnu strukturu da bude na željenoj rezoluciji.

3DP tehnologija može biti inferiorna tehnologijama kao što su SLA (stereolitografija) i SLS (selektivno lasersko srastanje). Razlog tome je što 3DP spada također u skupinu tiskanja sa prahom u komori, gdje površinska izrada, gustoća sloja i čvrstoća ovise o materijalima i samom procesu izrade. Kao i kod većine drugih aditivnih tehnologija, i kod 3DP se pojavljuje problem sa stepenastim izgledom i asimetričnim dimenzijskim svojstvima produkta. Takvi problemi se uklanjaju sa dobro odabranim materijalom i što boljom rasterizacijom modela. Cijena 3DP pisača varira o vrsti primjene tehnologije. Skuplji su od klasičnih 3D metoda, mogu biti u rangu od 50,000\$-2,000, 000 \$. Međutim razvili su svoj „open source“ projekt čime su drastično smanjili cijenu pojedinih strojeva, pa se cijene kreću najviše do 1,300\$, što ih čini puno pristupačnijom tehnologijom [52].

Prednosti 3DP tehnologije

- mogu se podjednako uspješno izrađivati prototipovi, funkcionalni dijelovi i alati vrlo složenih oblika
- visoka preciznost izrade i brzina rad stroja
- vrlo glatka površina proizvoda
- fleksibilan postupak izrade
- mogućnost izrade vrlo tankih slojeva
- mogućnost tiskanja u boji
- uglavnom neotrovni materijali [54]

Nedostatci 3DP tehnologije

- ograničena brzina izrade
- ograničen broj primjenjivih materijala
- potrebno mehaničko čišćenje
- manja preciznost većih dimenzija proizvoda u odnosu na konkurentne procese izrade
- kod nekih materijala potrebno očvršćivanje ljepilima [54][44]



Slika 18. Primjeri 3D tiska 3DP tehnologijom

Izvor: <http://www.creativeapplications.net/processing/listening-to-the-ocean-on-a-shore-of-gypsum-sand/>, <http://kmbtech.com/tr-tr/page/hizli-prototipleme/3dp>, <http://www.makerbot.com/blog/2010/11/01/3d-print-your-own-car-with-a-makerbot>

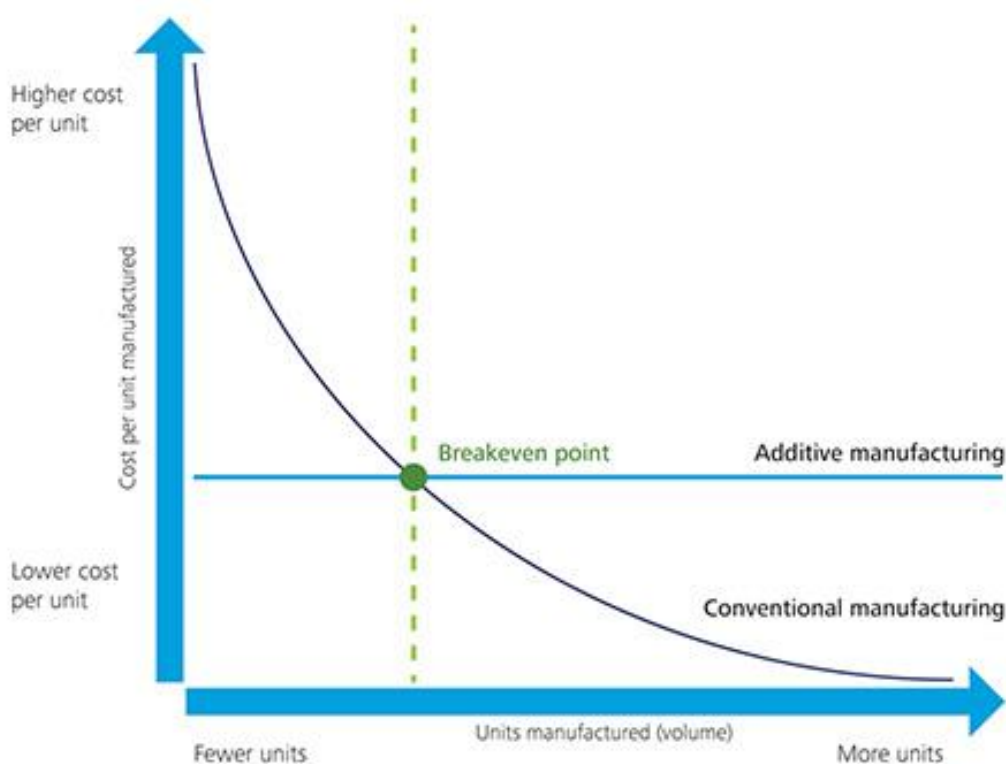
2.6. Usporedba 3D tiska sa konvencionalnom metodom proizvodnje

3D tehnologija tiska je postala fokusom žustre rasprave u prerađivačkoj industriji u posljednjih nekoliko godina. Iako je 3D tehnologija na tržištu dostupna već oko trideset godina, novi napredak u proizvodnji smanjio je trošak postupka proizvodnje, pa su tako pale i cijene uređaja. U početnom razvoju 3D tiska, prvenstvena namjera je bila proizvodnja prototipa. Međutim razvojem tehnologija i materijala trodimenzionalna tehnika izrade produkata mijenja svoja poslovanja. Od početnih konceptnih modela razvili su se napredni prototipovi, a posljednjem desetljeću i produkcijski dijelovi [55].

2.6.1. Proizvodnja prototipova

Jedna od najvećih prednosti 3D tiska u odnosu na konvencionalnu metodu je ta što 3D metoda ne zahtijeva nikakve posebne alate u procesu proizvodnje. Izrada prototipa

tradicionalnom metodom iziskuje mnogo vremena, novca i truda za postavljanje i izradu prototipa, za razliku od 3D tiska koji je sve te parametre smanjio i pojednostavio. Produkt prototipa može zahtijevati neke prerade u dijelu dizajniranja, stoga se novi dizajn se lako programira u 3D stroju te se postupak ponovi. Konvencionalna metoda kod takvih slučajeva ima mnogo problema, prvenstveno jer postupak redizajna zahtijeva ponovni postupak izrade koji oduzima mnogo vremena i novca. Konvencionalna metoda u pravilu je skuplja zbog opsežnije pripreme, dok aditivna proizvodnja čini jednu konstantu, sa prosječnom brzinom i povoljnom izradom materijala (Slika19.)[56]. Aditivna tehnologija 3D tiska ima očitu prednost kod izrade ograničenih modela za testove jer je puno isplativija tehnologija na manjim količinama od tradicionalne metode koja zahtjeva više vremena, koštanja i ljudskog resursa. Čisti primjer za to je kompanija Nike koja se koristi 3D metodom izrade testnih modela. [57]

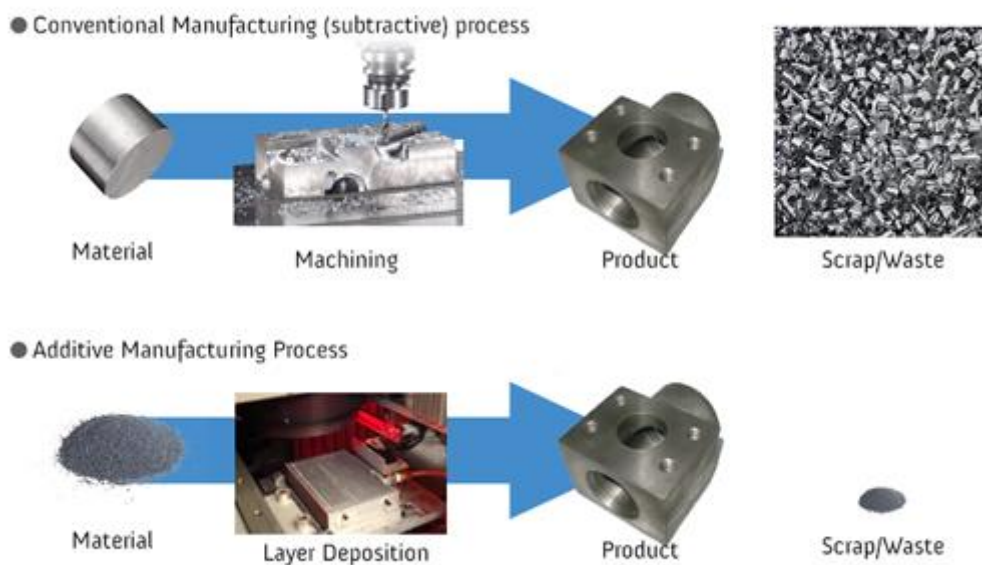


Slika 19. Parametri proizvodnje 3D aditivne i konvencionalne tehnike

Izvor: <http://dupress.deloitte.com/dup-us-en/industry/manufacturing/future-of-manufacturing-industry.html>

2.6.2. Korištenje materijala

Svaki proizvodni postupak teži prema učinkovitoj potrošnji materijala. Konvencionalne metode zahtijevaju izradu posebnih kalupa za svaku metodu, pa se ti kalupi ispunjavaju sa drugom vrstom materijala gdje se izrađuje prototip. U proizvodnji kalupa i prototipa stvara se višak materijala koji opet idu na recikliranje, ali je to dugotrajan i opsežan postupak. 3D tisak ima nevjerovatno učinkovit sustav korištenja materijala. Upotrebljava točno onoliko materijala koliko je potrebno, a eventualni ostatci potporne strukture ili materijala od obrade se ponovno koriste za tisak. S toga aditivna tehnologija proizvodi gotovo uvijek manje otpada od konvencionalne tehnike (Slika 20.). Pored toga proizvođači aditivnom tehnologijom ne moraju stalno proizvoditi da bi opravdali troškove pripreme kao kod konvencionalne metode. Tradicionalni opskrbeni lanac ovisi o učinkovitosti masovne proizvodnje i zahtjeva veću količinu radnika, dok aditivna tehnologija treba malo više od potrebnih sirovina da bi ispunila bilo koju narudžbu.[56]



Slika 20. Izrada istog metalnog predmeta sa različitom količinom otpada

Izvor: <http://www.matse.psu.edu/research-topics/additive-manufacturing>

2.6.3. Masovna proizvodnja

Tradicionalne konvencionalne metode su znatno učinkovitije kad je riječ o masovnoj proizvodnji. Prototipovi izrađeni aditivnom tehnikom, u prošlosti su bili u pravilu manje učinkoviti i manje pouzdani od prototipa izrađenih konvencionalnom metodom. Danas se situacija promijenila, međutim industrijski proizvođači još i dalje daju prednost tradicionalnim metodama. Dok aditivna proizvodnja ne zahtijeva dodatne alate u procesu izrade, proizvodnja takvim postupkom je ipak u nekim slučajevima sporija od proizvodnje konvencionalnom metodom. 3D tisak zahtijeva spajanje sloja na sloj u jednom procesu i to može oduzeti dosta vremena. Čak i kod brzih 3D printera, ispis malih predmeta može potrajati satima. Konvencionalna metoda bi u masovnoj proizvodnji mogla za toliko vremena proizvesti nekoliko tisuća proizvoda. S toga je brzina masovne proizvodnje jedan od najvećih nedostataka 3D tiska, a ujedno predstavlja i najveći izazov 3D industriji da popravi stanje na tom području [56].

2.6.4. Dostupnost specifičnih materijala

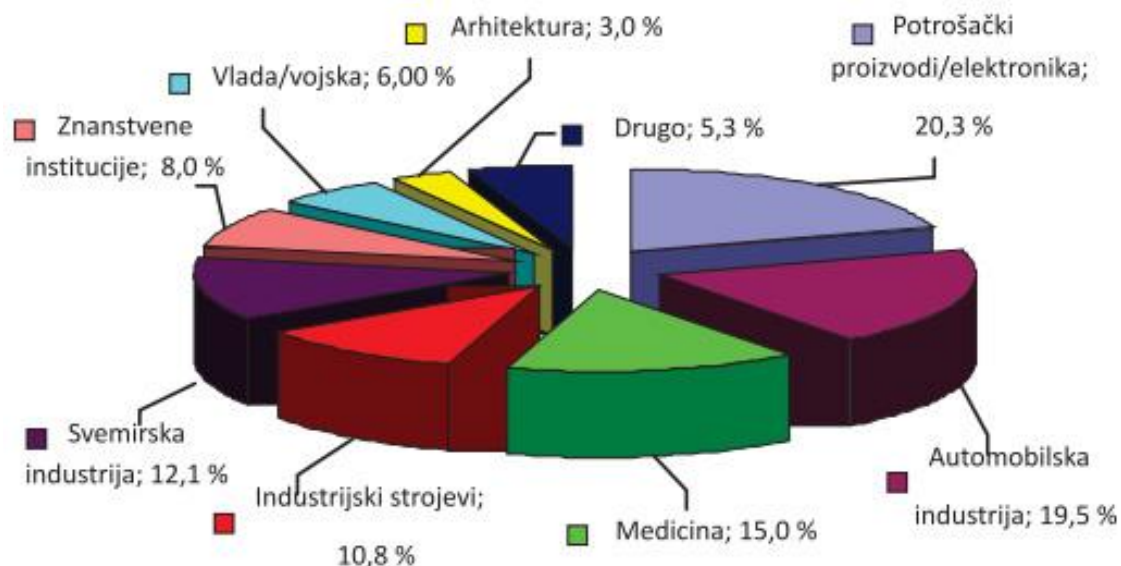
Aditivna tehnologija 3D tiska danas koristi različite materijale za izradu tvorevina. Industrijski razvoj je pratio i razvoj materijala koji se mogu primjenjivati u aditivnoj tehnologiji. Polimeri, plastike, razne vrste kompozita i prirodnih materijala se danas upotrebljavaju u tehnikama 3D tiska, ali svakako je važno spomenuti metal kao najnoviju i najperspektivniju pojavu kod ovakve vrste tiska. Tehnike koje najviše upotrebljavaju metal jesu SLS, SLM i EBM tehnologije. Modeli i predmeti izrađeni od metala navedenim tehnologijama posjeduju izvrsne fizičke i kemijske specifikacije, pa se često primjenjuju na području medicine, aeronautike, zrakoplovne i automobilske industrije. Navedene industrijske grane polako sve više i više prelaze na aditivnu tehnologiju izrade, zbog jednostavnosti uporabe i jeftinijeg procesa izrade konceptnih modela, prototipova, a u krajnjem slučaju i gotovih proizvoda [56].

2.6.5. Skale proizvedenih dijelova

Proizvodnja velikih dijelova može predstavljati kompliciran, često i neizvediv zadatak aditivnoj tehnologiji izrade. S toga na tom području još i dalje ima veliku prednost tradicionalna proizvodnja dijelova. Važno je spomenuti da zbog česte ograničenosti veličine gotovog produkta, 3D tiska ide nerijetko u proizvodnju manjih dijelova koji se kasnije montiraju u jedan veliki dio. Ostaje upitno kolika se kvaliteta na takav način postiže. Međutim sigurno je da će se i takvom problemu uskoro stati na kraj, sudeći po brzini napredovanja aditivne tehnologije [56].

2.7. Primjene tehnika trodimenzionalnog tiska u industriji

3D tehnologija skeniranja, povratnog inženjerstva i brze izrade prototipova našle su izvrsnu primjenu u raznim industrijskim granama. Oslanjanje na napredne tehnologije je danas nužan korak koji treba poduzeti svaka ozbiljnija industrijska grana. Konkurencija i ograničeno vrijeme razvoja zahtijevaju da se gotov proizvod što brže plasira na tržište, stoga je aditivna tehnologija tiska izuzetno kvalitetno rješenje, pogotovo ako se radi o specijalnim i limitiranim dijelovima. Kvalitete i mogućnosti aditivne tehnologije danas su prepoznale mnoge industrije, poput autoindustrije, zrakoplovne, svemirske, vojne, brodogradnje, stomatologije, medicine, arhitekture, tekstilne, umjetničke i dr.. Izrada prototipova u početnim godinama aditivne tehnologije je bila jedina stvar koju su nudili njihovi strojevi. Međutim situacija se promijenila rapidno od izuma novih tehnologija nakon 2000., pa su se s proizvodnje prototipova počeli izrađivati gotovi konceptualni modeli, a u zadnjih nekoliko godina izrazito se proširila izrada gotovih proizvoda (Slika 21.). Dizajneri, inženjeri i umjetnici svakodnevno koriste 3D printere pa se šire i istražuju granice mogućnosti. Osim što daju kvalitetne izvedbene produkte, jedna o najvažnijih stvari zbog kojeg se primjenjuje u sve više industrijskih grana je isplativost korištenja aditivne tehnologije [58]. U slijedećim naslovima su prikazane industrijske grane koje najviše upotrebljavaju tehnologiju 3D tiska.



Slika 21. Primjene 3D aditivne tehnologije u industriji 2014.

Izvor: <http://www.gradimo.hr/clanak/brza-izrada-prototipova/15509>

2.7.1. Autoindustrija

Automobilaska industrija danas najviše koristi uslugu 3D tiska prototipa, koncepata i gotovih proizvoda. Aditivna tehnologija omogućava smanjenje troškova pri izradi prototipa novih modela automobila, povećava fleksibilnost, a ujedno izravno utječe i na sam dizajn modela. Primjerice, konvencionalnom metodom su se prije izrađivali alati i šabloni od metala, dok se danas sa aditivnom tehnologijom izrađuju od termoplastike za preciznu ugradnju u automobilima što znatno smanjuje trošak. Autoindustrija izrađuje prototipove do te mjere, dok ne budu skoro savršena replika budućeg pravog izgleda automobila. Prototipovi i konceptni modeli izrađeni aditivnom tehnologijom su sigurnost prema dobrom konačnom proizvodu, što dizajnerima i inženjerima uvelike olakšava stvari. Na ovakav način omogućuje se proizvođačima da nastave proizvoditi istim tempom jer se proizvode sve kompliciraniji dijelovi unutar automobila [58].

Novija istraživanja Deloitte grupe su pokazala da se skoro jedna trećina usluga aditivne tehnologije odnosi u OEM (Originalna proizvodnja oprema), za koji se veći dio veže na autoindustriju. S toga se prognozira da će do 2019. 3D tisak u automobilskoj industriji postizati zaradu od 1,1 milijardu dolara. 3D tisak i automobilaska industrija su trenutno

usko povezani, a pored raznih dijelova koji se tiskaju za automobile, prvi put je predstavljen prvi superautomobil (Slika 22.), koji je napravljen pretežno 3D tiskom.

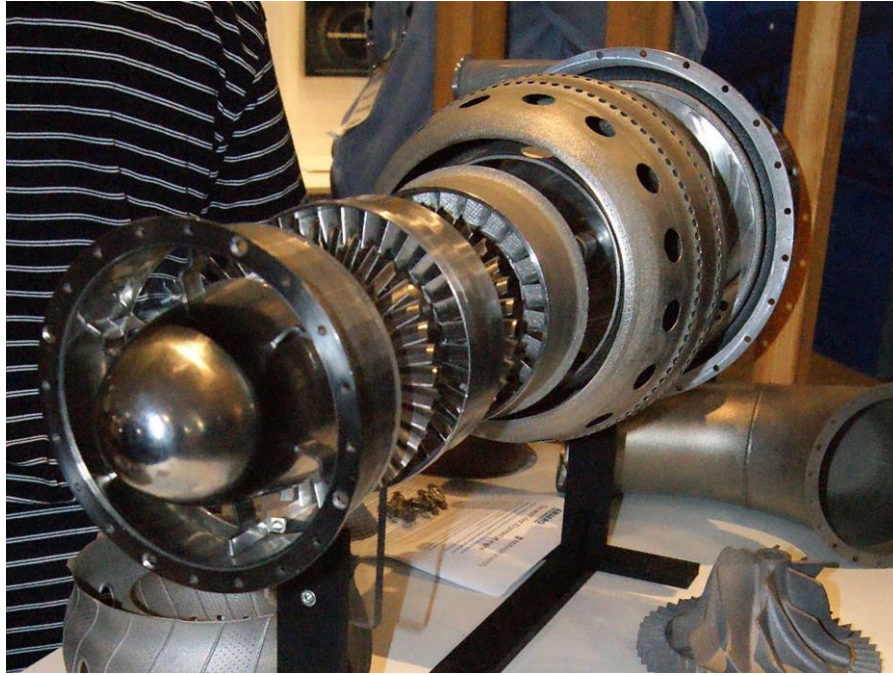


Slika 22. Blade- Prvi 3D tiskani superautomobil

Izvor: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-automotive-industry-2-82838/>

2.7.2. Zrakoplovna industrija

Zrakoplovna industrija spada u najzahtjevniju i najskuplju industrijsku granu. Uvela je aditivnu tehnologiju u svoj sustav proizvodnje ponajviše zbog snižavanja troškova proizvodnje, jer se avionu rjeđe proizvode pa je 3D tehnika tiska idealna za takvo područje. Pored prototipova, proizvode se ekonomični dijelovi, laganih komponenti koji smanjuju potrošnju goriva i smanjuju emisiju CO₂. Najčešće se izrađuju dijelovi za avionske motore i turbine (Slika 23.), pa tu dolazi do izražaja aditivna tehnologija koja ne zahtjeva dodatna zavarivanja. Specifične prilagodbe 3D tiska, mogućnost izrade kompleksnih rješenja, njihova efikasna i brza izrada su također odlična stvar za industriju zrakoplova. Koriste isključivo lasersku tehnologiju (SLS, DMLS, SLM), kojima se izrađuju lagani metalni dijelovi ili legure metala iznimne snage ali smanjene težine u odnosu na klasične metode i do 60%, stoga je to još jedan veliki razlog primjene u zrakoplovnoj industriji [59].



Slika 23. Motor zrakoplova sastavljen od dijelova tiskanim 3D tehnikom

Izvor: <http://www.independent.co.uk/life-style/gadgets-and-tech/3d-printer-creates-jet-engine-in-world-first-10072740.html>

2.7.3. Svemirska industrija

Svemirska industrija je 2014. počela eksperimentirati sa tehnikom 3D tiska. U svibnju 2014. kompanija za svemirska istraživanja Space X predstavila je svoj prvi motor pod imenom „SuperDraco“ (Slika 24.), čiji su svi dijelovi tiskani 3D tehnikom (DMLS). Motor je prošao sva testiranja, a probni let se očekuje u svibnju 2017. [34].

Ostale letjelice sa 3D tiskanim dijelovima su naveliko testirane, međutim još nisu imale prave letove. Testovi su iscrpni zbog kontrole visokih temperatura, visokih tlakova u raketnom motoru prilikom izgaranja i mnogih drugih parametara. Međutim najavljuje se svemirska raketa „Vulcan“ koja bi se trebala lansirati 2019. i koja bi se sastojala od 100 dijelova polimernog materijala i 50 dijelova metala. Sposobnost aditivne tehnologije da proizvede vrlo složene, čvrste, a ujedno i lagane materijale ključ je u proizvodnji raketnih motora. Materijal koji se najčešće koristi je metal, obično kombinaciji sa iznimno čvrstim naprednim legurama. Još jedan primjer primjene aditivne tehnologije u

svemirskoj industriji je mala svemirska letjelica koja služi kao satelit nazvana „Arkyd-300“. Njezina cijela mehanička struktura je izrađena 3D tiskom [60].



Slika 24. SuperDraco raketni motor izrađen 3D aditivnom tehnologijom

Izvor: <https://en.wikipedia.org/wiki/SuperDraco>

2.7.4. Medicina

Aditivna tehnologija 3D tiska se jednako uspješno aplicirala i na polje medicine. 3D tiskani modeli su česti alati u kirurgiji posljednjih nekoliko godina. Umjesto da se oslanjaju na računalne 2D i 3D prikaze slika, danas se dosta liječnika služi sa tiskanim modelima, odnosno fizičkim replikama organa pacijenata, koštanih struktura, udova ili bilo kojeg drugog dijela tijela. Danas već postoje opsežna testiranja djelomično tiskanih organa kao što su bubrezi i jetra koji bi se potencijalno mogli umetnuti u čovjeka, no ispituju se razni parametri, kao što je toksičnost materijala. Tiskani organi su na bazi hidro-gela koji je prožet živim stanicama, a izrađuju se FDM tehnologijom. 3D proizvodi koji se najviše koriste u medicini su različiti implantati i umjetne proteze (Slika 25.). Izrađuju se od različitih bio materijala koji imaju dobra svojstva i koji su potpuno funkcionalni. Predviđanja stručnjaka su takva, da bi se tek za 15-20 godina mogli proizvesti 3D organi koji bi se mogli transplantirati u čovjeka [60].

Krenula su također opsežna istraživanja regeneracije živaca sa 3D tiskom. Skeniranjem živaca sa životinja stvara se 3D model koji bi kasnije trebao olakšati ponovni rast živčanog tkiva kod čovjeka. Sve u svemu potencijal aditivne tehnologije na polju medicine je apsolutno opravdan, pa ostaje za vidjeti kako će ići daljnji napredak [61].



Slika 25. 3D tiskan implantat

Izvor: http://www.eos.info/press/case_study/additive_manufactured_hip_implant

2.8. Materijali za 3D tisak

Na početku razvoja, aditivna tehnologija se koristila pretežito polimernim materijalima za izradu prototipova. Nakon toga su krenula je proizvodnja sa plastičnim materijalima koji su privukli i druge materijale koji se danas koriste.

- **Plastika** – Najpoznatiji predstavnik danas je ABS (akrilonitril-butadien stirel) i PLA (polilaktid). ABS je jako čvrsta plastika s visokom preciznošću. PLA je snažna i fleksibilna vrsta bio plastike. Najviše se upotrebljavaju u FDM i MJP tehnologiji.

- Metal – Glavni predstavnici su nehrđajući čelik, aluminij, čelik, titan i razne legure. Međutim u iznimnim situacijama se upotrebljava bronca, srebro i zlato. Upotrebljavaju se najviše u SLS, SLM, DMLS i EBM tehnologiji.
- Gips – Materijal koji se dosta često koristi u proizvodnji prototipa. Najviše se upotrebljava u 3DP tehnici. Pogodan i jednostavan za korištenje uz nisku cijenu materijala.
- Bio kompoziti - To su materijali koji se koriste u medicini, na bazi vode i živih stanica. Izrađuju se 3DP tehnologijom tiska a koriste se i za izradu različitih proteza i implantata.
- Papir – Predstavlja najjeftiniji materijal u 3D tisku. Koriste se za LOM tehniku tiska tako da se lijepi sloj na sloj papira, a povezuje se i sa raznim bojama.
- Hrana, vosak, beton - U Kini se tiskaju dijelovi kuće aditivnom tehnologijom. NASA radi istraživanja za tisak hrane u svemiru. Vosak se upotrebljava u najviše slučajeva kao smjesa sa nekim drugim materijalom, a služi često i kao potporna struktura.
- Materijali s efektima – To su većinom kompozitni materijali koji se sastoje od smjese dva ili više materijala. Sposobnost 3D tiska da se tiska predmet sa kombinacijom više materijala je vrlo važno za korisnike. Takvi kompoziti imaju sposobnost oponašanja drugih materijala, pa se ispisom predmeta dobiva imitacijski efekt. Na tržištu se trenutno nudi se više takvih materijala, a ponajviše se nude kompoziti drveta, metala, gume, pa i kamena u kombinaciji sa plastikom ili voskom (Slika26.) [62][63].



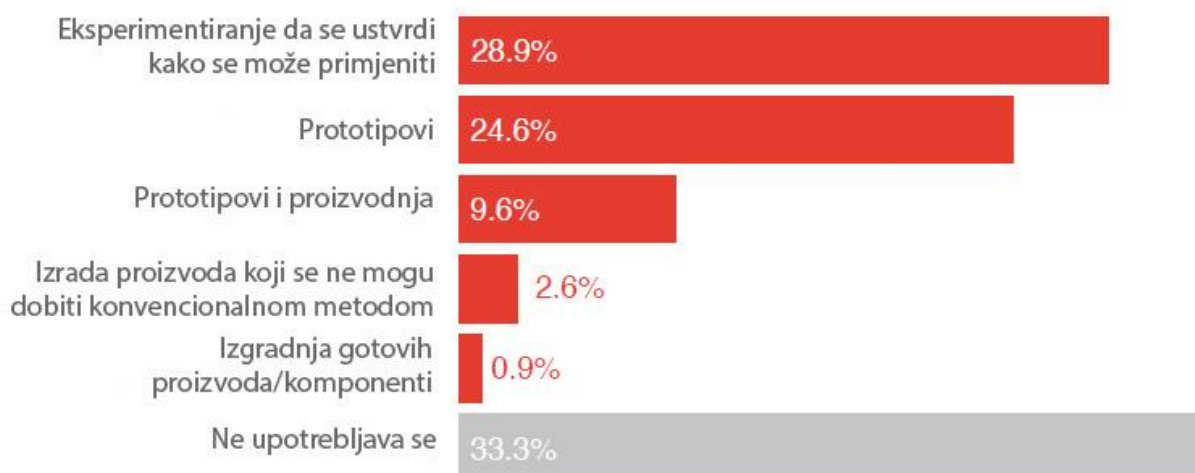
Slika 26. Predmeti izrađeni 3D tiskom na bazi drveta, kamena i metala

Izvor: <https://www.linkedin.com/pulse/top-20-insane-things-made-possible-because-3d-printer-humera->

2.9. Budućnost aditivne tehnologije

Tehnologija 3D ispisa je trebala jedan duži period da se kvalitetno probije na tržište. Razlog tomu su bili nerealno skupi strojevi koji su tiskali samo dijelove prototipa sa ograničenim materijalima. Nekoliko tehnoloških postignuća promijenilo je sliku 3D tiska u svijetu. Svakako jedan od najvažnijih faktora je RepRap otvoreni sustav printera koji su se pretvorili u tzv. stolne pisaače koji su znatno smanjili cijenu koštanja 3D printera. U jednom istraživanju, dvije trećine od 100 industrijskih proizvođača koristi tehnologiju aditivne proizvodnje (Slika27.). Međutim i dalje najveći postotak primjene spada na brzu izradu prototipova. Tvrtka za istraživanje tržišta Canalys predviđa porast prihoda 3D tiska na globalnom tržištu, sa 2,5 milijardi \$ koju je imao 2013., na 16,2 milijarde u 2018. Godišnja stopa rasta se procjenjuje na 45,7%. Unatoč dobrim pokazateljima, 3D tehnologija se suočava sa velikim izazovima. Brza proizvodnja prototipova će ostati važno područje primjene u industriji, međutim od nje se ne očekuje mogućnost da proizvodi dovoljno velike proizvode sa dovoljnom brzinom.

Industrija 3D tiska se stoga okreće produkciji gotovih proizvoda ili komponenti koji nadmašuju veličinu prototipa. Zadatak tehnologije 3D tiska je da što više zamjeni tradicionalnu metodu izrade proizvoda i da olakša i ubrza proizvodnju istih [55].



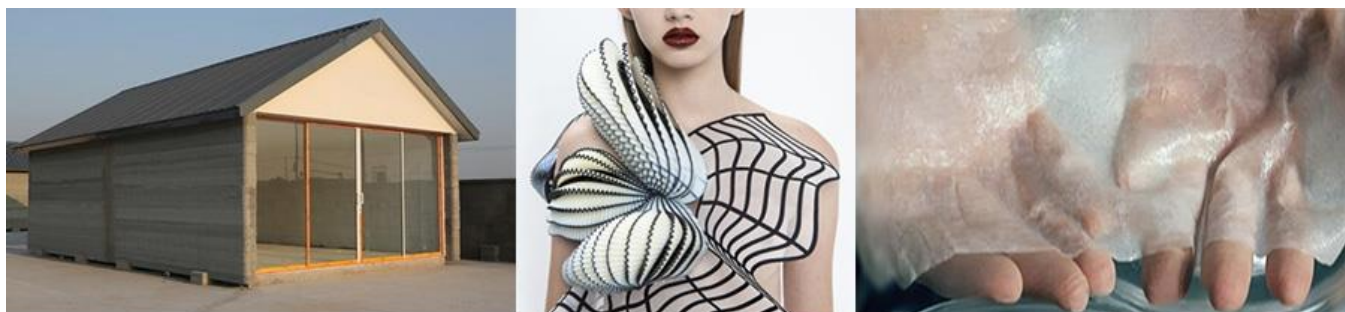
Slika 27. Industrijsko korištenje 3D tehnologije tiska 2014.

Izvor: <http://www.pwc.com/us/en/technology-forecast/2014/3d-printing/features/future-3d-printing.html>

Tehnologija može napredovati u sva tri područja koja obuhvaćaju 3D tisak. Napredovati mogu pisači i metode tiskanja, softver za dizajn te materijal koji se upotrebljava. Očekuje se proizvodnja 3D strojeva još boljih karakteristika, koji bi mogli tiskati rezervne dijelove čak i za vlastito kopiranje. Tako što se već primjenjuje u vojnoj tehnologiji. Da bi 3D tisak puno ozbiljnije zaprijetio konvencionalnoj proizvodnji, te da bi se masovnije koristio potrebno je poboljšanje još mnogih parametara. Danas na tržištu postoje „high-end“, vrlo skupi 3D strojevi koji su samo za industrijsku potrebe i za specijalne narudžbe i low-end“ 3D strojevi otvorenog tipa koji se koriste za jednostavnije radnje. Da bi se smanjila razlika između takva dva sustava, potrebno je povećanje brzine, rezolucije, autonomnog rada, jednostavnosti korištenja, pouzdanosti i ponovljivosti. Prijeko je potrebno pronaći način da se tiska i miješa više materijala istovremeno za isti objekt. Industrija 3D tiska radi na tome da naprave strojeve i iskoriste materijale koji bi mogli proizvoditi što više gotovih proizvoda za masovnu primjenu, poput baterija, različitih senzora i elektroničkih naprava. Prije nekoliko godina teško se moglo i zamisliti da će pojedini 3D printeri koštati manje pod 1000\$. Danas je realna situacija da se jednostavno može pronaći 3D printer ispod 1000\$.

Međutim problem je u tome što su većina tih strojeva na bazi FDM tehnologije i što su ograničeni u mnogo aspekata. Brzina 3D tiska stvara velike prepreke za masovnu proizvodnju, pa se pronalaze rješenja u vidu povećavanja broja ispisnih glava u 3D printeru koji bi mogli ispisivati više različitih materijala u više boja, optimalizacijom dizajna, korištenjem kvalitetnijih komponenti i instalacija jačih lasera. Već danas postoje 3D printeri sa dvije glave poput pisača „Roboxa“. Pokušavaju se riješiti problemi sa tiskanjem velikih dimenzija, te se najavljuje mogućnost tiskanja komponenti polimera sa čak deset puta većim dimenzijama od dosadašnjih i čak petsto puta brzi tisak od dosadašnjeg. Isto tako razvoj aditivne tehnologije ide u smjeru osmišljavanja pametnijeg 3D sustava u stroju koji bi korigirao elemente ljudske pogreške. Želi se postići izravna interakcija između 3D stroja i čovjeka prilikom tiska, na način da se informacije o procesu ispisa nalaze na ekranu te se eventualne greške mogu u procesu korigirati. Na taj način 3D tisak povećava svoju pouzdanost. Postoje slučajevi kombinacije 3D tehnike i konvencionalne metode izrade. Jedan takav je 3D iRobot koji vrši usluge glodanja, bušenja i sl. [55][62].

3D tisak je definitivno uveo pravu revoluciju u svijetu, a mnogi stručnjaci ovakvu tehnologiju nazivaju trećom industrijskom revolucijom. Neki od najzanimljivijih primjera su kuće od 3D tiska, odjeća i kožne stanice u medicini(Slika 28.)



Slika 28. 3D tiskana kuća, odjeća i kožne stanice

Izvor: <https://i.materialise.com/3d-printing-materials>

Visoka očekivanja u 3D tehnologiji tiska se očekuju zbog brzih inovacija na tržištu. Međutim inovacije i brži razvoj aditivne 3D tehnologije ne mogu daleko ići sa velikom razlikom između „high-end“ i „low-end“ printera, odnosno profesionalnih, vrlo skupih i običnih stolnih 3D pisača. S toga je ključni potez apliciranje na tržište što više 3D strojeva srednjeg ranga koji bi bili savršen balans između skupih i jeftinih printera, a koji bi se mogli najviše razvijati. Definitivno 3D tisak očekuje blistava budućnost [55].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Dio rada koji obuhvaća eksperiment odnosi se na proces 3D tiska FDM (eng. Fused Deposition Modeling) tehnologijom. FDM tehnologija spada u skupinu tehnologije aditivne proizvodnje koja radi na principu taloženja sloj na sloj. Materijali koji su se upotrijebili za potrebe 3D tiska u radu su materijali sa efektima imitacije dugih materijala. Svi materijali su kompozitni, odnosno mješavina dva ili više različitih materijala. Metodologija obuhvaća proces analize 3D tiska, odnosno cijelog postupka 3D tiska do izrade konačnog proizvoda. Konačni dobiveni proizvodi će se pomno analizirati, u vidu subjektivne procjene autora i objektivnim ispitivanjem anketara. Cilj ankete u eksperimentalnom dijelu je dokazati činjenicu da su materijali sa efektima u 3D tisku jedna mala revolucija koja ima velik potencijal. Hipoteza se postavlja na činjenici da 3D tisak može zaista izrađivati vjerne replike materijala. Na takav način se može znatno povećati interes kupaca, a vjerojatno privući i neke veće dobavljače. Činjenica je i ta da se danas materijali razvijaju brže nego ikad, odnosno uspješno se apliciraju različiti materijali u jednu komponentu. Posebni materijali koji su potrebni za ovakav eksperiment nisu još dovoljno dostupni niti cjenovno povoljni da bi se počeli masovno koristiti. S toga, još jedan od ciljeva ovoga rada je na neki način pokrenuti još veći interes kod ljudi koji se bave 3D tiskom u svrhu poboljšanja usluge

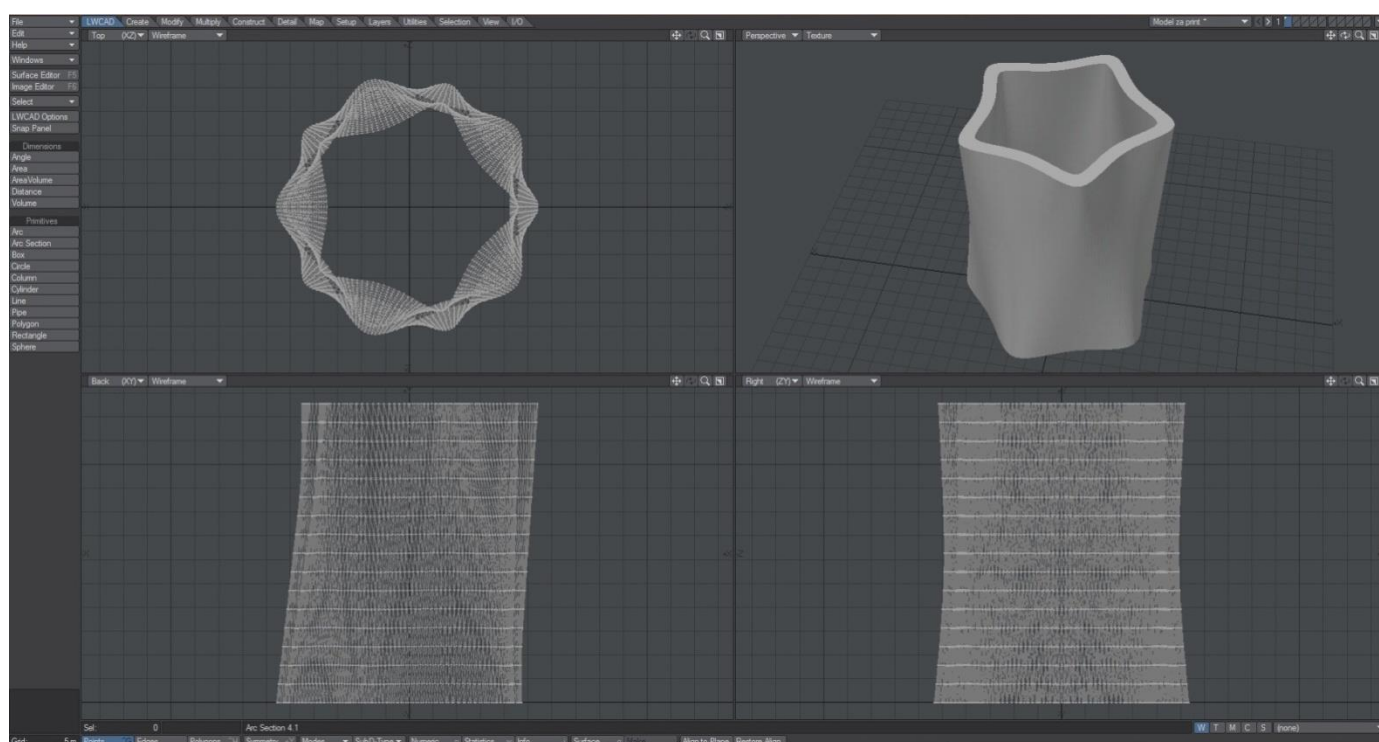
3.1. Praktični dio

Praktični dio se odnosi na 3D tisak materijala s efektima sa FDM tehnologijom 3D tiska. Odnosi se na cijeli dio postupka tiska, od početnog dizajnerskog rješenja stvaranja modela, do završne izrade. Cilj u ovom praktičnom dijelu je bio dobiti proizvode koji imaju sposobnost oponašanja drugih materijala uz pomoć imitacijskih efekata. Još jedan cilj je bio, a to je da se ispitaju mogućnosti FDM tehnologije na jednostavnom stroju kroz karakteristične materijale. Za praktični dio se koristilo šest različitih materijala na

bazi polimera, odnosno manjih uzoraka materijala koji su u kompozitnim smjesama sa nekim drugim materijalom.

3.1.1 Izrada 3D modela i pokretanje procesa 3D tiska

3D printer koji se koristio za tisak je MakerBot Replicator 2x. 3D model nacrtan je u programu Newtek LightWave 2015.3 (Slika 29.), a priprema za tisak obavljena je u MakeBot MakerWare 2.4.1.24. (Slika 30.). Model je poligonalan, ima 10,880 poligona i napravljen je smrzavanjem SubPatch teselacije jednostavnog geometrijskog oblika. Dimenzije su 55x63x54 mm, volumen je 24.46 cm³.

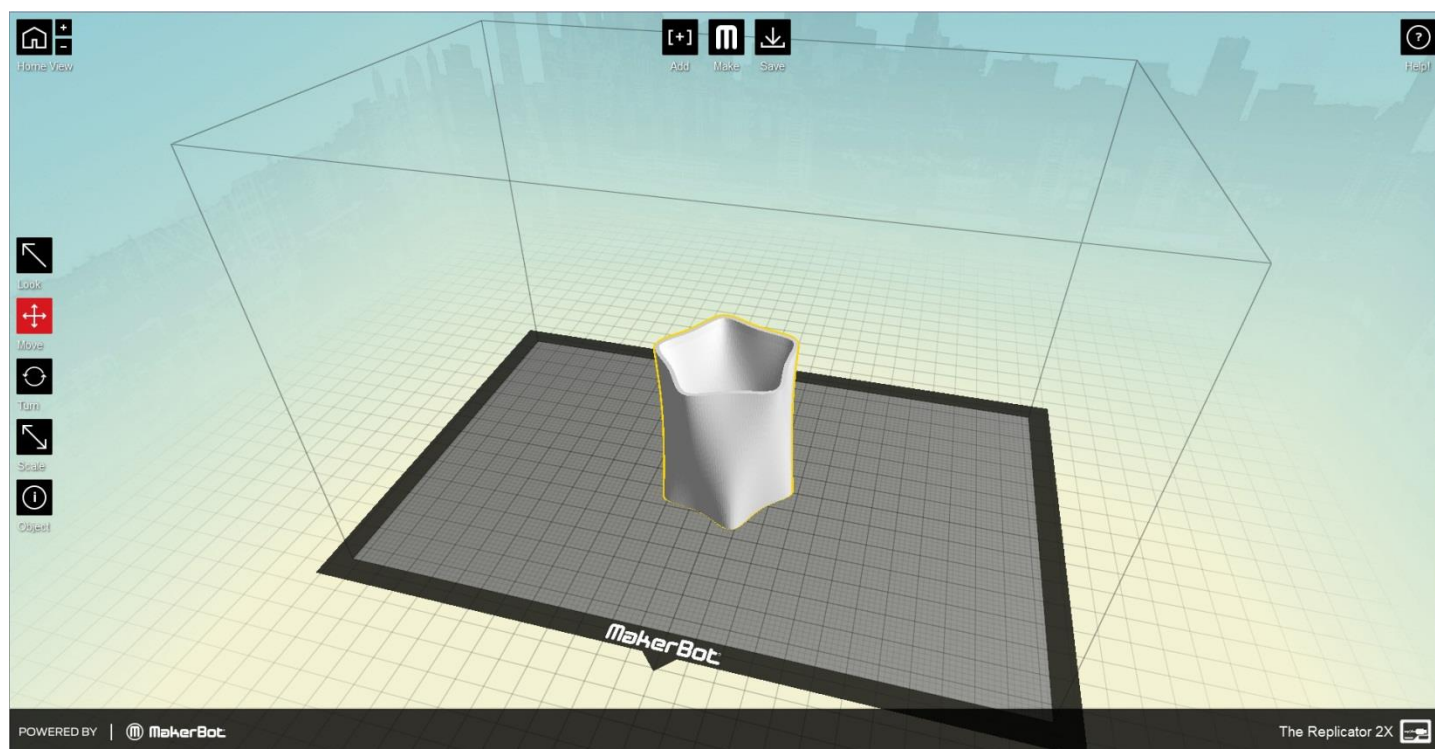


Slika 29. 3D model nacrtan u programu Newtek LightWave 2015.3

Izvor: Vlastiti rad autora

Model je pozicioniran uspravno na središtu radne plohe 3D printera. Pošto su svi materijali bazirani na PLA plastici, tiskani su sa jednakim postavkama: temperatura ekstruzije 210 C, temperatura podloge 60 C, visina sloja 0.3 mm, debljina mlaznice 0.4

mm, brzina tiska prvog sloja 15 mm/s, brzina tiska ispune 80mm/s, brzina tiska unutarnjih ljuski 70 mm/s, brzina tiska vanjske ljuske 60mm/s.



Slika 30. Priprema za tisk u programu MakeBot MakerWare 2.4.1.24.

Izvor: Vlastiti rad autora

Postavke modela su: 3 ljuske, 3 sloja poda, 3 sloja krova, heksagonalna ispuna 50%. Sve ostale postavke ostavljene su na početnim vrijednostima. Trajanje tiskanja traje 83 minute.

Proces izrade modela i tiska ide na slijedeći način ; Prvo se u programu za 3dD modeliranje napravi model. Spremi se kao obj. ili stl. objekt. Obj. je primjeren ako je neki jednostavniji model u pitanju, stl ako je neka kompleksna geometrija. Model se zatim učita u MakerWare, gdje se pomoću alata za transformaciju pozicionira i rotira na željeno mjesto na radnoj površini printera. Odabiru se postavke uslojavanja, postoje preseti za različite kvalitete tiska, ako se želi definirati način uslojavanja prema vlastitim željama postoji opcija za direktno editiranje tekstualne datoteke koja sadrži sve varijable koje definiraju proces. Zatim se pokrene uslojavanje i dobije se vizualizacija gcode-a koja pokazuje točno kako će se ekstruder kretati i polagati plastiku.

Ako smo zadovoljni spremimo gcode u poseban format koji MakerBot koristi na SD kartici koja se ubaci u printer i pokrene se proces 3D tiska.

3.1.2. Materijali s efektom imitacije

Materijali koji su korišteni za ovaj rad su manji uzorci određenih imitacijskih materijala. Dužina uzoraka se proteže između pet i deset metara, ovisno o materijalu. Takve veličine su dovoljne za potrebe izrade manjih ali stabilnih proizvoda. Korišteni materijali su:

- Polimerno drvo -PolyWood (PWOOD)

Kao što naziv govori, radi se o materijalu koji imitira drvo, međutim u sebi ne sadrži nikakve sastojke drveta. Smeđe je boje, priloženi uzorak je veličine presjeka 1,75mm a dužine 10m. U većini slučajeva drveni imitacijski materijali se sastoje od mješavine polimera i drveta u prahu. Međutim Poly Wood je iznimka jer umjesto drveta koristi posebni polimer koji se pravi tehnikom pjenjenja koji daje gotovo savršen izgled drveta. To se potvrdilo i otiskivanjem Poly Wood materijala za potrebe rada.(Slika 31.) Opravdao je sva očekivanja u praktičnom dijelu, tako da ispisani proizvod ima lijep izgled drveta i praškastu strukturu. Prednost ovog materijala je taj što daje vjerne replike i da ne stvara stepenastu strukturu, što do pojave ovakvog materijala nije bio slučaj. Poly Wood je za sada prvi i jedini na tržištu koji koristi pjenasti materijal. Gustoća materijala mu je u prosjeku 0,8 g / cm³, pa ga čini lakšim i do 35-40 % od običnih PLA (eng. Polylactic) materijala. Na taj način je još sličniji drvetu, a ima i potencijal za uporabu kod laganih konstrukcija, membrana i prigušnih uređaja. Sa naknadnom obradom postaje čak vodo-nepropustan. Proizvođači Poly Wood materijala tvrde da pjenastom metodom mogu stvoriti bilo koju boju koja je potrebna. S toga takav način proizvodnje materijala predstavlja zaista malu revoluciju u 3D tisku [64].



Slika 31. Proizvod tiskan Poly Wood (Polimernim) materijalom

Izvor: Vlastiti rad autora

- „Kolonijalna boja“ (EasyWood-Ebony)

EasyWood predstavlja tzv. kolonijalnu boju, odnosno lijepe tamno smeđe do crne boje od drvenih niti koji omogućavaju prilikom ispisa elegantne linije bez stepenica i nabora, što se i dokazalo nakon završetka njegovog otiska. Ovaj uzorak se sastoji od mješavine 40% mljevenih drvenih čestica i 60% polimera. Materijal posjeduje dobra svojstva, jednostavno se tiska, ima nizak faktor skupljanja te se ne deformira nakon hlađenja. Još jedna velika prednost Ebony materijala je da ne zahtijeva grijanu radnu površinu. Dužina Ebony uzorka koji se koristio u ovom radu je 10m a njegov presjek 1,75mm. Dobiveni praktični rezultati tiska EasyWood Ebony materijala potvrđuju činjenice koje su navedene u opisu materijala. Dobile su se ravne linije na površini strukture, sa elegantnom crnom bojom a prati ga ugodan miris drveta (Slika 32.). Odlikuje ga široka primjena i neotrovnost materijala. Površina Ebony je blago gruba pa oponaša drvo još vjernije [65].



Slika 32. Proizvod tiskan Ebony (crno drvo) materijalom

Izvor: Vlastit rad autora

- **Boja kokosa (Easywood –Coconut)**

Radi se o materijalu koji također oponaša drvo, ali u ovom slučaju drvo kokosa. Sastoji se od mješavine 40% usitnjenog praha kokosa i 60% polimernog materijala. Materijal od koksa je puno tvrdi od prethodno navedenih materijala, ima grublju površinsku strukturu i jednostavno se tiska. Kokosovo drvo je samo o sebi izrazito čvrsto i otporno je na vlažnu tropsku klimu. Isto tako daje ovom materijalu čvrstoću, nepropusnost i otpornost na vlagu. U tom području se bitno razlikuje od drugih drvenih materijala. U praktičnom dijelu tiskanja materijala sa smjesom kokosa, dobio se vrlo lijep proizvod koji gotovo savršeno oponaša drvo, a ima i ugodan drveni miris (Slika 33.). Ima fine linije i blago grubu površinu. Pogodan je za ispisivanje i potencijalno ima veliku primjenu kao dekoracija ili funkcionalan proizvod [66].

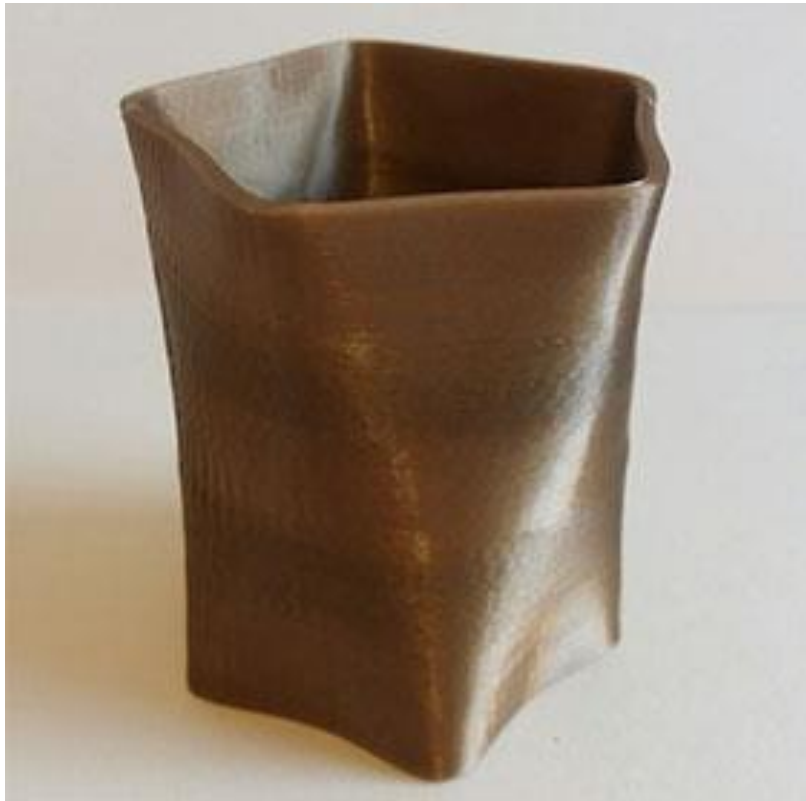


Slika 33. Proizvod tiskan kokos materijalom

Izvor: Vlastiti rad autora

- **Brončano- zlatni materijal (Bronze Gold)**

Bronze Gold, u prijevodu brončano zlato je materijal na bazi PLA koji ima veliku snagu i izdržljivost. Ima fantastičnu sposobnost lijepljenja na ranu površinu niske temperature, ali zahtijeva grijanu podlogu. Materijal je čvršći i manje krhak u odnosu na redovne PLA materijale. Jednostavan je za ispis na niskoj temperaturi, ima malo savijanje, biorazgradiv je i nema mirisa. Ima sposobnost izdržati udar od $7,5\text{kJ/m}^2$. U praktičnom dijelu se pokazalo da tiskani materijal sa efektom brončano-zlatne boje ima dobru linijsku strukturu i veliku čvrstoću kao što proizvođač navodi (Slika 34.). Dužina materijala je 10m a širina 1,75mm. Dobio se proizvod koji daje upravo jednu posebnu brončano-zlatnu boju koja dodatnom obradom može izgledati savršeno. Postignut rezultat 3D tiska ovim materijalom pokazuje da ovaj uzorak radi jako dobre efekte metala i da izgleda postojano [67].



Slika 34. Proizvod tiskan Brončano-Zlatnim materijalom

Izvor: Vlastiti rad autora

- Orion Plava čaša (Orion Blue t-glasse)

Radi se o snažnom i jednostavnom materijalu za ispis na bazi PLA. Orion plava boja ovog materijala je zamišljena kao boja koja će imati efekt stakla i koja može imati funkciju čaše ili nekog drugog premeta koja je u doticaju sa hranom, jer je zdravstveno odobrena od strane FDA (Američka zdravstvena organizacija). Ne skuplja se u procesu tiska i ima odlične sposobnosti premošćivanja temperature tijekom tiska. Orion plava čaša je jednostavna za ispis pa je pogodna za gotovo sve FDM 3D pisaače. Pored toga jako je izdržljiva, pa se sa ovakvim materijalom želi ići u masovniju proizvodnju. PLA materijal za ovakve namjene je 100% biorazgradiv i ne pušta pare prilikom ispisa. Zbog takvih svojstava vrlo je primamljiv tržištu. U praktičnom radu se ovaj plavi PLA materijal (Slika 35.) pokazao kao vrlo tvrd materijal za ispis ali u konačnici ima dobre strukture uz malu obradu. Upotrijebljen uzorak je imao 10m dužinu i 1,75mm debljinu.

Gotov proizvod ima ponešto veće stepenaste strukture ali uz dodatnu obradu ostavlja dojam da se radi o staklu u boji [68].



Slika 35. Proizvod tiskan Orion blue materijalom

Izvor: Vlastiti rad autora

- Obična PLA plastika

Materijal koji se najviše upotrebljava za jednostavne proizvode na bazi FDM tehnologije je upravo obična PLA plastika. Jednostavna je za primjenu, ima dobra svojstva i što je najvažnije najjeftiniji je dostupan plastični materijal na tržištu. Svi ovi prethodno nabrojani kompozitni materijali su duplo ili više skuplji od običnog PLA. Tiskani PLA proizvod nema neke posebne efekte niti je materijal koji se često koristi za izradu dekoracija. Ispisani dijelovi imaju grublju površinsku strukturu pa je gotovo uvijek potrebna dodatna obrada. Sa dodatnom obradom se naprotiv mogu dobiti jako dobri efekti koji uklanjaju klasične PLA greške. Jedan takav primjer je u ovom praktičnom radu gdje se koristio obični bijeli PLA uzorak od 10m dužine i 1,75mm

debljine (Slika 36.). Nakon tiska podvrgao se metodi obrade uranjanjem u posebnu otopinu (na bazi acetona) koja je grube površinske strukture pretvorila u gladak materijal. U konačnici se dobio proizvod koji daje lijepi efekt keramike. S tim se željelo pokazati da se sasvim običan materijal može pretvoriti u materijal sa efektom [69].



Slika 36. Proizvod tiskan bijelim PLA materijalom

Izvor: Vlastiti rad autora

3.2. Metodologija i plan istraživanja

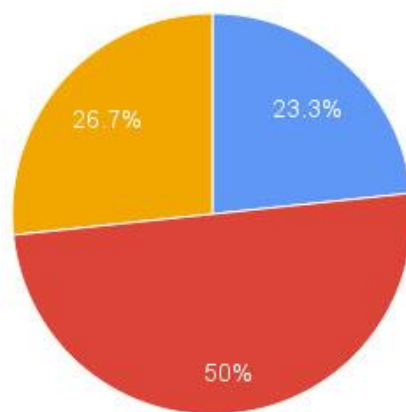
Teorijski i praktični dio je prethodno apsolviran, potvrđene su postavljene hipoteze kroz praktični dio rada koji je uključivao tiskanje materijala sa efektima. Da bi se dobila šira, objektivnija slika tiskanih proizvoda, potrebno je uraditi anketu. U radu će se prikazati rezultati anketnog online upitnika u obliku grafikona u postocima. Anketa sadržava 10 pitanja, sa po 4-7 ponuđenih odgovora, a polovina ankete uz pitanja i odgovore ima ponuđenu fotografiju proizvoda. Drugi dio ankete nema fotografije, ali se pitanja i odgovori izravno odnose na slike iz prvog dijela ankete, odnosno prvih 6 pitanja.

Broj anketiranih je 30, odnosno uzorak od 30 ljudi. Online anketa uključuje pretežno mlađi dio populacije, a anketa je trajala dva dana. Naslov ankete je naziv diplomskog rada; Svojstva i vizualna analiza proizvoda izrađenih 3D tiskom.

3.2.1. Anketni upitnik

1. Pitanje

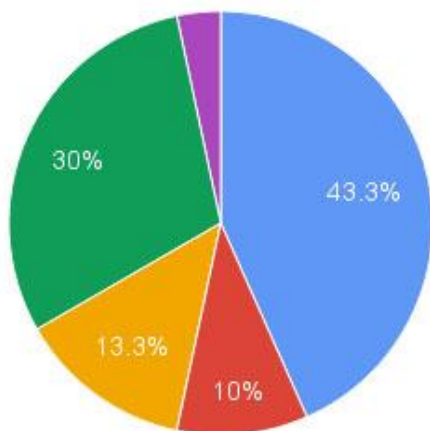
Od kakvog materijala je izrađen ponuđeni proizvod?



1. PLASTIKA /
2. METAL /
3. DRVO 23.3%
4. STAKLO /
5. OPEKA 50%
6. NEKI DRUGI MATERIJAL 26,7%

2.Pitanje

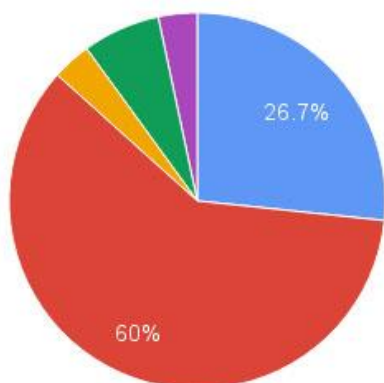
Od kakvog materijala je izrađen ponuđeni proizvod?



1. PLASTIKA 13,3%
2. METAL 1%
3. DRVO 43,3%
4. STAKLO/
5. OPEKA 10%
6. NEKI DRUGI MATERIJAL 30%

3. Pitanje

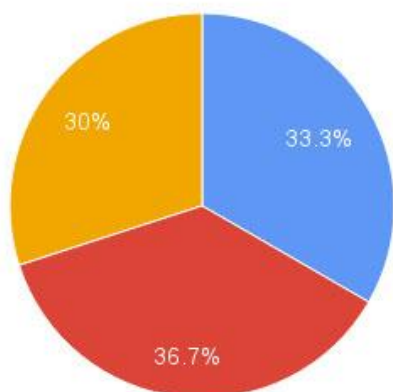
Od kakvog materijala je izrađen ponuđeni proizvod?



1. PLASTIKA 60%
2. METAL 26,7%
3. DRVO 3,3%
4. STAKLO /
5. OPEKA 3,3%
6. NEKI DRUGI MATERIJAL 6,7%

4. Pitanje

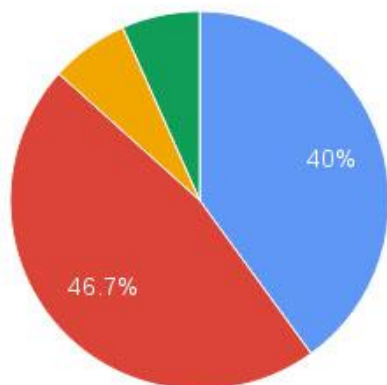
Od kakvog materijala je izrađen ponuđeni proizvod?



1. PLASTIKA 36,7%
2. METAL 30%
3. DRVO /
4. STAKLO /
5. OPEKA /
6. NEKI DRUGI MATERIJAL 33,3%

5. Pitanje

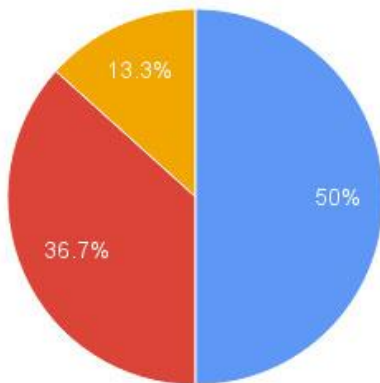
Od kakvog materijala je izrađen ponuđeni proizvod?



1. PLASTIKA 40%
2. METAL 6,7%
3. DRVO /
4. STAKLO 46,7%
5. OPEKA /
6. NEKI DRUGI MATERIJAL 6,7 %

6. Pitanje

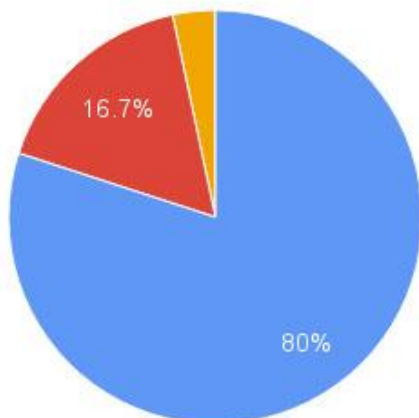
Od kakvog materijala je izrađen ponuđeni proizvod?



1. PLASTIKA 50%
2. METAL /
3. DRVO /
4. STAKLO 36,7%
5. OPEKA /
6. NEKI DRUGI MATERIJAL 13,3 %

7. Pitanje

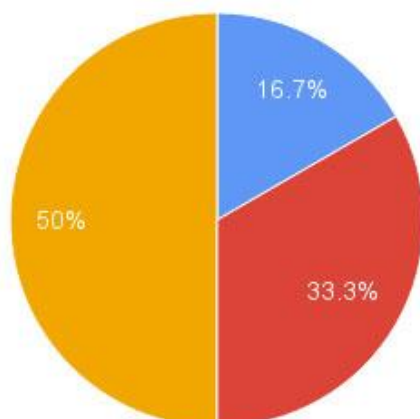
Kojom tehnikom su izrađeni ponuđeni proizvodi?



1. KONVENCIONALNOM METODOM (KLASIČNOM IDUSTRIJSKOM) 16,7%
2. DIGITALNIM TISKOM /
3. 3D TISKOM 80 %
4. NEKOM DUGOM TEHNIKOM 3,3%

8. Pitanje

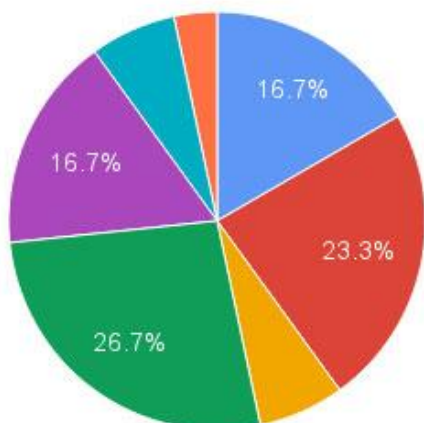
Koliko kvalitetno izgledaju ponuđeni proizvodi?



1. IZGLEDAJU JAKO KALITETNO 33,3%
2. SREDNJE KVALITETE 50%
3. LOŠE KVALITETE /
4. NE MOGU PROCIJENITI 16,7%

9. Pitanje

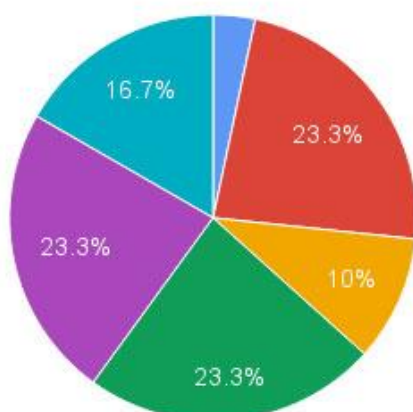
Koji od ponuđenih proizvoda izgleda najkvalitetnije?



1. PLA POYWOD MATERIJAL 16,7 %
2. CRNO DRVO EBONY PLA 6,7 %
3. DRVO KOKOSA-EBONY PLA 6,7 %
4. BRONCA-ZLATO PLA 23,3 %
5. PLAVA ČAŠA PLA 16,7 %
6. BIJELI PLA 26,7 %
7. NITI JEDAN NE IZGLEDA DOVOLJNO KVALITETNO 3,3 %

10. Pitanje

Koji od ponuđenih proizvoda izgleda najskuplje?



1. PLA POYWOD MATERIJAL 3,3 %
2. CRNO DRVO EBONY PLA /
3. DRVO KOKOSA-EBONY PLA 3 %
4. BRONCA-ZLATO PLA 23,3 %
5. PLAVA ČAŠA PLA 23,3 %
6. BIJELI PLA 23,3 %
7. NE MOGU PROCIJENITI 16,7 %

4. REZULTATI I RASPRAVA

U teorijskom dijelu se govori o početku 3D tiska, od izrade početnih prototipova do gotovih proizvoda koji se danas nude. Opisan je cijeli proces razvoja aditivne proizvodnje 3D tiska kroz prizmu stvaranja novih tehnologija. Razvojem novih 3D tehnologija, usporedno su se razvijali i materijali za tisak. Međutim u radu se pokazalo da 3D tisak od samog početka nije naglo rastao niti je izbacivao nove modele. Na tržištu ga gotovo nije ni bilo, koristio se samo za specijalizirane usluge tiskanja SLS tehnologijom. Takva tehnika je još i danas jako skupa, a cijena takve tehnologije prije dvadeset godina se može samo zamisliti. Početkom 21. stoljeća otvorila su se širom vrata za 3D tehnologiju koja je mahom izbacivala nove tehnike. Do danas razvoj se nije prekidao osobito razvojem RepRap uređaja koji su zasigurno unijeli pravu revoluciju u 3D tisak.

Uvođenjem takvih strojeva na tržište, pokazalo se da je konačno pala i cijena 3D tiska, pa je puno dostupniji širokim masama. Industrija aditivne tehnologije je jedna od najbrže rastućih po svim kategorijama. Profit im se u zadnjih nekoliko godina višestruko povećao a tehnološka dostignuća na to polju nisu još ni blizu svog kraja. Zrakoplovna, automobilska i svemirska industrija u posljednjih nekoliko godina su duboko proteže sa 3D tehnikom izrade proizvoda ponajviše zbog jednostavne izrade vrlo složenih i kvalitetnih dijelova. U teorijskom dijelu se prikazuju sve prednosti i nedostaci najboljih aditivnih tehnologija današnjice. Između ostalih treba istaknuti stereolitografiju i lasersko srašćivanje metala, kao dvije najrazvijenije i najjače aditivne tehnologije. Za ovaj rad se koristila FDM tehnologija koja se krasi jednostavnošću i brzinom.

Eksperimentalni dio se sastoji od praktičnog dijela rada koji je uključivao proces tiskanja šest uzoraka (10x1,75mm) materijala s efektima koji su se tiskali FDM metodom tiska. Svi tiskani materijali su na bazi polimera, ali svaki su u stvari kompoziti koji sadrže još jedan dodatni materijal. Sa dodatnim materijalom se stvara efekt kojim se oponaša neki drugi materijal, odnosno daje „lažnu“ sliku a prekriva svoju pravu unutrašnjost. Tiskani materijali u ovom radu su potvrdili sve pretpostavke i hipoteze, te da mogu zaista vjerno prikazivati neki drugi materijal. Tiskani materijali u ovom radu daju efekte drveta, opeke, bronce, stakla i metala. Vrlo vješto sakrivaju svoj pravi identitet a upravo je i cilj ovog rada bio dokazati sposobnost takvih materijala. Osim što daju dobre efekte, tiskani materijali iz praktičnog dijela imaju vrlo dobru kvalitetu i postojanost. Jedan od tiskanih uzoraka je čaša od plavog PLA materijala koja ima 100% razgradivu strukturu i može se upotrebljavati u kućanstvu. Jako je čvrsta i lagana, a stvara dojam da se radi o plavoj staklenoj čaši. Svakako jedna od najzanimljivijih činjenica je uzorak PolyWood od PLA materijala koji u sebi ne sadrži nikakve čestice drveta a u konačnici daje lijep efekt drveta, dok ostali materijali s efektom drveta u sebi sadrže određen postotak drveta. Pored ovih kompozitnih uzoraka, u radu se tiskao i jedan običan bijeli PLA uzorak koji se u konačnici pokazao kao proizvod koji daje lijep efekt porculana, ali uz malu dodanu obradu. Velika je i razlika u cijeni između običnih i kompozitnih PLA materijala. Prvenstveno što se kod kompozitnih koristi više materijala i što imaju često kvalitetniju strukturu od običnih.

Međutim u radu se pokazao način na koji se s običnim materijalom može dobiti poseban efekt imitacije. Tiskao se i PLA uzorak bronca-zlato koji daje sjajne efekte i izgleda konzistentno. Ostavlja dojam da se radi o metalu a u sebi ne sadrži nikakve čestice metala. Dokazala se hipoteza koja pretpostavlja da su ovakvi materijali sposobni dobro odraditi ulogu zamjenskog materijala uz puno manju cijenu koštanja. Da su se izrađivati pravi proizvodi koje oponašaju ovi uzorci, onda bi to bio daleko skuplji proces. Svi materijali su se tiskali bez problema i jednostavno, a to u procesu 3D tiska znači puno. Još jedna potvrda dobre strane ovakvih materijala da ne zahtijevaju posebnu obadu na kraju ispisa.

U eksperimentalnom dijelu se pristupilo online anketnom upitniku na uzorku od 30 ispitanika. U deset postavljenih pitanja ponuđene su i fotografije svih šest tiskanih uzoraka. U prvom dijelu ankete pitanja su se odnosila na materijal od kojeg su se proizvodi tiskali. Ponuđeno je bilo pet različitih materijala i šesta opcija da se radi o nekom drugom materijalu. Od ponuđenih su redom išli: plastika, metal, drvo, staklo, opeka i neki drugi materijal. U prvom pitanju se radi o PLA plastičnom uzorku koji se sastoji od posebnog polimernog materija. Rezultati ankete za prvo pitanje su zanimljivi jer nitko od ispitanika nije pogodio da se radi o vrsti plastike. 50% njih smatra da se radi o opeci 26, 7% da se radi o nekom drugom materijalu a 23,3% da se radi o drvu. Potvrdila se činjenica da ovaj materijal potpuno skriva svoju pravu kemijsku strukturu te je ispitanike navela na potpuno pogrešne odgovore. U drugom pitanju ponuđen je PLA uzorak sa mješavinom crnog drveta. U ovom dijelu su ispitanici bili puno bliže činjenici, pa 43,3% njih misli da se radi o drvetu, da se radi plastici njih 13,3% misli, a da se radi o nekom drugom materijalu misli 30% ispitanika. Ovaj uzorak se pokazao kao vrlo tajanstven i neodređen jer je istraživanje pokazalo dosta podijeljena mišljenja, međutim većina je pogodila da se radi o vrsti drveta i plastike. U trećem pitanju je ponuđen tiskani PLA proizvod na bazi koks drveta. Najviše ispitanika je mislilo da se radi o vrsti plastike, njih 60% što je točno, ali je zanimljivo što njih 26,7% misli da se radi o metalu. Da je od drva misli tek 3,3% . Ovaj uzorak je pokazao višestruku sposobnost imitacije. Četvrto pitanje je imalo proizvod od bronca-zlato. Ispitanici su najviše dali glas da se radi o plastici, 36,7%, da je od metala misli 30% a od nekog drugog materijala 34%. U ovom dijelu su ipak pogodili, međutim velik dio smatra da se radi o metalu.

S toga je ovaj PLA uzorak potvrdio svoj efekt imitacije ali ne toliko uvjerljivo kao drugi. U petom pitanju je ponuđen plavi biorazgradivi PLA proizvod. 46,7% ispitanika misli da se radi o staklu, 40% da je od plastike a 6,7% da je metal ili neki drugi materijal. S time se pokazalo da je ovaj uzorak dobar primjer imitacije stakla, a po nekima čak ostavlja dojam da se radi o metalu. U šestom pitanju ponuđen je bio obični bijeli PLA materijal. 50 % ispitanika je pogodilo da se radi o plastici ali njih 36,7 % misli da se radi o staklu. Pošto ovo nije kompoziti materijal on je više nego zadovoljio u smislu oponašanja drugog materijala. Da se radi o 3D tehnologiji tiska misli 80% ispitanika, 16,% misli da su izrađeni konvencionalnom tehnikom i ostatak da je neka druga metoda. Najkvalitetniji materijal za ispitanike ima obični PLA sa 26,%, na drugom mjestu je bronca-zlato 23,3% , zatim slijede sa po 16,7% PLA PolyWood i plavi PLA materijal. Na pitanje koji materijal izgleda najskuplje podjednako su dobili glasove plavi PLA 23,3%, bronca-zlato 23.3% i bijeli PLA23,3% dok ih 16,7% nije moglo procijeniti.

Ukupno gledano sa strane praktičnog rada i rezultata ankete, tiskani uzorci sa efektima su potvrdili činjenicu da se radi o materijalima koji imaju jako dobre efekte koji oponašaju materijale. Također tu se radi o materijalima koji mogu biti u puno široj uporabi zbog kvalitete materijala i jednostavnosti izrade. Ovakvi materijali su tek odnedavno stupili na tržište ali su brzo prepoznati. Definitivno će pokrenuti jedan val novi načina izrade materijala i tu će odigrati važnu ulogu.

5. ZAKLJUČAK

Pregledom rasprave rezultata mogu se potvrditi činjenice postavljene u hipotezi, da se FDM tehnologijom mogu dobiti proizvodi koji imaju dobre efekte imitacije. Kroz rad su se potvrdile činjenice o aditivnoj tehnologiji kao jednoj od najperspektivnijih područja primjene u industriji. Činjenica je da aditivna tehnologija tiska još nema toliko veliku uporabu, koliko zapravo nudi mogućnosti. Jedan razloga je visoka cijena 3D printera, međutim danas se situacija promijenila, cijena je pala pa je porastao i interes. U radu su prikazane najbolje metode 3D tiska i njihova primjena. Pokazalo se da je aditivna metoda uspješno aplicirana u velikim industrijama poput automobilske, zrakoplovne pa i svemirske. Na temelju novih tehnologija i razvoju materijala može se potvrditi još veći rast 3D tehnologije tiska kroz iduće razdoblje.

U radu se dokazalo da materijali igraju ključnu ulogu u razvoju 3D aditivne proizvodnje. Sa razvojem novih materijala, dolazi do razvoja novih strojeva i metoda 3D tiska. S obzirom da su plastične mase i polimeri dosegli davno svoj vrhunac u 3D tisku, danas se nastoji materijale od metala podići na novu razinu i povećati njihovu primjenu. Prepoznatom kvalitetom metala u aditivnoj proizvodnji, stvara se potpuno drugačiji pristup u industriji. Istraživanjem tržišta pokazalo se da aditivna metoda 3D tiska ima sve veći utjecaj u industrijskoj proizvodnji. Međutim činjenica je da se danas 3D tisak i dalje najviše koristi u proizvodnju prototipova. Novi načini izrade, novi materijali i veće brzine tiska su ključni faktori koji se trebaju u budućnosti poboljšati da bi se ozbiljnije ugrozila konvencionalna proizvodnja.

Dio praktičnog rada je uključivao tiskanje novih materijala sa efektima. Rezultati su se pokazali viši od očekivanog s obzirom da su to materijali u razvoju. Cilj je bio analiza proizvoda koji bi svojim izgledom oponašali druge materijale. Pokazali su se vjerodostojnim replikama od kvalitetnog materijala. Potvrđena je hipoteza da su ovakvi materijali dobra zamjena pravim materijalima i da su neusporedivo povoljniji. Anketa je dodatno potvrdila hipotezu i činjenice da funkcija materijala zaista služi svrsi. U anketi se pokazalo i nedovoljno poznavanje 3D tehnologije tiska, pa još jedan cilj ovog rada je bio ljudima što više približiti ovu relativno novu tehnologiju.

6. LITERATURA

- [1] Importance of employee training, dostupno na: <https://linespace.com/importance-of-employee-training/>, (19.06.2016.)
- [2] History of 3D Printing, dostupno na: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>, (28.06.2016.)
- [3] Century Printing: Not Just Ink on a Page, dostupno na: <http://politicsandpolicy.org/article/21st-century-printing-not-just-ink-page>, (1.07. 2016.)
- [4] <http://reprap.org/wiki/RepRap/hr>, (5.07.2017.)
- [5] <https://sh.wikipedia.org/wiki/RepRap>, (5.07.2016)
- [6] Institut za ambalažu i tiskarstvo: 3D revolucija se nezaustavljivo širi, dostupno na <http://www.ambalaza.hr/hr/croprint/2014/9/3d-revolucija-se-nezaustavljivo-siri,416,13838.html>, (6.07.2016.)
- [7] Krunić.S., Perinić M, Maričić S. (2010). Engineering review, Vol.30, No.2, (siječanj 2010), 91-100 str,
- [8] eFunda, Rapid prototyping, dostupno na: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm, (7.07.2016.)
- [9] Gajdaš I., Slota J. : Utjecaj uvjeta tiskanja na strukturu FDM prototipova-Technical Gazette 20, 2(2013), 231-236 str
- [10] Domazet Ž., Krstulović-Opara L. (2009.) *Dizajn Industrijskih proizvoda*, skripta, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split
- [11] Stratasys, Prototyping at a rapid race, dostupno na: <http://www.stratasys.com/solutions/rapid-prototyping>, (7.07.2016.)
- [12] Pilipović.A, Rujnić.M : *Svijet plastike i gume* (2013) - World of plastics and rubber, October Dusseldorf. 2013
- [13] 3D Porta, Što je STL, dostupno na: <http://www.3dporta.hr/index.php/3d-printeri/pitanja-i-odgovori/66-%C5%A1to-je-stl.html>, (12.07.2016.)
- [14] Bug, Digitalno u opipljivo, dostupno na: <http://www.bug.hr/bug/tekst/3d-pisaci/96618.aspx>, (12.07.2016.)
- [15] https://hr.wikipedia.org/wiki/Trodimenzionalni_ispis, (12.07.2016.)
- [16] 3D Printing from scratch, 8 steps of 3D printing process, dostupno na: <http://3dprintingfromscratch.com/common/3d-printing-process/>, (13.07.2016.)

- [17] Women ADRIA, 3D printanje- od ideje do proizvoda u nekoliko minuta, dostupno na: <http://www.womeninadria.com/3d-printanje-od-ideje-proizvoda-u-nekoliko-minuta/>, (14.07.2016.)
- [18] Metode rada i odabir materijala za 3D ispis, dostupno na: <http://www.tiskarstvo.net/tiskarstvo2011/clanciWeb/Sabati/SabatiMetodeRada.html>, (14.07.2016.)
- [19] 123 Print, dostupno na: <http://www.123print.hr/blog/postupci-3d-tiskanja-sterolitografija-sl/>, (14.07.2016.)
- [20] Live Science, What is Stereolithography, dostupno na: <http://www.livescience.com/38190-stereolithography.html>, (15.07.2016.)
- [21] <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>, (15.07.2016.)
- [22] Gradimo hr, Brza izrada prototipova: <http://www.gradimo.hr/clanak/brza-izrada-prototipova/15509>, (15.07.2016.)
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling, (17.07.2016.)
- [24] Live Science, Fused Deposition Modeling, dostupno na: <http://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>, (17.07.2016.)
- [25] Stratasys, Fused Deposition Modeling, dostupno na: <https://www.stratasysdirect.com/solutions/fused-deposition-modeling/>, (18.07, 2016.)
- [26] Live Science, What is Selective Laser Sintering, dostupno na: <http://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>, (19.07.2016.)
- [27] 123 print, Selektivno lasersko srašćivanje, dostupno na: <http://www.123print.hr/blog/postupci-3d-tiskanja-lasersko-srascivanje/>, (19.07.2016.)
- [28] https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering, (19.07.2016.)
- [29] Anubis 3D, Selective Laser Sintering, dostupno na: <https://www.anubis3d.com/technology/selective-laser-sintering/>, (20.07.2016.)
- [30] https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting, (21.07.2016.)
- [31] TWI, Selective Laser Melting, dostupno na: <http://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/additive-manufacturing/selective-laser-melting/>, (21.07.2016.)
- [32] Realizer slm, Selective Laser Melting, dostupno na: <http://www.realizer.com/en/startseite/selective-laser-melting/>, (21.07.2016.)
- [33] Powder transport and sieving in Am process, Advantages/ disadvantages of selective laser sintering, dostupno na: <https://powdertransport.wordpress.com/2014/03/02/advantagesdisadvantages-of-selective-laser-sintering/>, (21.07.2016.)
- [34] https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_metal_laser_sintering, (22.07.2016.)

- [35] Proto Labs, Direct Metal Sintering, dostupno na: <https://www.protolabs.com/3d-printing/direct-metal-laser-sintering/>, (23.07.2016.)
- [36] Core 77, Production Methods, dostupno na: <http://www.core77.com/posts/26457/Production-Methods-Whats-the-Difference-Between-Selective-Laser-Sintering-Direct-Metal-Laser-Sintering-Laser-Melting-and-LaserCusing>, (23.07.2016.)
- [37] 123 Print, dostupno na: <http://www.123print.hr/blog/postupci-3d-tiskanja-ebm/>, (23.07.2016.)
- [38] AMG, Electron Beam Melting, dostupno na: <http://web.ald-vt.de/cms/vakuum-technologie/anlagen/electron-beam-melting-eb/>, (24.07.2016.)
- [39] https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_beam_additive_manufacturing, (24.07.2016.)
- [40] BEAMIT, Electron Beam Melting, dostupno na: <http://www.beam-it.eu/en/tecnology/electron-beam-melting/>, (26.07.2016.)
- [41] Sciaky Inc, Electron Beam Additive Manufacturing, dostupno na: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/electron-beam-additive-manufacturing-technology> (26.07.2016.)
- [42] Electron Beam Welding [http](http://www.weldingengineer.com/1%20Electron%20Beam.htm), dostupno na: <http://www.weldingengineer.com/1%20Electron%20Beam.htm>, (28.07.2016.)
- [43] 3D Systems, What is Multy Jet Printing, dostupno na: <http://www.3dsystems.com/resources/information-guides/multi-jet-printing/mjp>, (28.07.2016.)
- [44] Hammer V. (2015). Procesni pristup tehnologiji 3D printanja, Završni rad, Fakultet Strojarsva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu,
- [45] Vadas I. (2016.). Aditivne tehnologije u medicini, Završi rad, Fakultet Strojarsva Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
- [46] https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing, (1.08.2016.)
- [47] Tiskarstvo, Metode rada i odabir materijala za 3D ispis [http](http://www.tiskarstvo.net/tiskarstvo2011/clanciWeb/Sabati/SabatiMetodeRada.html), (1.08.2016.)
- [48] Live Science, What is Laminated Object Manufacturing, dostupno na: <http://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>, (1.08.2016.)
- [49] RPC, Laminted Object Manufacturing, dostupno na: http://www.rpc.msoe.edu/machines_lom.php, (2.08.2016.)
- [50] Sculpteo, LOM: 3D printing with Layers of Paper, dostupno na: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>, (2.08.2016.)

- [51] AZO Materials, Laminated Object Modeling and Computer Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials, dostupno na: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1650>, (4.08.2016.)
- [52] https://en.wikipedia.org/wiki/Powder_bed_and_inkjet_head_3D_printing, (4.08.2016.)
- [53] Vrbanc A. (2011). Analiza dostupnih postupaka brze izrade prototipova, Diplomski rad, Fakultet Strojarstva Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku,
- [54] Šercer M., Jerbić B., Filetin T. (2008). Brza izrada prototipova i alata, Predavanje, Fakultet Strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu,
- [55] Pwc, The road ahead for 3-D printers, dostupno na: <http://www.pwc.com/us/en/technology-forecast/2014/3d-printing/features/future-3d-printing.html>, (7.08.2016.)
- [56] Marlin Steel, 3D Printig vs Traditional Manufacturing, dostupno na: <https://www.marlinwire.com/blog/3d-printing-vs-traditional-manufacturing>, (8.08.2016.)
- [57] 3D Printer Prices, Advantages of 3D printing over traditional manufacturing, dostupno na: <http://www.3dprinterprices.net/advantages-of-3d-printing-over-traditional-manufacturing-2/>, (9.08.2016.)
- [58] Izit, Primjena tehnika, dostupno na: <http://www.izit.hr/primjena/>, (9.08.2016.)
- [59] e- Manufacturing Solutins, Industrial 3D printing of high-tech aerospace components, dostupno na: <http://www.eos.info/aerospace>, (9.08.2016.)
- [60] https://en.wikipedia.org/wiki/3D-printed_spacecraft, (10.08.2016.)
- [61] 3D Print.com, What is 3D printing & how do 3D printers work, dostupno na: <https://3dprint.com/82272/what-3d-printing-works/>, (11.08.2016.)
- [62] Shishkovsky. Igor. V. (2016) New trends in 3D printing, InTech, Rijeka
- [63] Imaterialise, 3D Printig materials, dostupno na: <https://i.materialise.com/3d-printing-materials>, (11.08.2016.)
- [64] 3D FilaPrint, PolyWood, dostupno na: <http://shop.3dfilaprint.com/polywood-175mm-1892-p.asp>, (14.08.2016.)
- [65] 3D FilaPrint, EasyWood Ebony, dostupno na: <http://shop.3dfilaprint.com/easywood-ebony-175mm-sample-by-formfutura-1910-p.asp>, (14.08.2016.)
- [66] 3D FilaPrint, EasyWood Coconut, dostupno na: <http://shop.3dfilaprint.com/easywood-coconut-175mm-sample-by-formfutura-1902-p.asp>, (16.08.2016.)
- [67] 3D FilaPrint, Bronze Gold, dostupno na: <http://shop.3dfilaprint.com/filaprint-bronze-gold-premium-pla-175mm-sample-1324-p.asp>, (16.08.2016.)

[68] 3D FilaPrint, Orion Bluet-glasse, dostupno na: <http://shop.3dfilaprint.com/orion-blue-t-glase-175mm--10-metre-wrap-491-p.asp>, (16.08.2016.)

[69] 3D FilaPrint, dostupno na: <http://shop.3dfilaprint.com/>, (17.08.2016.)