Dimenzijska postojanost prototipova izrađenih FDM postupkom

Tomić, Davor

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:091833

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Stručni studij Strojarstva

Davor Tomić

Provjera dimenzijske postojanosti prototipova izrađenih FDM postupkom

Završni rad

Karlovac, 2015.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
Stručni studij Strojarstva

Davor Tomić

Provjera dimenzijske postojanosti prototipova izrađenih FDM postupkom

Završni rad

Nikola Šimunić, mag.ing.str.

Karlovac, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu, uz stručnu pomoć Nikole Šimunića, mag.ing.str.. Zahvaljujem se svom mentoru Nikole Šimuniću mag.ing.str. na savjetima i pomoći pri izradi ovog završnog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji na strpljenju i potpori tijekom studiranja, te tvrtki Strijelac d.o.o. na mogućnosti korištenja njihove opreme za praktični dio rada.

Davor Tomić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA IV

POPIS DIJAGRAMA V

POPIS OZNAKA VI

SAŽETAK VII

SUMMARY VII

KLJUČNE RIJEČI VIII

KEYWORDS VIII

1. UVOD ..... - 1 -
   1.1. Razvoj aditivne proizvodnje ..... - 1 -
   1.2. Primjena aditivne proizvodnje ..... - 2 -
   1.3. Koraci izrade ..... - 7 -
   1.4. Trendovi napretka aditivne proizvodnje u svijetu [18] ..... - 10 -
2. PODJELA POSTUPAKA ADITIVNE PROIZVODNJE ..... - 14 -
   2.1. Stereolitografija (SLA) ..... - 14 -
   2.2. PolyJet ..... - 15 -
   2.3. Selektivno lasersko sraščivanje (SLS) ..... - 15 -
   2.4. 3D tiskanje (3DP) ..... - 16 -
   2.5. Proizvodnja laminiranih objekata (LOM) ..... - 17 -
   2.6. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP) ..... - 18 -
   2.7. Postupak neprekinutog očvršćivanja tekućine (CLIP) ..... - 19 -
3. TALOŽNO OČVRŠĆIVANJE (FDM – Fused deposition modeling) ..... - 21 -
   3.1. Princip rada ..... - 21 -
   3.2. Materijali ..... - 23 -
   3.3. Prednosti i nedostaci ..... - 24 -
4. OPIS FDM UREĐAJA KORIŠTENOG U PRAKTIČNOM DIJELU RADA ..... - 25 -
   4.1. Općenito o korištenom uređaju ..... - 26 -
   4.2. Zaključak o Flashforge uređaju ..... - 27 -
5. UREĐAJI ZA DIGITALIZACIJU ..... - 29 -
   5.1. Princip rada ..... - 29 -
   5.2. Prednosti i nedostaci ..... - 30 -
   5.3. Primjena ..... - 30 -
   5.4. Uređaj korišten u praktičnom dijelu rada ..... - 30 -
6. PRAKTIČNI DIO RADA ..... - 32 -
   6.1. Proizvod ..... - 32 -
   6.2. Problematika ..... - 33 -
   6.3. Izrada modela na FDM uređaju ..... - 34 -

6.4. Digitaliziranje modela ..... - 37 -
6.5. Analiza rezultata ..... - 39 -
7. ZAKLJUČAK ..... - 44 -
LITERATURA ..... - 45 -
PRILOZI ..... - 46 -

POPIS SLIKA

Slika 1. Povijesni razvoj proizvodnih tehnologija
Slika 2. Zero-G 3D printer poslan na ISS stanicu
Slika 3. Zero-G 3D printer poslan na ISS stanicu
Slika 4. Kolo u pumpi za vodeno hlađenje za BMW natjecateljski automobil
Slika 5. Primjer upotrebe AM tehnologije u arhitekturi
Slika 6. Primjer RT (Rapid Tooling) korištenja AM tehnologije
Slika 7. Koraci izrade prototipa aditivnim postupkom
Slika 8. Primjer 3D CAD modela u programu SolidWorks 2014
Slika 9. Prikaz CAD modela u programu za aditivnu proizvodnju prilikom rezanja
Slika 10. Primjer izratka nakon i prije uklanjanja potporne strukture
Slika 11. Obradak podvrgnut obradi u acetonskim parama
Slika 12. Postupak Stereolitografije
Slika 13. PolyJet postupak
Slika 14. Postupak Selektivnog laserskog srašćivanja
Slika 15. Postupak 3D tiskanja
Slika 16. Postupak proizvodnje laminarnih objekata
Slika 17. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom
Slika 18. Postupak neprekinutog očvršćivanja tekućine (CLIP)
Slika 19. Postupak nastanka CLIP postupkom
Slika 20. Princip rada Taložnog očvršćivanja
Slika 21. Primjer u Makerware programu
Slika 22. Prikaz stvaranja saćaste strukture
Slika 23. FDM uređaj Flashforge Creator X
Slika 24. Lokacija materijala na Flashforge Creator X uređaju
Slika 25. Postupak poravnavanja mlaznica i radne površine
Slika 26. Uređaj za digitalizaciju
Slika 27. Uređaj za digitalizaciju Comet
Slika 28. Proizvod u 3D prikazu
Slika 29. Proizvod nakon izrade aditivnom proizvodnjom
Slika 30. 3D model proizvoda u SolidWorks 2014 programu
Slika 31. Proizvod u izradi na FDM uređaju (1%)
Slika 32. Proizvod u izradi na FDM uređaju (15%)
Slika 33. Proizvod u izradi na FDM uređaju (85%)
Slika 34. Proizvod u izradi na FDM uređaju (100%)
Slika 35. PLA proizdvod nakon i prije nanošenja prevlake
Slika 36. Prikaz 3D modela dobivenog postupkom digitalizacije
Slika 37. Poravnavanje nominalnog i dobivenog 3D modela
Slika 38. Prikaz tablice „color table“
Slika 39. Odstupanja 3D modela na primjeru proizvoda „ABS 2“

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri Comet uređaja za digitalizaciju
Tablica 2. Parametri korišteni pri izradi proizvoda sa ABS materijalom
Tablica 3. Parametri korišteni pri izradi proizvoda sa PLA materijalom
Tablica 4. Karakteristike uređaja za digitaliziranje
Tablica 5. Popis rezultata odstupanja za 10 proizvoda
Tablica 6. Prosječne vrijednosti odstupanja

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1. Primjena aditivne proizvodnje u industriji 2001. godine
Dijagram 2. Primjena aditivne proizvodnje u industriji 2012. godine
Dijagram 3. Statistika zarade od proizvoda i usluga po godinama
Dijagram 4. Predviđanja rasta prodaje u postupcima aditivne tehnologije
Dijagram 5. Udio gotovih proizvoda spremnih za montažu
Dijagram 6. Analiza odstupanja PLA proizvoda

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis
FDM	Fused Deposition Modeling (postupak taložnog očvrščivanja)
CAD	Computer Aided Design (3D modeliranje)
AM	Additive Manufacturing (postupak aditivne proizvodnje)
RP	Rapid Prototyping (brza izrada prototipova)
RT	Rapid Tooling (brza izrada alata)
RM	Rapid Manufacturing (brza proizvodnja)
SLA	Stereolithography (postupak stereolitografije)
DMD	Direct Metal Deposition (izravno taloženje metalnog praha)
EDM	Electrical Discharge Machining (postupak erodiranja)
ISS	International Space Station (međunarodna svemirska stanica)
GE	General Electric (tvrtka)
BMW	Bayerische Motoren Werke AG (tvrtka)
DTM	Deutsche Tourenwagen Masters (naziv automotosport natjecanja)
STL	Standard Tessellation Language
OBJ	Wavefront (oblik datoteke za 3D modele)
USB	Universal Serial Bus (vrsta priključka sa računalom)
SD	Secure Digital (vrsta memorijske kartice)
SLS	Selective Laser Sintering (postupak selektivnog laserskog sraščivanja)
LOM	Laminated Object Manufacturing (postupak proizvodnje laminiranih objekata)
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
UV	Ultraviolet (vrsta izvora svjetlosti)
PA	Poliamid (vrsta polimera)
PC	Polikarbonat (vrsta polimera)
MIT	Massachusetts Institute of Technology (sveučilište)
DLP	Postupak očvršćivanja digitalno obrađenim svjetlosnim signalom
FFF	Fused filament fabrication (drugi naziv za FDM postupak)
PJP	Plastic jet printing (drugi naziv za FDM postupak)
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene (vrsta materijala)
PLA	Polylactide acid (polilaktidna kiselina)
SAD	Sjedinjene Američke Države
WPC	LayWood (vrsta materijala za FDM postupak)
TPE	Thermoplastični poliuretan (vrsta polimera)
PET	Polietilen teraptalat (vrsta polimera)
PVC	Polivinil klorid (vrsta polimera)
PVA	Polivinil alkohol (vrsta polimera)
PE	Polietilen (vrsta polimera)
LCD	Liquid Crystal Display (vrsta ekrana)

SAŽETAK

Pod postupcima aditivne proizvodnje, odnosno 3D printanja smatramo različite postupke izrade modela. Zajedničko svim postupcima je stvaranje modela sloj po sloj iz elektroničkog oblika. Ova tehnologija se najčešće upotrebljava za izradu prototipova i malih serija.

Relativno skup proces je najveći nedostatak aditivne proizvodnje. Prednosti kao ušteda vremena pri razvijanju novog proizvoda, ispravak grešaka u ranoj fazi konstruiranja, smanjivanje troškova razvoja pa do kvalitetnije prezentacije potencijalnim investitorima često opravdavaju visoke troškove.

Na tržištu postoje različiti postupci aditivne proizvodnje a s njima i razlike u kvaliteti, materijalu, vremenu izrade i troškovima.

U okviru ovog završnog rada izrađena je usporedba dimenzijske postojanosti između modela iz ABS i PLA materijala. Svi modeli korišteni za usporedbu su izrađeni na istom uređaju FDM tehnologije koristeći identične parametre. Koristeći uređaj za 3D digitalizaciju napravljena je provjera dimenzijske postojanosti izrađenih modela sa nominalnim CAD modelom.

SUMMARY

When we talk about additive manufacturing, or 3D printing, we consider various ways of creating a model. All this processes have in common creating a model layer by layer from a digital data. This technology is mostly used in creating prototypes and small production series.

Relatively expensive process is the biggest disadvantage of additive manufacturing. Advantages like time savings in developing a new product, correction of design mistakes in the early phase of development, reducing the cost of development all through to making of better presentation to potential investors are often justified by greater expenses.

Currently, there are many different processes on the market and with them differences in quality, material, production time and price.

In this thesis research is conducted in comparison of dimensional stability between models made from ABS and PLA material. All of the models used for the comparison are made on the same FDM machine using the same parameters. Review of the dimensional stability between the models and the nominal CAD model is made by using a device for 3D scanning.

KLJUČNE RIJEČI

Aditivna tehnologija
3D printanje
Digitaliziranje
3D model
FDM tehnologija

KEYWORDS

Additive technology
3D printing
Scanning
3D model
FDM technology

1. UVOD

U suvremenoj proizvodnji sve složeniji zahtjevi kupaca (veća kvaliteta, manje tolerancije, tanje stjenke itd.) produžuju vrijeme razvoja proizvoda, a s tim se i povisuju troškovi. Postupci aditivne proizvodnje omogućuju skraćivanje vremena razvoja proizvoda jer se model stvara direktno iz elektroničkog oblika (CAD datoteke) te često bez potrebe za naknadnom obradom. Upotrebljavaju se za izradu prototipova, modela, alata, malih serija proizvoda.

Pod postupke aditivne proizvodnje (AM) ubrajamo niz postupaka kojim izrađujemo trodimenzionalne izradke koji mogu biti skoro bilo kakvog oblika i geometrije. Pošto se izradak izrađuje direktno iz 3D modela to čini ove postupke računalno upravljanim. Zbog mogućnosti izrade vrlo kompliciranih oblika, u nekim je slučajevima jedini način izrade.

Upotreba je u početku bila bazirana na izradi prototipova (Rapid Prototyping – RP) a kasnije se prebacila na izradu alata i kalupa (Rapid Tooling -RT) od metala, polimera ili keramike te na pojedinačnu i maloserijsku proizvodnju (Rapid Manufacturing – RM). [1]

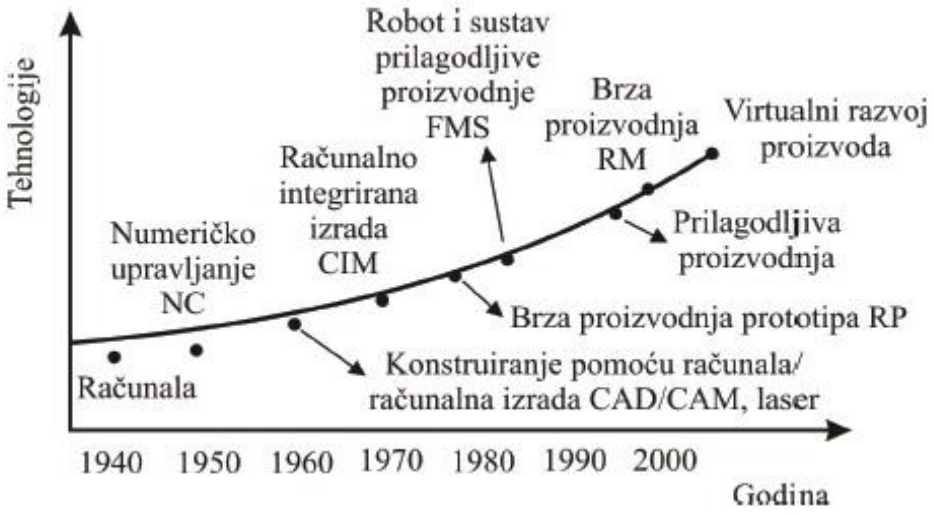
1.1. Razvoj aditivne proizvodnje

Prvi postupak aditivne proizvodnje je predstavljen 1984. godine. Chuck Hull iz 3D Systems Corporation je izumio postupak stereolitografije (SLA). Također je sudjelovao u razvoju STL (Standard Tessellation Language) tipa datoteke koji upotrebljavaju računalni programi za "rezanje" 3D modela na tanke slojeve potrebni da bi se izradio model sloj po sloj.

Tijekom 80-tih i 90-tih godina 20. stoljeća predstavljeni su postupci kao selektivno lasersko srašćivanje (SLS), selektivno lasersko taljenje (SLM), taložno očvršćivanje (FDM) i izravno taloženje metalnog praha (DMD). Glavna razlika prema tradicionalnim postupcima izrade je što sa aditivnom proizvodnjom dodajemo materijal kako bi dobili konačan model u usporedbi s oduzimanjem materijala kod konvencionalnih postupaka (tokarenje, glodanje, EDM, obrada deformiranjem – štancanje itd.).

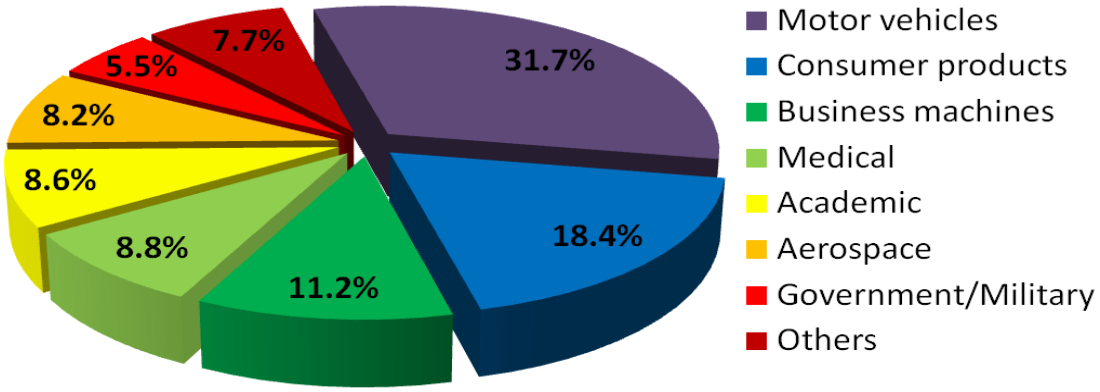
Postupak taložnog srašćivanja (FDM tehnologija) je razvio S. Scott Cramp 1980-tih, a tvrtka Stratasys ga 1990-tih uvodi u komercionalnu upotrebu. [1,2]

Kako se tehnologija tijekom godina razvijala primjena AM postupaka se proširila na mnoge grane industrije. Pojava aditivne proizvodnje je usporediva sa dolaskom 3D CAD modela koji su napravili svojevrsnu revoluciju u razvoju proizvoda u usporedbi sa klasičnim 2D prikazom.

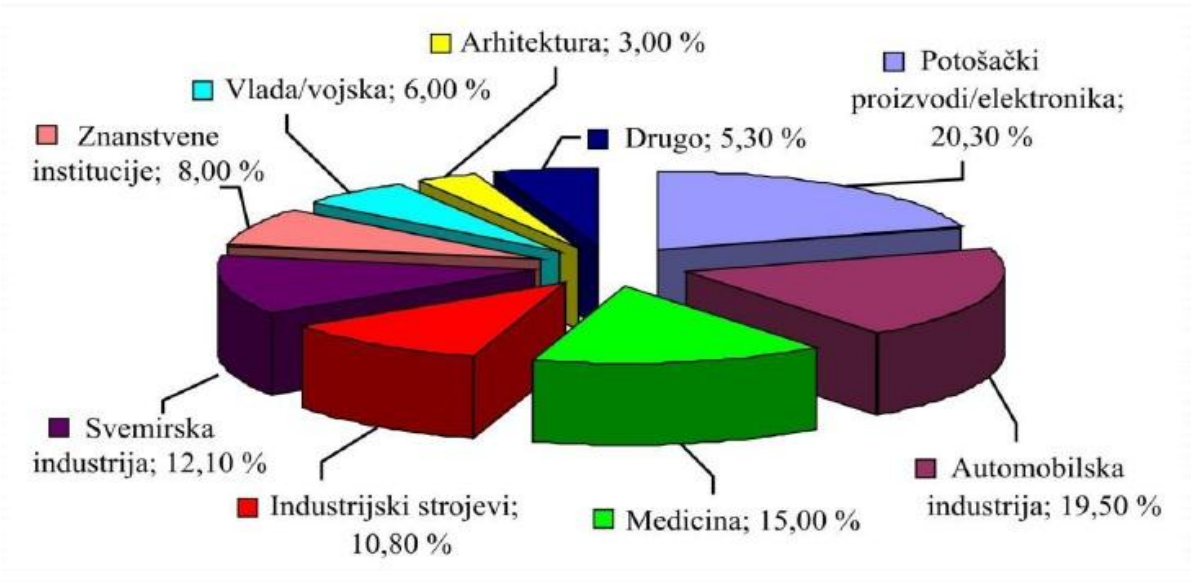


Slika 1. Povijesni razvoj proizvodnih tehnologija [1,3]

1.2. Primjena aditivne proizvodnje



Dijagram 1. Primjena aditivne proizvodnje u industriji 2001. godine [4]



Dijagram 2. Primjena aditivne proizvodnje u industriji 2012. godine [1]

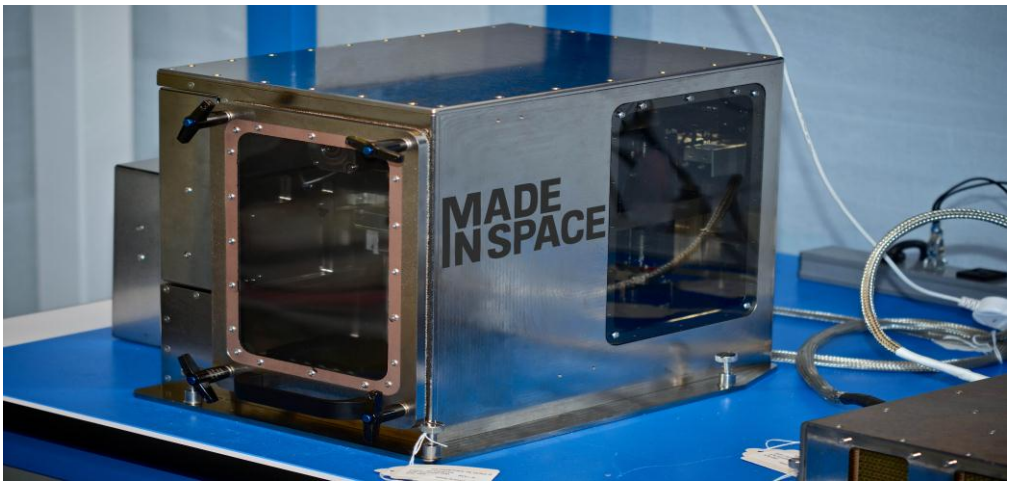
Industrije koje najviše koriste AM tehnologiju su: avioindustrija, arhitektura, automobilska industrija, potrošački i komercijalni proizvodi, vojna industrija, zubarska industrija, medicinska industrija, obrazovanje i zabava. [5,6]

Iz dijagrama broj 1 i 2 je očito da je najveća primjena u autoindustriji i potrošačkim proizvodima. Iako vodeći u oba primjera postotak tržišta im se znatno smanjio u korist obrazovanja, avioindustrije i vojske. Trend porasta u obrazovnim institucijama treba najviše pripisati tvrtki MakerBot sa svojim ambicioznim planom uvođenja FDM 3D printera u svaku školsku ustanovu u SAD-u a i šire. U skladu s navedenim vrijedno je spomenuti da na Fakultetu Strojarstva i Brodogradnje u Zagrebu se nalazi jedan MakerBot Replicator 2X. [7]

Kako je primjena u industriji široka u narednim odlomcima se navode ne tako česti i zanimljivi primjeri.

Poznati primjer je izrada dizni u mlaznom motoru od General Electrica. Razlog je način izrade od svega par dijelova. Konvencionalnim načinima bi se ista dizna sastojala od preko 20 dijelova. Ovo je dobar primjer napretka u razvoju materijala za AM postupke. Po riječima General Electrica AM dio je odabran iz razloga pouzdanosti. Manji broj dijelova predstavlja manji rizik za kvar. [8]

Upotreba 3D printera FDM tehnologije tvrtke Made In Space na svemirskoj stanici ISS (International Space Station) u svrhu istraživanja mogućnosti AM tehnologije u svemiru. Iako je istraživanje tek u početcima trebalo bi pokazati prednosti izrade komponenti prema potrebi misije. To bi riješilo problem skladištenja velikog broja rezervnih dijelova, a time bi se štedjelo na masi, energiji i naravno troškovima. To je trenutno jedini 3D printer konstruiran da radi bez gravitacijske sile. [9]



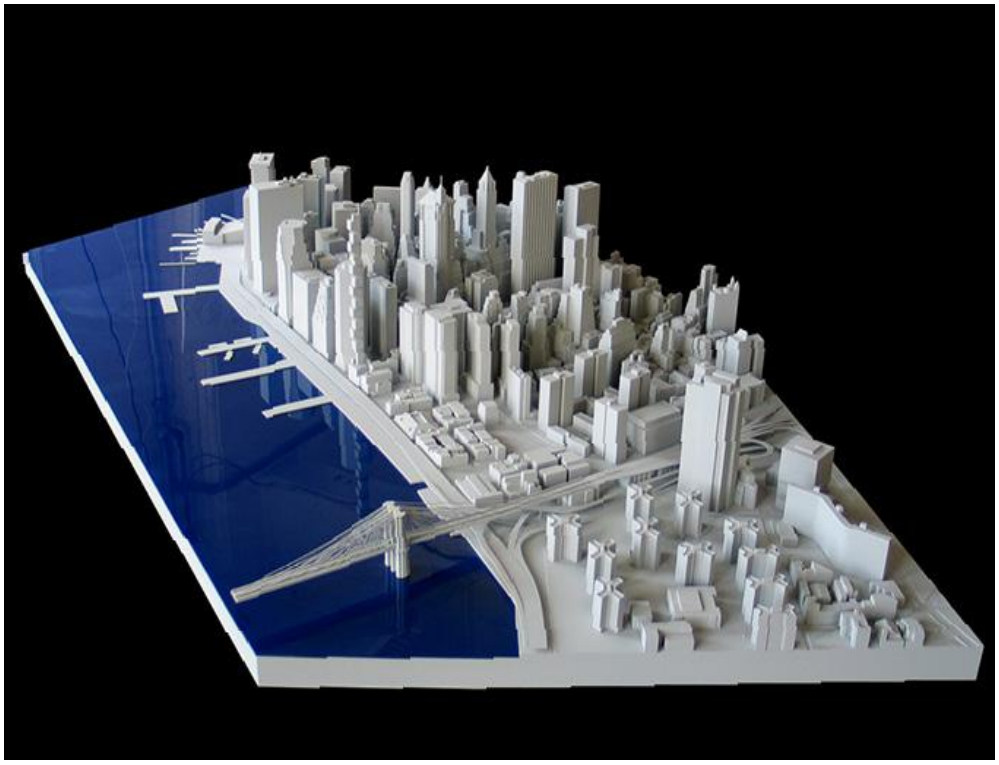
Slika 2. Zero-G 3D printer poslan na ISS stanicu [9]

Slika 3. Zero-G 3D printer poslan na ISS stanicu [9]

Avioindustija primjenjuje AM tehnologiju već neko vrijeme (već spomenuti primjer s GE-om i printanim diznama iz metala) ali tvrtka Airbus je prva koja ugrađuje dijelove proizvedene FDM tehnologijom iz plastične sirovine u komercijalni avion. Preko 1000 dijelova je isporučeno Quatar Airways-u u 12. mjesecu 2014. Službena izjava ne otkriva o točno kojim dijelovima je riječ. Stratasys izjavljuje da su isporučili dijelove koji podliježu svim tehničkim pravilima avioindustrije kao što su zapaljivosti, toksičnost i čvrstoća. Lagani uzorci izrađeni su na uređaju Stratasys ULTEMTM 9085. [10]

Bayerische Motoren Werke AG (BMW) primjenjuje AM tehnologiju od 1989. godine. Godine 2015. slavi jubilarni 500 AM dio proizveden iz metalnog praha SLM tehnologijom. Kolo u pumpi za vodeno hlađenje se ugrađuje samo u model namijenjen DTM natjecanju. Materijal obradka je aluminijski prah koji se nanosi sa 0,05 mm slojevima po z-osi. Obradak je prikazan na slici 4. [11]

Slika 4. Kolo u pumpi za vodeno hlađenje za BMW natjecateljski automobil [11]



Slika 5. Primjer upotrebe AM tehnologije u arhitekturi [12]

Od pojave AM tehnologija jedna od ideja za proizvodnu upotrebu je bila proizvodnja alata, odnosno kalupa za injekcijsko prešanje polimernih materijala. Kalupi se postavljaju na stroj za injekcijsko prešanje polimernih materijala te nakon procesa brizganja i hlađenja kalup se otvara pomoću mehanizma na stroju te se gotovi polimerni proizvodi izbacuju sustavom za izbacivanje.

Kalup za injekcijsko prešanje predstavlja specifični i središnji dio sustava za injekcijsko prešanje polimera. Kalup i proces njegova razvoja predstavljaju komplicirane sustave. [13]

Iz tog razloga izrada kalupa složene geometrije AM tehnologijom je logična, ali u praksi se rijetko koristi zbog troškova izrade. Veći problem predstavlja kvaliteta materijala jer se kalup izrađuje od čelika. Kalupne ploče su u pravilu izrađene od poboljšanog čelika koje se naknadno termički obrađuju kako bi se smanjilo trošenje. Prilikom izrade kalupa često je ugovorom propisan minimalni broj otresaka ili ciklusa, kada kalup ima dva ili više kalupnih šupljina, koje alat mora zadovoljiti. Nije rijetkost da je taj broj 1 000 000 ciklusa.

Izuzevši AM tehnologiju izrade sa metalnim materijalima najuspješnija se pokazala PolyJet tehnologija. Slika 6 prikazuje kalup i otresak izrađen u tom kalupu. Riječ je o RT (Rapid-Tooling) korištenju AM tehnologije.

Slika 6. Primjer RT (Rapid Tooling) korištenja AM tehnologije

1.3. Koraci izrade

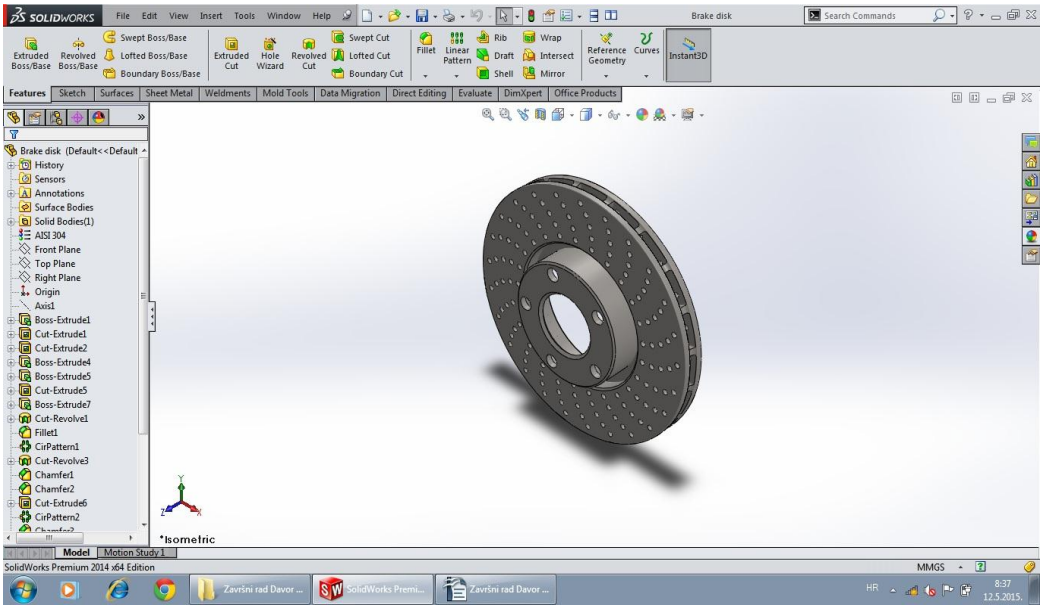
Prilikom svakog procesa aditivne proizvodnje potrebno je učiniti sljedeće korake kako bi se izradio model, proizvod, prototip... Postupak je detaljnije prikazan na slici 7.

Slika 7. Koraci izrade prototipa aditivnim postupkom [1]

a) Izrada CAD (Computer aided design) modela.

Danas je veliki izbor CAD programa. Zavisno o potrebi korisnika mogućnosti programa se veoma razlikuju. Unutar strojarske struke su najzastupljeniji: SolidWorks, Catia, AutoCAD, Inventor.

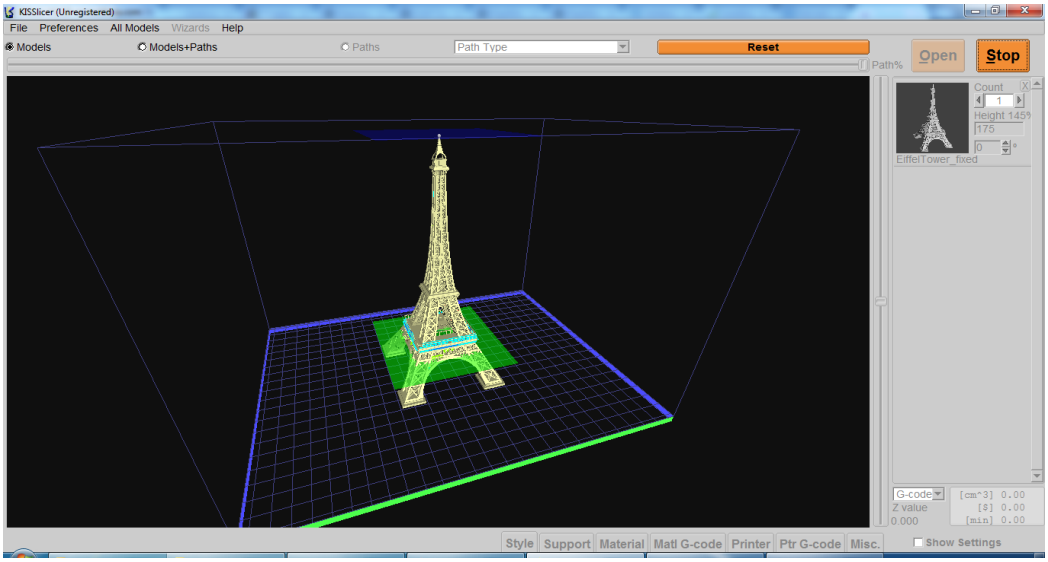
CAD model se mora pohraniti u STL obliku datoteke. Neki strojevi prepoznaju i OBJ oblik ali spomenuti nije podržan od svih CAD programa. STL je najzastupljeniji i podržan od svih računalnih programa za upravljanje uređajima za aditivnu proizvodnju. [14]



Slika 8. Primjer 3D CAD modela u programu SolidWorks 2014

b) Rezanje modela na slojeve

AM strojevi rade na principu "slaganja" sloja po sloj. Potrebno je CAD model podijeliti na slojeve. Broj slojeva ovisi o rezoluciji printera. Npr. FDM printer sa rezolucijom od 0,2 mm će printati model od 10 mm visine iz 50 slojeva. Rezanje modela se obavlja preko programa koji podržava rad printera. Veza sa računalom je ostvarena preko USB tipa spajanja. Kod većine printera je moguće printati sa SD kartice koja se spoji na sam uređaj. Tada nije potrebna veza sa računalom nego se model izrađuje direktno sa SD kartice na koju je pohranjen model.



Slika 9. Prikaz CAD modela u programu za aditivnu proizvodnju prilikom rezanja [15]

c) Izrada modela

Prije izrade obradka potrebno je podesiti parametre izrade. U praktičnom dijelu ovog rada detaljno je objašnjeno podešavanje parametara i njihovo značenje na praktičnom primjeru izrade koristeći FDM tehnologiju. Izrada modela ovisi o geometriji modela. Ukoliko postoje dijelovi modela koji nisu poduprijeti strukturom ispod sebe mora se stvoriti potporna struktura jer inače izrada ne bi bila moguća (Slika 6).

Slika 10. Primjer izratka nakon i prije uklanjanja potporne strukture [16]

d) Završna obrada

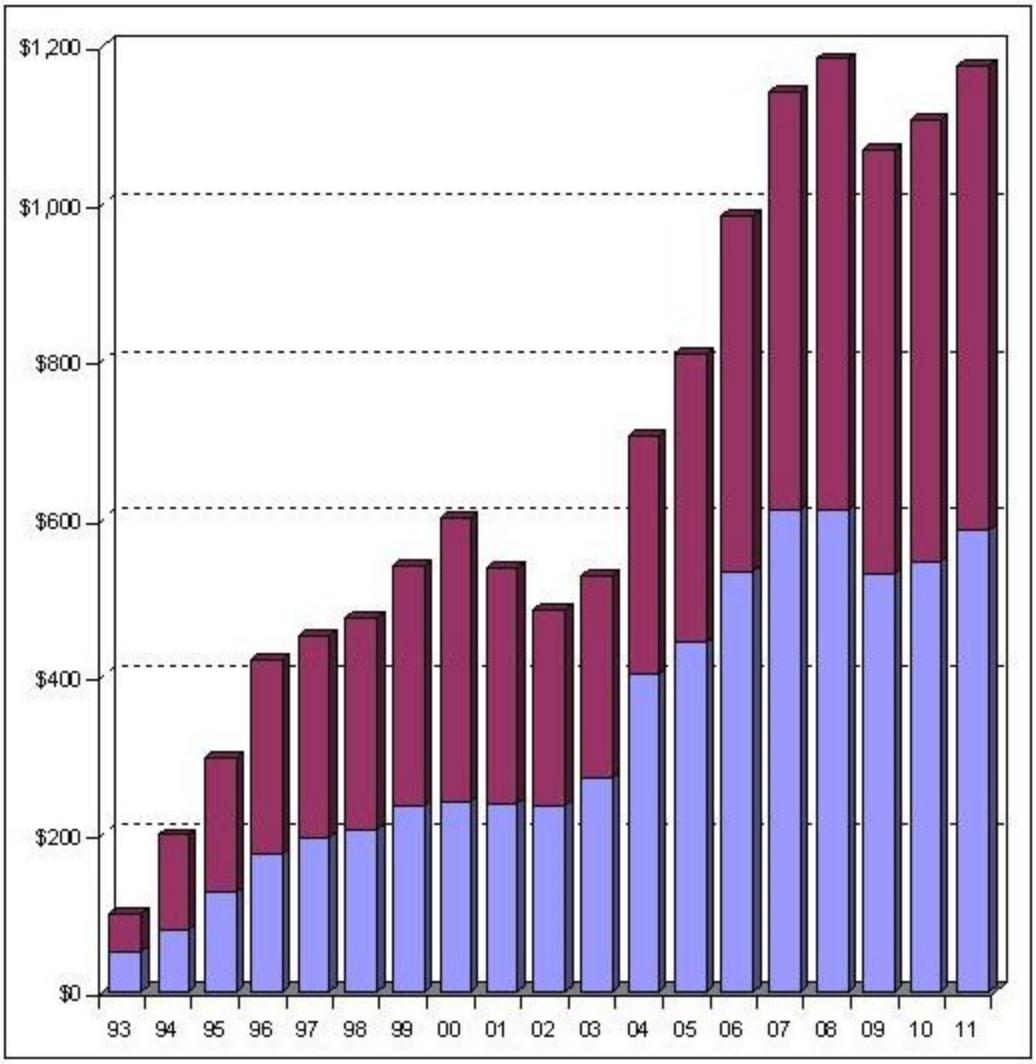
Naknadna obrada se provodi ukoliko je potrebna. Najčešće nije potrebna ili je riječ o uklanjanju potporne strukture. Tehnologije koje izrađuje izratke iz polimernih materijala možemo bojati. Prilikom korištenja FDM uređaja manje nabavne cijene ponovljivost i preciznost predstavljaju problem. Prilikom izrade dva ili više komada koji zajedno čine sklop potrebna je naknadna obrada odvajanjem čestica kao što je brušenje ili glodanje. Metodom zagrijavanja acetonskih para unutar kojih se pozicionira izradak postižemo uglađenu (Slika 10).

Slika 11. Obradak podvrgnut obradi u acetonskim parama [17]

1.4. Trendovi napretka aditivne proizvodnje u svijetu [18]

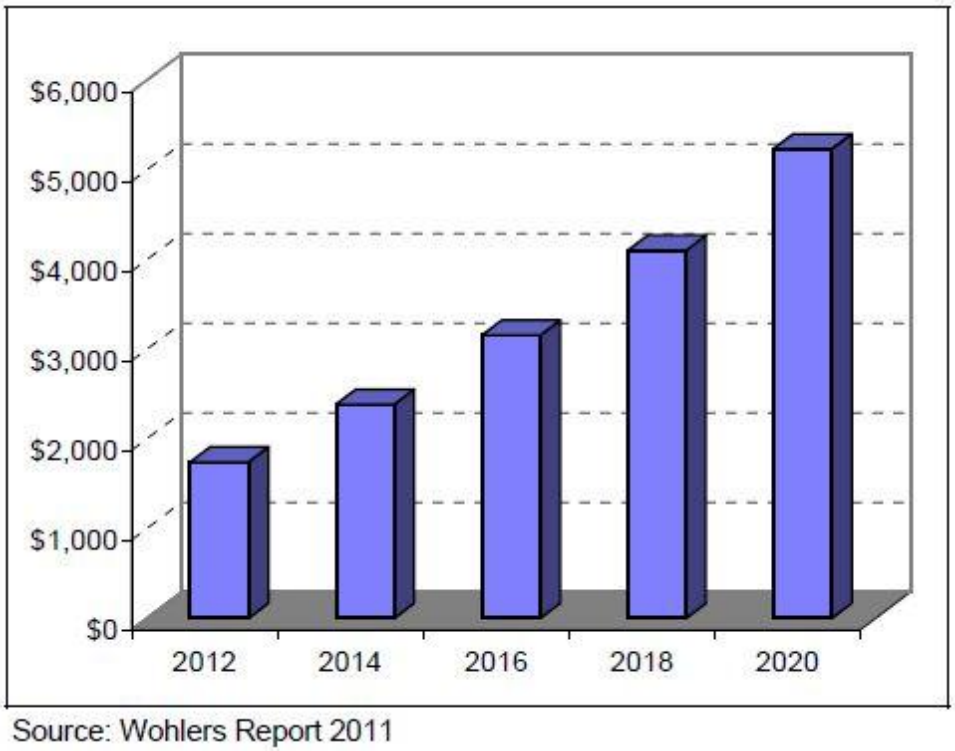
Skup statističkih podataka za aditivne postupke je najbolje prikazan "Wohlers report" analizama. Zapisnik se izdaje na godišnjoj razini a trenutno je aktualno 19. izdanje.
Provodi ga američka nezavisna konzultantska tvrtka sa sjedištem u Fort Collins, Colorado.
Tvrtka pruža tehničko i strateško savjetovanje o novim aktualnostima i trendovima u postupcima aditivne tehnologije. Poznati su u svijetu kao kvalitetan izvor informacija, a često su citirani od medija kao što su: Bloomberg Business Week, CNBC, CNNMoney, Discovery News, Financial Times, The Wall Street Journal i mnogi drugi.

U narednim stranicama su izvedene neke od zanimljivijih statistika kako bi dobili bolji uvid u smjer gdje se kreću postupci aditivne tehnologije.



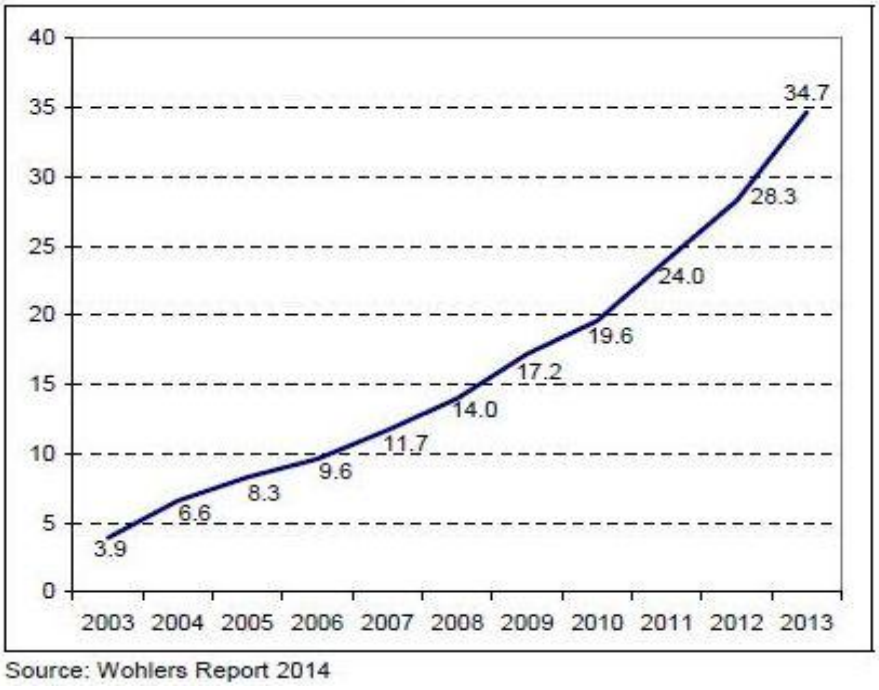
Dijagram 3. Statistika zarade od proizvoda i usluga po godinama [18]

Koliko se proširila industrija aditivnih postupaka najbolje je prikazano u dijagramu 3. Plavom bojom obilježen je profit od proizvoda, a crvenom bojom zarada od usluga. Rast od 1993. godine do 2011. je ogroman.



Dijagram 4. Predviđanja rasta prodaje u postupcima aditivne tehnologije [18]

Iako je su sva dosadašnja predviđanja u ovom području bila pogrešna iz razloga što se ova tehnologija širi brže nego što stručnjaci predviđaju iz Tablice 4 je vidljivo da konstantni rast bi 2020. trebao dosegnuti preko 5 milijardi dolara prometa.



Dijagram 5. Udio gotovih proizvoda spremnih za montažu [4]

Način upotrebe izradaka navedenim postupcima se mijenja tijekom godina. Tehnologije napreduju, a kvaliteta izradaka raste. Zbog toga se udio izradaka spremnih za montažu povećava tijekom godina. Dok je taj udio bio manji od 4% 2003. godine, 2013. se povećao na 34,7% odnosno $1,065 milijardi ($643,8 milijuna 2012. godine).

2. PODJELA POSTUPAKA ADITIVNE PROIZVODNJE

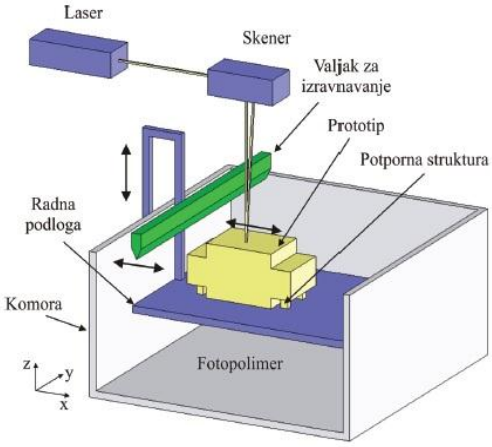
Prema vrsti materijala dijele se na:

- kapljeviti materijali (npr. SLA, PolyJet, očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom)
- materijal u obliku praha (npr. SLS, 3D tiskanje)
- kruti materijali (npr. FDM, LOM) [1]

Također prema vrsti postupaka možemo ih podijeliti na: stereolitografija, PolyJet, selektivno lasersko sraščivanje, 3D tiskanje, proizvodnja laminiranih objekata, očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom, taložno očvršćivanje i CLIP.

2.1. Stereolitografija (SLA)

Postupak AM tehnologije koji je predstavljen 1987. godine. Izumio ga je Chuck Hull i predstavlja temelj za tvrtku 3D Systems.



Slika 12. Postupak Stereolitografije [1]

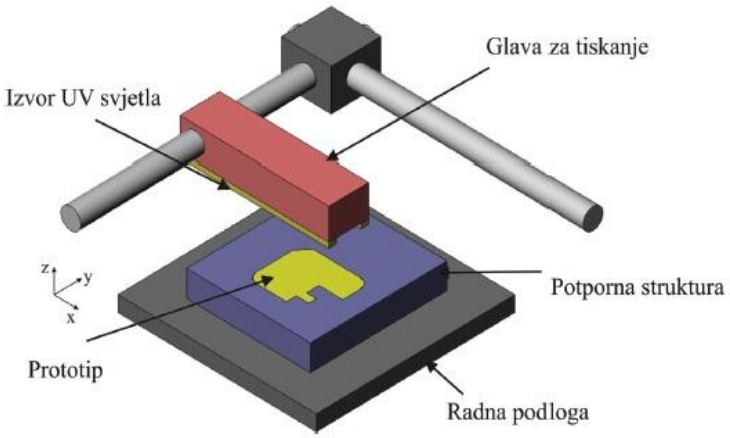
Princip rada se temelji na skrućivanju fotopolimera pri izlaganju UV svjetlosti koje se stvara pomoću Helij-kadminskog (He-Cd) ili argonskog lasera (Ar). Fokusiranim UV svjetlom se očvršćuje sloj polimera iznad radne površine. Radna površina je smještena jedan sloj ispod vrha površine kapljevitog fotopolimera. U sljedećem prolazu se radna površina spušta za debljinu sljedećeg sloja prema dolje. Valjak za izravnavanje kapljevitog fotopolimera služi za izbjegavanje pojave mjehurića u izradcima. Nakon završenog procesa potrebno je ukloniti potpornu strukturu. Potrebno je minimalno 1 sat naknadnog zračenja kako bi se uklonila sva kapljevita područja.

Prednosti su kvaliteta površine, brzina izrade, mogućnost izrade vrlo finih detalja.

Nedostaci su visoka cijena materijala i njihovo pravilno skladištenje, potporna struktura se mora koristiti, potrebno vrijeme za naknadno zračenje, skupo održavanje lasera, izbor materijala se svodi na fotopolimere. [1]

2.2. PolyJet

Predstavljen 2000. godine kao kombinacija stereolitografije (SLA) i 3D tiskanja.



Slika 13. PolyJet postupak [1]

Sloj fotoosjetljivog polimerno materijala se nanosi sloj po sloj klizanjem mlaznica u x-y smjeru. Jedan sloj je 5 puta manji nego u postupku stereolitografije (SLA). Odmah nakon nanošenja sloj se očvršćuje djelovanjem UV svjetla. Po završetku jednog sloja radna podloga se spušta za debljinu idućeg sloja. Koriste se dva materijala. Jedan je za izradak a drugi za potpornu strukturu koja se lako uklanja nakon izrade.

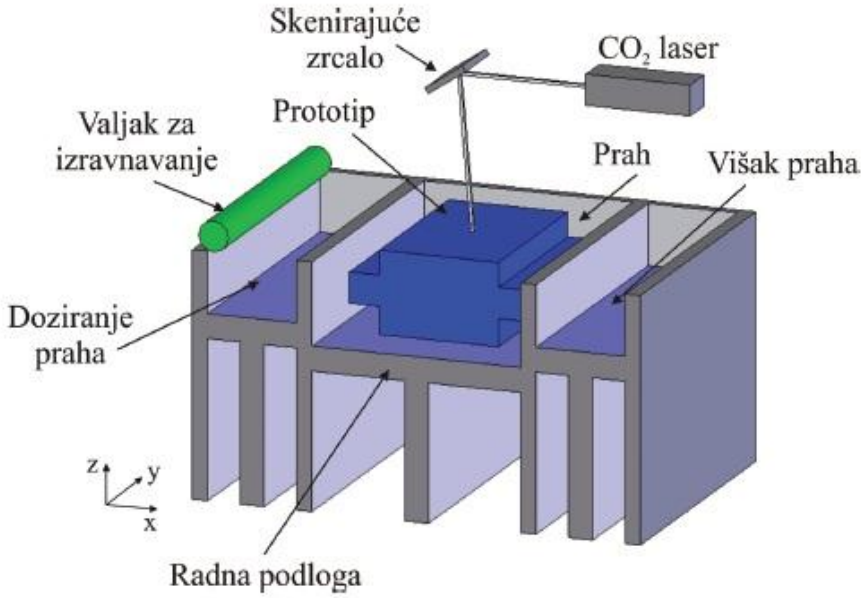
Prednosti su brz postupak sa visokom kvalitetom površine, mogućnost izrade sitnih detalja i tankih stijenki, te mogućnost kombinacije materijala različitih mehaničkih svojstava i boja.

Nedostaci su visoki troškovi uređaja i materijala. [1]

2.3. Selektivno lasersko sraščivanje (SLS)

Postupak je predstavljen 1989. godine. Moguće korištenje većine materijala dok su god u praškastom obliku. Prvotno je zamišljen za izradu iz polimera ali se s vremenom proširio na upotrebu metalnih i keramičkih materijala.

Kompletan postupak se odvija u temperiranoj komori kako bi se izbjegla oksidacija površine te deformacija (vitoperenje) materijala. Visina radna površine smještena je za debljinu sloja koji se želi nanijeti. Praškasti materijal se nanosi valjkom za izravnavanje iz temperirane komore gdje se održava temperatura neposredno ispod tališta T_m (kod kristalnih plastomera kao PA) i/ili stakliša T_g (kod amorfnih plastomera kao što je PC). Sloj praha se skenira i grije toplinskom energijom laserske zrake zbog čega dolazi do međusobnog sraščivanja materijala. CO_2 laser skenira i oblikuje prah u željeni presjek. Nakon sraščivanja prvog sloja radna površina se spušta po z-osi za debljinu idućeg sloja.
Potreban je period hlađenja prije nego se izradak izloži okolnoj atmosferi.



Slika 14. Postupak Selektivnog laserskog srašćivanja [1]

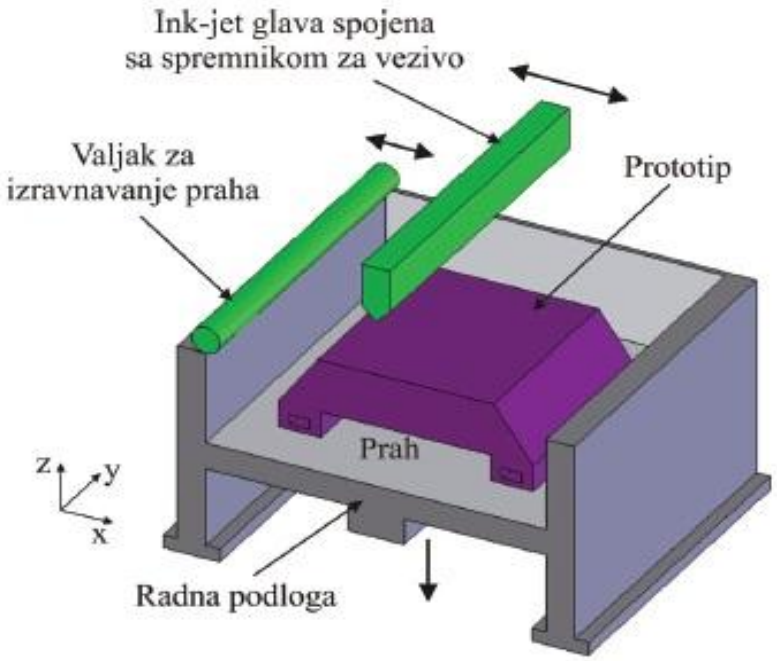
Prednosti su brzina postupka sa malo zaostalih naprezanja, mogućnost korištenja velikog broja materijala, izrada vrlo malih modela.

Nedostaci su kvaliteta površine i preciznost, gustoća modela, vrijeme hlađenja (pogotovo velikih izradaka), čišćenje stroja prilikom promjene vrste materijala, skupo početno ulaganje. [1]

2.4. 3D tiskanje (3DP)

3D tiskanje je razvijeno 1989. godine na MIT sveučilištu. Umjesto tinte, kao kod 2D tiskanja, ovdje se izbacuje vezivo ili ljepilo. Sloj po sloj se nanose vezivo i prah i tako izrađuje model.

Radna podloga je udaljena za debljinu prvog sloja po z-osi. Sloj praha se skenira sa glavom printera koja oslobađa kapljevito vezivo i uzrokuje prianjanje slojeva. Glava printera skenira oblik modela sloj po sloj i na taj način se izrađuje model. Postupak se ponavlja u onoliko slojeva koliko je potrebno da se izradi željeni izradak. Nakon izrade se izradak ostavlja neko vrijeme u grijanom komori kako bi poprimio željena mehanička svojstva. Višak praha se lako odstrani ispuhivanjem sa zrakom.



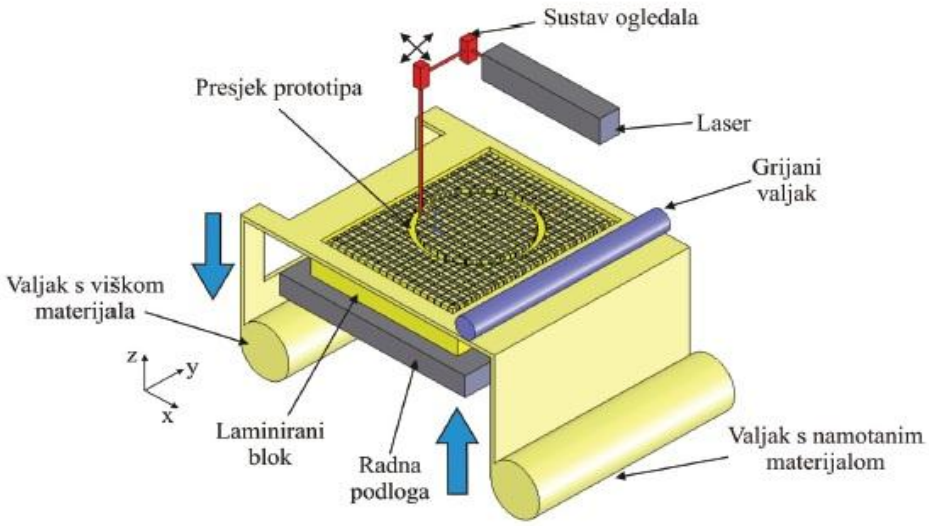
Slika 15. Postupak 3D tiskanja [1]

Prednosti su izrada modela u boji s gotovo potpunom gustoćom, brz postupak izrade, preciznost, dimenzijska postojanost, kvaliteta površine, niska cijena.

Nedostaci su mali izbor materijala, dimenzisjka točnost postaje lošija što je izradak veći, vrijeme potrebno za čišćenje modela. [1]

2.5. Proizvodnja laminiranih objekata (LOM)

Postupak je predstavljen 1985.godine a temelji se na izradi modela laminiranjem i laserskim rezanjem materijala od papira, polimernih folija i filmova, te metalnih ploča. Ploče se laminiraju tako da se povežu lijepljenjem, stezanjem i ultrazvučnim zavarivanjem. Utjecajem topline i tlaka folije se povezuju u blokove a blokovi formiraju slojeve. Princip rada je prikazan na slici 16. Valjkom se dobavljaju folije koje se ujedno i zagrijavaju.



Slika 16. Postupak proizvodnje laminarnih objekata [1]

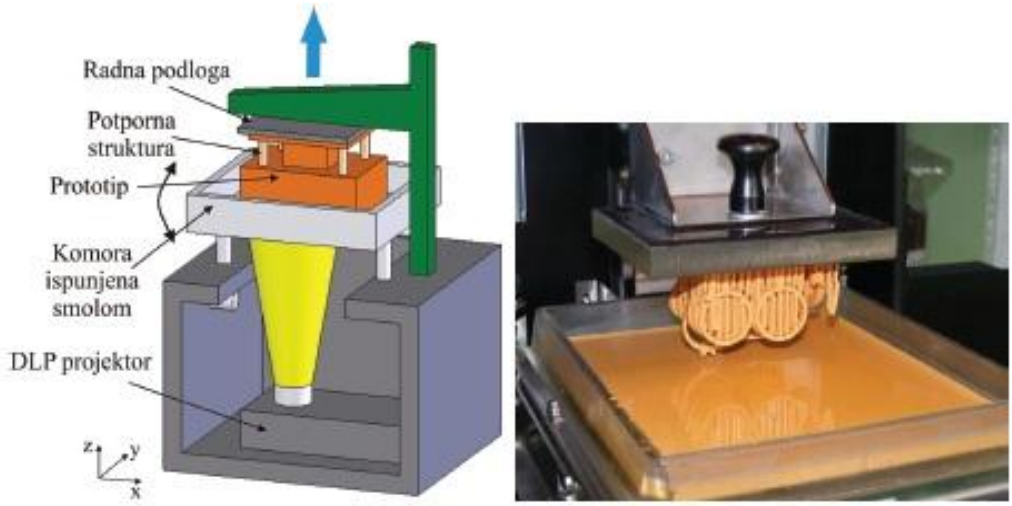
Laserskom zrakom se reže oblik sloja modela na trenutnoj visini. Slijedi pomicanje radne podloge za visinu sljedećeg sloja po z-osi i postupak se ponavlja.

Prednosti su niska zaostala naprezanja i deformiranje modela (vitoperenje), malo skupljanje, brza izrada velikih modela, niža cijena uređaja i materijala s obzirom na većinu drugih AM postupaka.

Nedostaci su dimenzijska postojanost u smjeru z-osi, mehanička i toplinska svojstva su nehomogena zbog korištenja ljepila između slojeva. [1]

2.6. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (DLP)

Postupak koji koristi tzv. fotoosjetljivu akrilnu smolu na koju se iz DLP izvora svjetlosti projecira slika presjeka modela za taj sloj. Postupak je predstavljen 1987. godine.

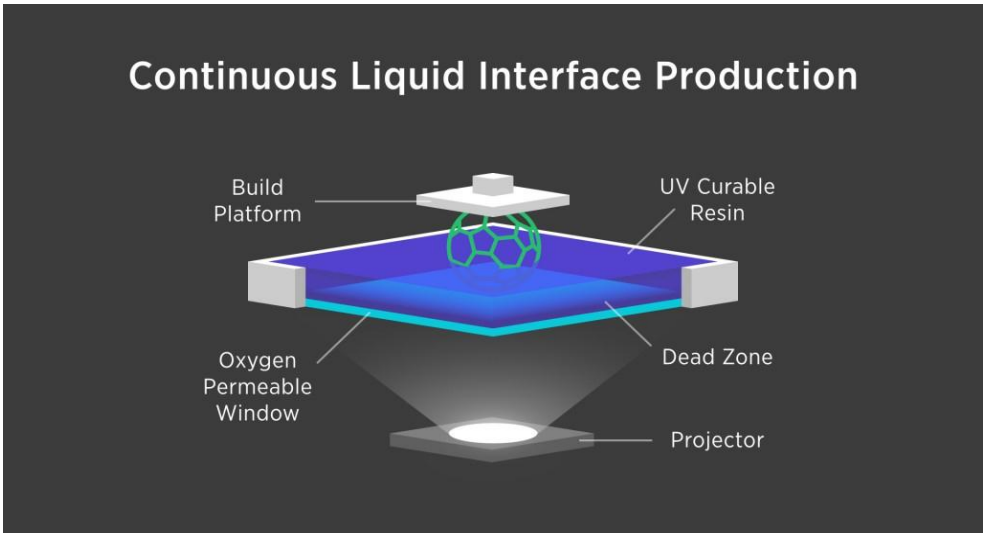


Slika 17. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom [1]

Prednosti su brza i jednostavna izmjena materijala, mogućnost izbora različitih materijala. Nedostaci su potreba za potpornom strukturom i mogućnost izrade modela manjih dimenzija. [1]

2.7. Postupak neprekinutog očvršćivanja tekućine (CLIP)

Najnoviji postupak aditivne proizvodnje predstavljen je u 3. mjesecu 2015 godine (tijekom pisanja ovog rada). Od trenutno dostupnih informacija može se zaključiti da je postupak drugačiji od spomenutih jer ne stvara izradak sloj po sloj nego iz jednog komada koji se izrađuje iz tekućeg polimera. Postupak je sličan DLP-u ali uz par bitnih razlika kao materijal koji se koristi i princip rada uređaja koji je prikazan na slici 18.



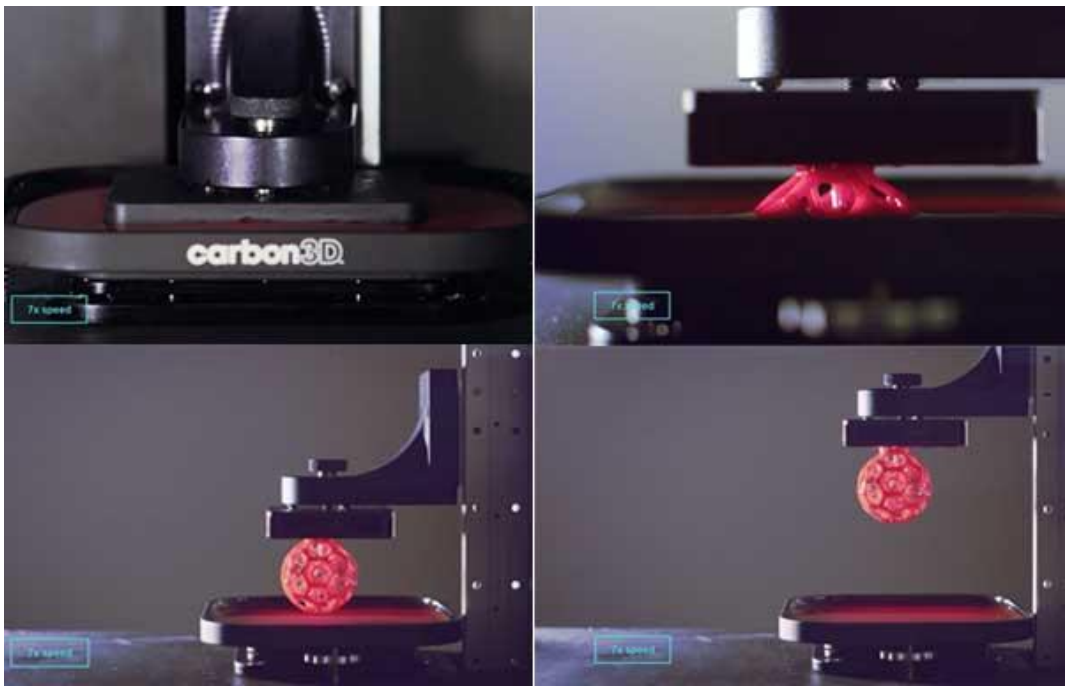
Slika 18. Postupak neprekinutog očvršćivanja tekućine (CLIP)

Princip rada se temelji na tome da se neprekidno svjetlo i kisik usmjeravaju kako bi iz komore sa tekućim polimerom neprekidno izrađivali izradci. UV svjetlo potiče polimerizaciju, a kisik čini atmosferu unutar koje se polimerizacija odvija. Bitan je pravilan omjer jakosti UV svjetla i količine kisika. Iz tog razloga u uređaju se nalazi specijalni prozor koji je propustljiv za kisik i transparentan za svjetlost. Pomoću njega se podešava protok kisika kako bi se stvorile tzv. "mrtve zone" u komori sa materijalom gdje je polimerizacija onemogućena.

Svijet je zapanjila činjenica da je CLIP postupak 25-100 puta brži od ostalih postupaka aditivne proizvodnje. [26]

Prednosti su konstantna mehanička svojstva jer su izradci kreirani iz jednog komada, mnogo brža izrada, izbor materijala je širok, kvaliteta izradaka, mogućnost izrade vrlo komplicirane geometrije izradaka, meh. svojstva i kvaliteta vanjske površine su najbliža postupku brizganja polimernih materijala.

Nedostaci su što je ovaj postupak još u fazi komercijalizacije tako da nije moguće nabaviti uređaj i testirati izjave proizvođača. Cijena uređaja će vjerojatno biti visoka.



Slika 19. Postupak nastanka CLIP postupkom [27]

3. TALOŽNO OČVRŠĆIVANJE (FDM – Fused deposition modeling)

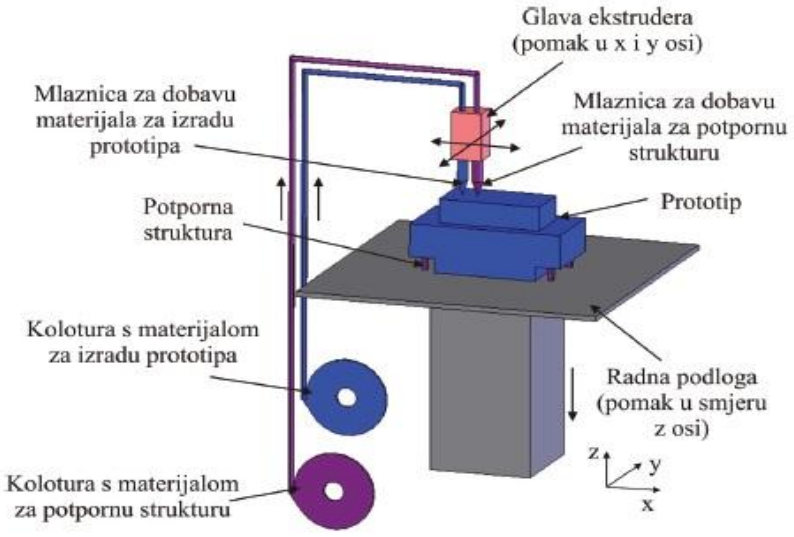
Taložno očvršćivanje (FDM) je jedan od postupaka AM tehnologije kojim stvaramo model, prototip, gotovi proizvod itd.

Postupak je izmislio S. Scott Crump kasnih 1980-tih a postupak je komercijaliziran 1990-tih od tvrtke Stratasys. Također je poznat kao FFF (Fused filament fabrication) postupak te PJP (Plastic jet printing).

Istekom prava na patent za ovu tehnologiju otvorila se mogućnost stvaranja jeftinog 3D printera za kućanstva i urede. Uređaj koji je 2010. koštao 20.000 $ danas košta manje od 1.000 $. [19]

Vođeni razvojem FDM tehnologije (manje cijene, mnogo veća ponuda uređaja, ponuda materijala) u tvrtki Strijelac d.o.o. su se početkom 2014. odlučili na nabavu jednog takvog stroja. Riječ je o Flashforge Creator 2X koji je korišten u praktičnom dijelu ovog rada.

3.1. Princip rada



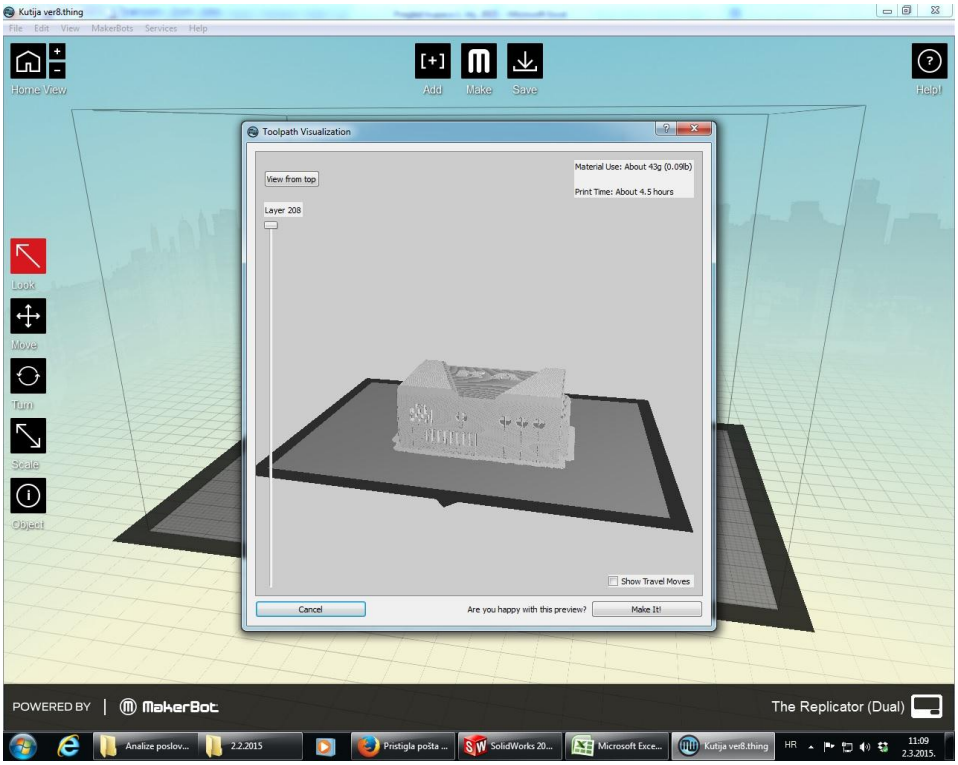
Slika 20. Princip rada Taložnog očvršćivanja [20]

Polimerni materijal u obliku žice se nalazi na kolutu te se kroz vodilice dovodi do glave uređaja gdje se pomoću grijača rastaljuje u kapljevito stanje. Materijal se zagrijava na temperaturu malo iznad temperature očvršćivanja jer u sljedećem koraku napušta mlaznicu u omekšanom stanju i na radnoj podlozi se vrlo brzo skrućuje.

Razlikujemo uređaje sa i bez grijane komore. Uređaji s grijanom komorom su skuplji i imaju veću preciznost i ponovljivost. Uređaje bez grijane komore dijelimo na one sa i bez grijane radne podloge. Grijana radna podloga je bitna prilikom izrade modela iz materijala kao što je npr. ABS jer pri sobnoj temperaturi nebi mogli ostvariti dobar kontakt prvog sloja.

Uređaji su računalno upravljani programom koji prvo podijeli model u slojeve po z-osi a

zatim kreira kod upravljanja potreban da bi se model izradio. Na slici 21 vidljiv je takav prikaz uz koji je moguće vidjeti kako će izgledati sloj po sloj, broj slojeva, putanje glave uređaje, vrijeme trajanja procesa, procjena mase modela i izgled modela.

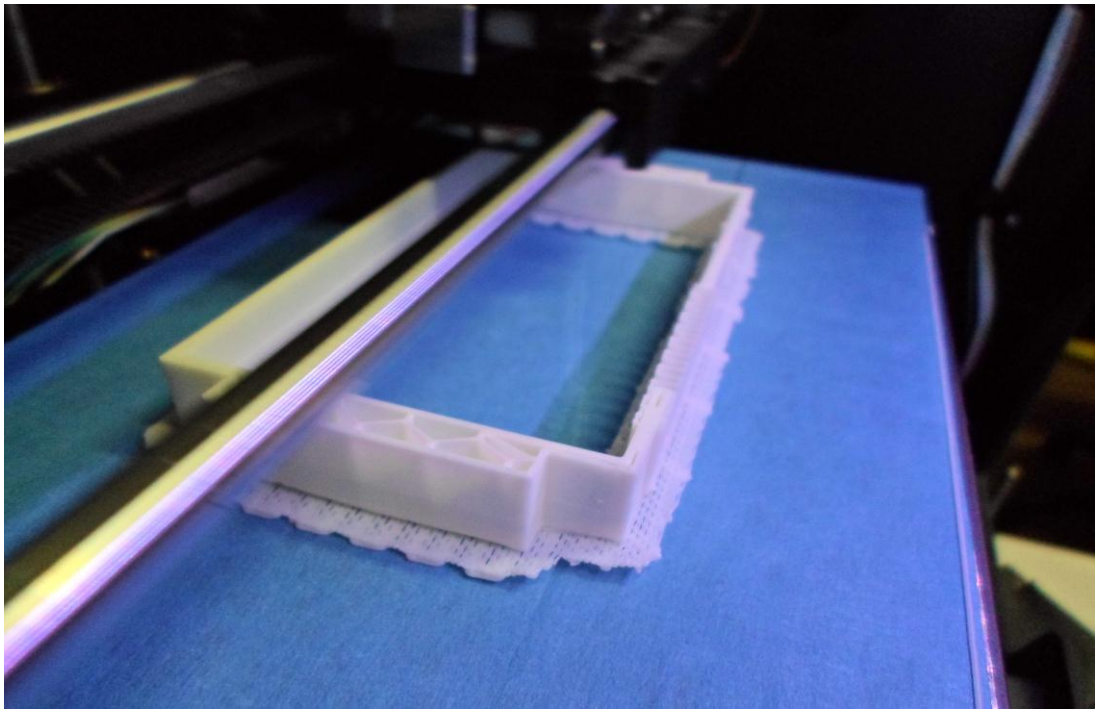


Slika 21. Primjer u Makerware programu

Nakon izrade prvog sloja radna podloga se pomakne za visinu idućeg sloja po z-osi. Na prvi sloj se nanosi materijal za drugi sloj i tako se postupak ponavlja dok se ne završi sa zadnjim slojem.

Geometrijske oblike koji nisu podržani strukturom ispod sebe izrađujemo uz kreiranje potporne strukture koja može biti iz istog ili različitog materijala. U praktičnom dijelu je korišten model takve geometrije (Slika 18) ali je izrađen iz istog materijala kao i sam model. Uređaji sa dvije glave ekstrudera mogu izrađivati model iz jedne glave, a potpornu strukturu iz druge. Primjer potporne strukture najbolje je prikazan na slici 9.
Potporna struktura se relativno lako odstranjuje.

Prilikom izrade debelostijenih modela postoji opcija izbora ispunjenosti modela koje se bira u postotcima. Praksa je pokazala da kod uređaja bez grijane komore je bolje ne koristiti potpunu ispunjenost jer su greške vitoperenja mnogo izraženije. Više o nedostacima FDM postupka navedeno je u poglavlju 3.3. Ukoliko struktura nije potpuno ispunjena obično se stvaraju saćasti (šesterokutni) oblici kako bi model imao potrebnu čvrstoću (slika 22).



Slika 22. Prikaz stvaranja saćaste strukture

Plava podloga na slici 19 je sloj trakastog materijala komercijalnog naziva "blue tape" koja se koristi radi lakšeg nanošenja prvog sloja na radnu podlogu. Koristi se i staklena podloga ili sloj tzv. "Kapton tape-a".

3.2. Materijali

Uređaji bez grijane komore najčešće upotrebljavaju ABS i PLA materijale. Odnosno za ABS trebaju biti opremljeni sa grijanom radnom podlogom. Zbog naglog rasta popularnosti ovakvih uređaja izbor materijala se širi svakodnevno.

PLA odnosno polilaktidna kiselina je biorazgradivi termoplastični poliester koji nastaje iz obnovljivih izvora kao što su kukuruzni škrob (u SAD-u), korijeni tapioke, krumpir (u Aziji). To je jedini materijal za aditivnu proizvodnju, a da se ne koristi i u postupku brizganja polimernih materijala odnosno vrlo rijetko. Ima slična mehanička svojstva kao PETE polimer. [21]
Najčešće korišteni materijal za aditivnu proizvodnju jer ne zahtjeva grijanu podlogu stoga se primjenjuje na najjeftinijim uređajima sa jednom glavom ekstrudera.

ABS je često upotrebljavani termoplastični polimer sa vrlo dobrom udarnom čvrstoćom i krutošću. [22] Prilikom izrade sa FDM postupkom uređaj mora imati grijanu komoru ili grijanu radnu podlogu. Skloniji je pojavi vitoperenja nego PLA, a izradci su nešto mekši.

LayWood je posebno razvijen materijal za korištenje u FDM tehnologiji. On dolazi u obliku vlakna u kombinaciji drvo / polimer smjese (također se primjenjuje naziv WPC). [23]

Najlon je vrsta sintetičkog polimera koja slovi kao najzahtjevniji materijal za FDM uređaje.

Često se koristi kod potrebe za transparentnim modelima. Ima tendenciju začepljenja mlaznica i teško je očistiti mlaznicu u potpunosti. [24]

Polikarbonat je termoplastični polimer komercijalno također nazivan Lexan i Makrolon. Široke primjene u industriji zbog mehaničkih svojstava kao visoka udarna čvrstoća i izdržljivost. [25]

Osim navedenih koriste se i Poliamid, TPE, PET, PVC, PVA, PE itd. ali su u istraživačkoj fazi. Vjerojatno ćemo u skoroj budućnosti vidjeti i njih u ponudi. Također je moguće ekstrudirati i čokoladu.

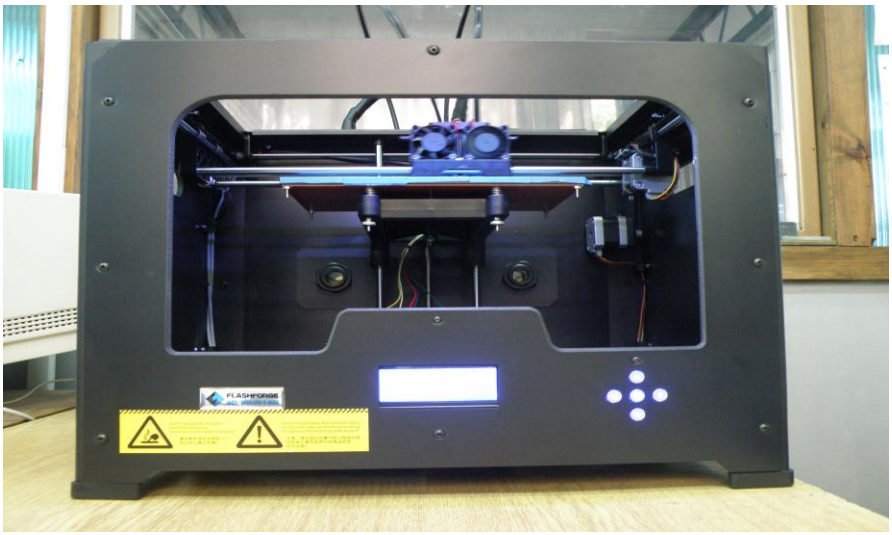
3.3. Prednosti i nedostaci

Prednosti FDM postupka su relativno brza izrada, malo početno ulaganje, niska cijena materijala i potrošnih dijelova, mogućnost korištenja više materijala, mogućnost izrade modela iz dva različita materijala odnosno dvije različite boje, sigurnost rada stroja, prototipove je moguće naknadno bojati, brusiti i sl. Velika prednost je što nije potrebno hlađenje prototipa te je moguća izrada više prototipova odjednom, odnosno koliko ih stane na radnu podlogu. [1]

Nedostaci FDM postupka su nepredvidljivo skupljanje materijala, vidljive su linije slojeva stoga je često potrebna naknadna obrada, vitoperenje materijala i raslojavanje, čvrstoća je smanjena u okomitom smjeru prema smjeru izrade, nemogućnost izrade oštrih rubova jer je mlaznica okruglog presjeka, dimenzijka točnost i postojanost. [1]

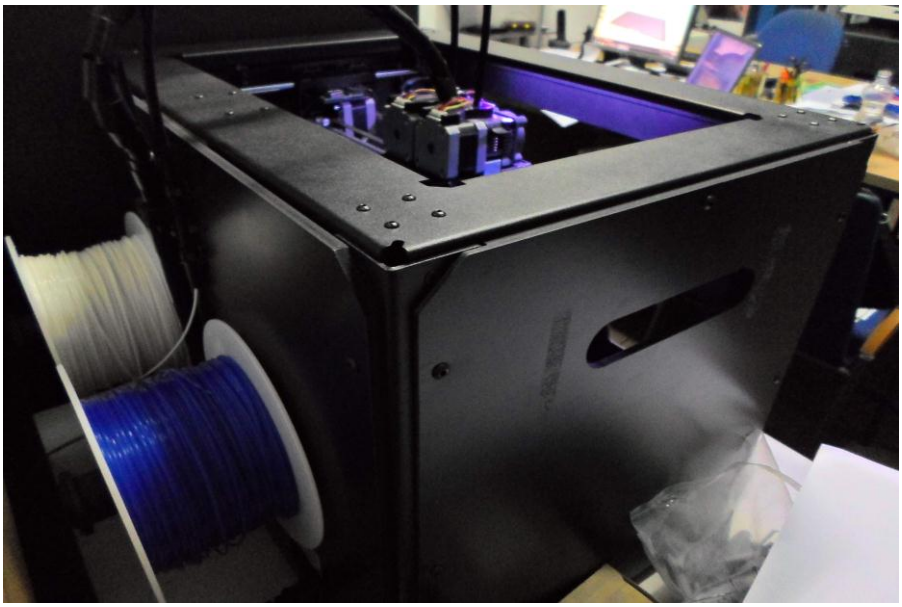
4. OPIS FDM UREĐAJA KORIŠTENOG U PRAKTIČNOM DIJELU RADA

Korišten je uređaj Flashforge Creator X sa dvije mlaznice, odnosno dvije ekstrudorske glave. Uređaj je relativno malih dimenzija i može biti korišten kao uredski uređaj kao što je prikazano na slici 23.



Slika 23. FDM uređaj Flashforge Creator X

Kao i kod većine uređaja sa FDM tehnologijom materijal se dobavlja do glava uređaja pomoću plastičnih vodilica. Materijal je u obliku žice promjera 1,75 mm namotane na kolut koji je smješten na stražnjoj strani uređaja kao što je prikazano na slici 24. Prilikom izmjene materijala jednostavno se mijenja cijeli kolut.



Slika 24. Lokacija materijala na Flashforge Creator X uređaju

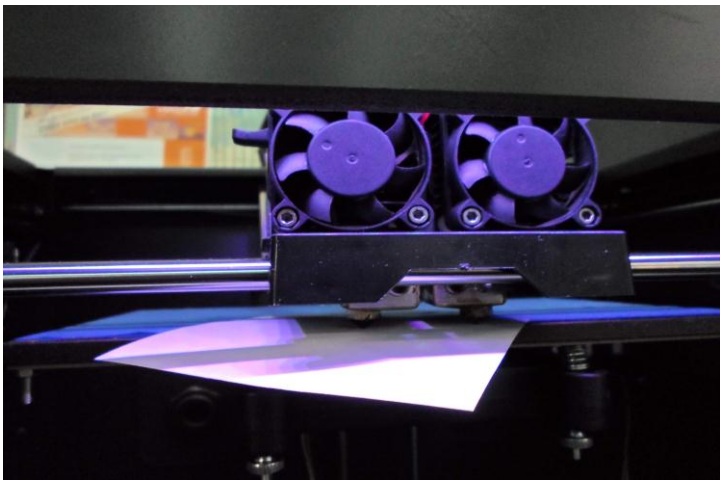
Princip rada je kao i kod ostalih FDM uređaja. Izradak se izrađuje sloj po sloj u pogledu po z-osi. Ekstrudorske glave sa mlaznicama se pomiču po x i y osi pomoću elektromotora, remenja i metalnih vodilica. Nakon nanošenja prvog sloja na radnu površinu, ista se spušta za visinu jednog sloja po z-osi, kako bi se nanio idući sloj. Postupak se ponavlja dok se ne završi zadnji sloj.

4.1. Općenito o korištenom uređaju

Ovakav tip uređaja ima veliku prednost zbog troškova nabave uređaja te naknadnih troškova materijala i održavanja. Cijena uređaja je oko 900 EUR. Iako se cjenovno nude prihvatljiviji uređaji, praksa je pokazala da oni najjeftiniji imaju problema pri izradi i jednostavnijih izradaka. Vitoperenja materijala i raslojavanja su izraženija ali još veći nedostatak je često loša kvaliteta izrade i nedostatak kontrole kvalitete nakon montaže. Dobar primjer za navedeno je kod uređaja s dvije ekstrudorkse glave gdje je bitno da su obadvije glave idealno poravnate kako glava s mlaznicom koja trenutno ne izrađuje izradak ne bi oštetila, srušila ili pomaknula izradak. Ako se to dogodi postupak se mora ponoviti od samog početka ali prvo treba rastaviti glave kako bi se omogućilo njihovo poravnavanje.

Potencijalni problem se javlja prilikom tvornički neprecizno namotanih kolutova kod kojih dolazi do stvaranja zapetljanja materijala te u konačnici njegovog pucanja. To također znači da nije stroj moguće ostaviti da radi samostalno već ga je potrebno nadzirati. Problemi u obliku začepljenja mlaznice su normalna pojava ukoliko materijal ima nečistoća u sebi. Također materijal promjera 1,75 mm ne smije odstupati više od 0,10 - 0,15 mm inače također dolazi do prekida ekstrudiranja materijala, odnosno njegovog pucanja.

Najnovija generacija ovakvih uređaja primjenjuje automatsko poravnavanje radne površine. Korišteni Flashforge nema tu opciju. Poravnavanje radne površine je omogućeno sa tri vijka na dnu. Kako bi površina bila jednako poravnata, sa svih strana, potrebno je pokrenuti program na uređaju. Ekstrudorske glave se dovode u pet različitih pozicija iznad radne površine. Na svih pet pozicija mlaznice bi trebale biti udaljene od radne površine za debljinu običnog papira, odnosno 0,1 mm, kako je prikazano na slici 25.



Slika 25. Postupak poravnavanja mlaznica i radne površine

Još jedan potencijalni problem koji se zna pojaviti je začepljenje zubaca na zupčaniku koji pogoni materijal prema grijaču. Princip pogona materijala temelji na potrebnoj sili trenja da se sa okretom zupčanika materijal linearno nastavlja dalje gibati. Začepljenjem prostora između zubaca se potrebna sila trenja smanji do razine gdje materijal nije moguće ekstrudirati. Tada dolazi do pojave "kliktanja" u uređaju jer materijal preskače zupce. Kvar se rješava pažljivim čišćenjem zupčanika.

Parametri koji se mogu mijenjati uključuju: visinu sloja (preciznost izrade), temperaturu grijane radne podloge, temperaturu u grijaču, brzina pomicanja po x i y osi prilikom ekstrudiranja materijala, brzina pomicanja po x i y osi dok se materijal ne ekstrudira, ispunjenost površine izradka u postocima (od 10 do 100%), mogućnost upotrebe potporne strukture, mogućnost upotrebe debljeg početnog sloja kako bi se omogućilo bolje prianjanje prvog sloja izradka, mogućnost postavke izradka na određenu lokaciju na radnoj podlozi (nije nužno u sredini) i pod željenim kutom u odnosu na sve tri osi, mogućnost izrade izradaka odjednom iz više istih ili različitih 3D CAD datoteka. Zanimljiva je mogućnost izmjene vrste i boje materijala u bilo kojem trenutku izrade. Jedan izradak može biti iz koliko korisnik želi boja samo što je ograničen da zamjenu izvrši nakon određenog broja slojeva po z-osi, odnosno izradak će imati različite boje samo po visini (z-osi). Postupak se odrađuje tako da se izrada pauzira i za to vrijeme fizički izmjeni kolut sa materijalom.

Detaljnije informacije o uređaju:

- dva ekstrudera
- STL/OBJ format datoteke
- preciznost printa: 0,1-0,2mm
- debljina sloja: 0,1-0,5mm
- veličina ploče za printanje: 225x145xx150mm
- promjer dizne: 0,4 mm
- vrste materijala: ABS i PLA
- promjer materijala: 1,75 mm

4.2. Zaključak o Flashforge uređaju

Zaključak o ovom uređaju je da je vrlo povoljan za nabavu i daljnje održavanje. Materijal u obliku koluta od 1kg je trošak od 250-400 kn, zavisno o proizvođaču. Pouzdanost i robusnost je bolja nego kod prve generacije ovakvih uređaja koji su imali drveni okvir. Kod prve generacije su se javljali problemi zbog pretjeranih vibracija. Iz tog razloga druga generacija ima metalni okvir. Takav uređaj je korišten u ovom radu. Najveći nedostatak je otvorena radna površina zbog čega se povećavaju izgledi za raslojavanje izradka. Taj nedostatak je proizvođač riješio ugradnjom akrilnih ploča u treću generaciju kako bi se zatvorile sve šupljine i time izolirala radna površina od mogućih naleta propuha.

Svladavanje korištenja uređaja je prilično jednostavno ali treba uzeti u obzir vrijeme za

testiranje parametara za izradu i razumijevanja što se dobiva sa svakom izmjenom. Zbog niza opcija parametara i uz pojavu manjih ili većih grešaka nabrojanih prije, potrebno je operateru da stekne određeno iskustvo, odnosno "know-how" oko podešavanja parametara. Iako su često reklamirani kao kućni uređaji za aditivnu proizvodnju, praksa je pokazala da su još daleko od toga.

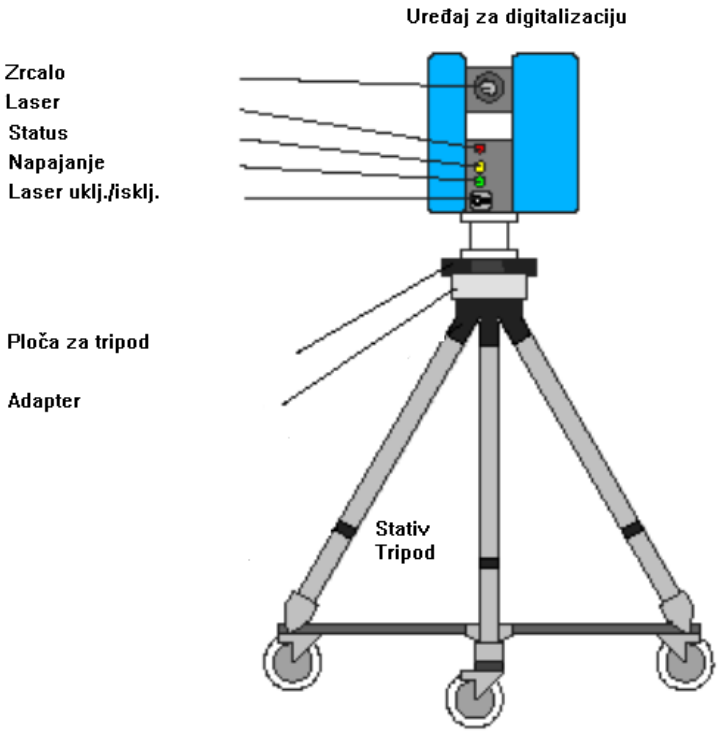
Buka koja se proizvodi tijekom rada nije puno veća od prosječnog uredskog računala. Problem toksičnosti zraka se pojavljuje pri korištenju određenih vrsta polimera. Iako nije riječ o trajno štetnim količinama za ljude, preporučuje se da se uređaj koristi u dovoljno velikim prostorijama ili onim sa adekvatnim prozračivanjem.

5. UREĐAJI ZA DIGITALIZACIJU

Uređaji za digitaliziciju su poznati i pod nazivom "3D skeneri". To su uređaji koje koristimo za povratno inženjerstvo, odnosno kada digitaliziramo gotov proizvod ili prototip kako bi kreirali CAD datoteku. To su uređaji koji analiziraju objekt ili okolinu kako bi prikupili podatke o njenom obliku i po mogućnosti boji. Prikupljeni podaci se koriste da se kreira digitalni trodimenzionalni model. Uvrštavamo ih u nedestruktivne načine testiranja. [28]
Na slici 26 je prikazan jedan takav uređaj.

Prema izvoru svjetla dijelimo ih na:
a) laserske
b) sa strukturiranim svjetlom

U praktičnom dijelu ovog rada smo iskoristili uređaj za digitalizaciju kako bi iz modela kreiranih AM tehnologijom dobili usporedbu s nominalnom CAD datotekom.



Slika 26. Uređaj za digitalizaciju

5.1. Princip rada

Prema principu rada dijelimo ih na kontaktni i nekontaktni tip.

Osnovni princip rada je na temelju prikupljenih točaka s geometrije površine objekta kojeg skeniramo (tzv. point cloud). Te točke se koriste kako bi se rekonstruirala geometrija objekta na temelju udaljenosti tih točaka od uređaja. Uređaji za digitalizaciju se mogu usporediti s klasičnim kamerama. Obadvoje imaju konično polje snimanja i mogu prikazati sliku objekta. Za većinu slučajeva jedna slika, odnosno "scan", neće biti dovoljan. Katkad se radi o stotinama slika iz

različitih smjerova koje se obrađuju kako bi dobili 3D model.

Kod uređaja sa strukturiranim svjetlom projecira se uzorak svjetla na objekt i traži deformacija uzorka objekta koji se digitalizira. Projekcija se vrši pomoću LCD projektora ili nekog drugog tipa stabilnog izvora svjetlosti. Pomoću projekcije se izračuna udaljenost svake točke objekta. To čini ovaj postupak brzim i preciznim. Neki postojeći uređaji su sposobni digitalizirati pokretne objekte u stvarnom vremenu. Tvrtka VisionMaster stvara uređaj za digitalizaciju s 5 megapikselnom kamerom s kojom omogućuje digitaliziranje 5 milijuna točaka u svakom kadru.

Laserski uređaji koriste princip triangulacije pri stvaranju modela. Lasersko svjetlo se usmjeri na objekt s kojim dobivamo udaljenost točke na objektu gdje ju je laser obasjao. Ovisno o tome koliko daleko laserska zraka udari od površinu, laserska točka pojavljuje se na različitim mjestima u polju gledišta kamera. Ova tehnika se zove triangulacije jer laserska točka, kamera i laserski odašiljač tvore trokut.

5.2. Prednosti i nedostaci

Prednosti su brza rekonstrukcija postojećih proizvoda, rekonstrukcija oštećenih dijelova, brza provjera funkcionalnosti i ergonomije prototipa sa kombinacijom AM tehnologije, točnost rezultata, smanjenje troškova razvoja, ušteda vremena provjere prototipova.

Nedostaci su visoki troškovi početnog ulaganja, mogućnost korištenja na objektima određene veličine koji su optimalni za taj specifični uređaj, potrebna je obuka i vrijeme za savladavanje korištenja uređaja i računalnog programa za digitalizaciju. Često se pojavljuju greške prilikom digitalizacije prozirnih, sjajnih ili zrcalnih površina.

5.3. Primjena

Najčešće se upotrebljavaju u svrhu povratnog inženjerstva. Osim navedenog primjenjuju se kao "oko" u robotima, kontrola kvalitete, informacije o količini, dokumentiranje povijesnih lokacija, forenzička dokumentacija itd.

Kako je svjetsko tržište u konstantnom razvoju tvrtke su prepoznale značaj ergonomije u razvoju svojih proizvoda. [30] Uređaji za digitalizaciju uvelike olakšavaju u procesu zadovoljavanja ergonomije korisnika.

5.4. Uređaj korišten u praktičnom dijelu rada

Prilikom digitalizacije izradaka izrađenih aditivnom proizvodnjom korišten je uređaj Steinbichler Optotechnik serije Comet 5 1.4 M koji se nalazi na Veleučilištu u Karlovcu. Uređaj sa svim potrebnim komponentama je vidljiv na slici 27.

Slika 27. Uređaj za digitalizaciju Comet [29]

S ovim uređajem je moguće digitalizirati objekte veličine 444 mm u dužinu, 330 mm u širinu i 250 mm u visinu. Svi ostali parametri su prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Parametri Comet uređaja za digitalizaciju [29]

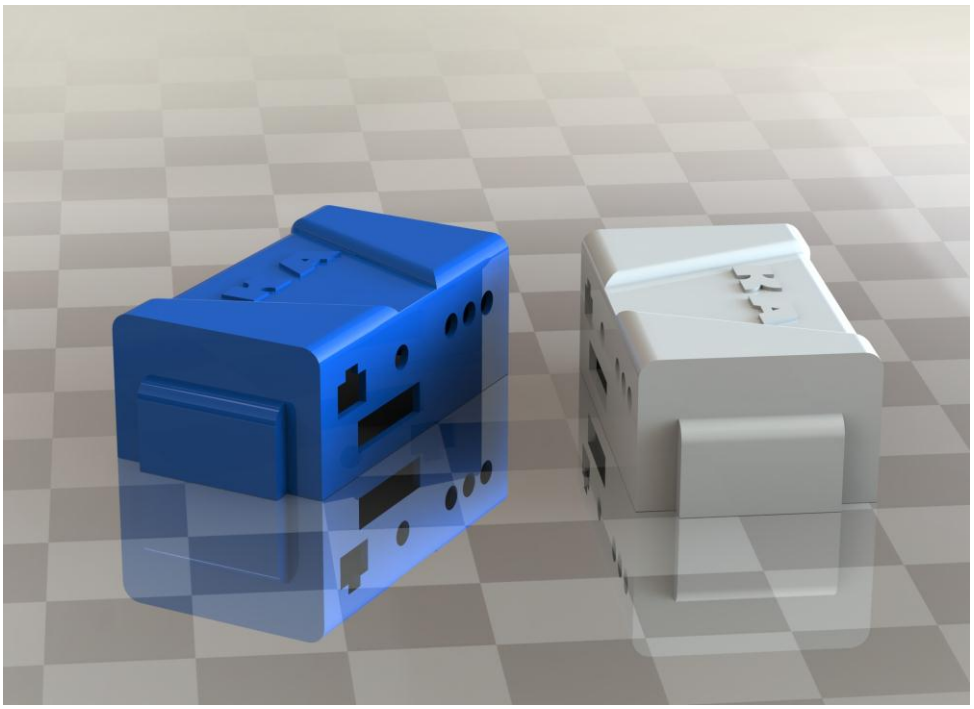
Mjerni volumen (x, y, z):	444 x 330 x 250 mm^3
Rezolucija kamere:	1.4 Mpx
Mjerna udaljenost (z):	850 mm
Mjerna udaljenost točaka (x, y):	0,320 mm
Veličina (W H D):	modul kamere 160 x 235 x 155 mm^3: projektor modul : 280 x 255 x155 mm^3: duljina snopa 600 mm
Vrijeme po prikazu:	2 sec. (Mod velike brzine)
Izvor svjetlosti 200W:	Lampa s visokim tlakom pražnjenja
Podržani formati podataka:	Catia V4/V5, IGES, STEP,Pro/E, TXT, STL

6. PRAKTIČNI DIO RADA

Ideja za ovaj rad poslužio je stvarni primjer iz struke viđen u tvrtki Strijelac d.o.o. te problemi koji su se pojavili sa FDM AM tehnologijom. Radi zaštite prava na korištenje stvarne dokumentacije kreiran je novi 3D model u svrhu ovog rada koji dijeli neka dizajnerska rješenja kako bi rekreirali probleme viđene u stvarnom primjeru. Cilj je provjeriti dimenzijsku postojanost na pet izradaka kreiranih iz PLA materijala i pet iz ABS materijala. U konačnici će se ustanoviti koji je materijal pogodniji za korištenje pri izradi prototipova u spomenutoj tvrtki, odnosno iz kojeg se dobivaju dimenzijski točniji izradci. Podaci o točnosti su se dobili usporedbom nominalnog 3D modela kreiranog u SolidWorks CAD programu i 3D modela dobivenog uređajem za digitalizaciju, tj. iz deset takvih modela.

6.1. Proizvod

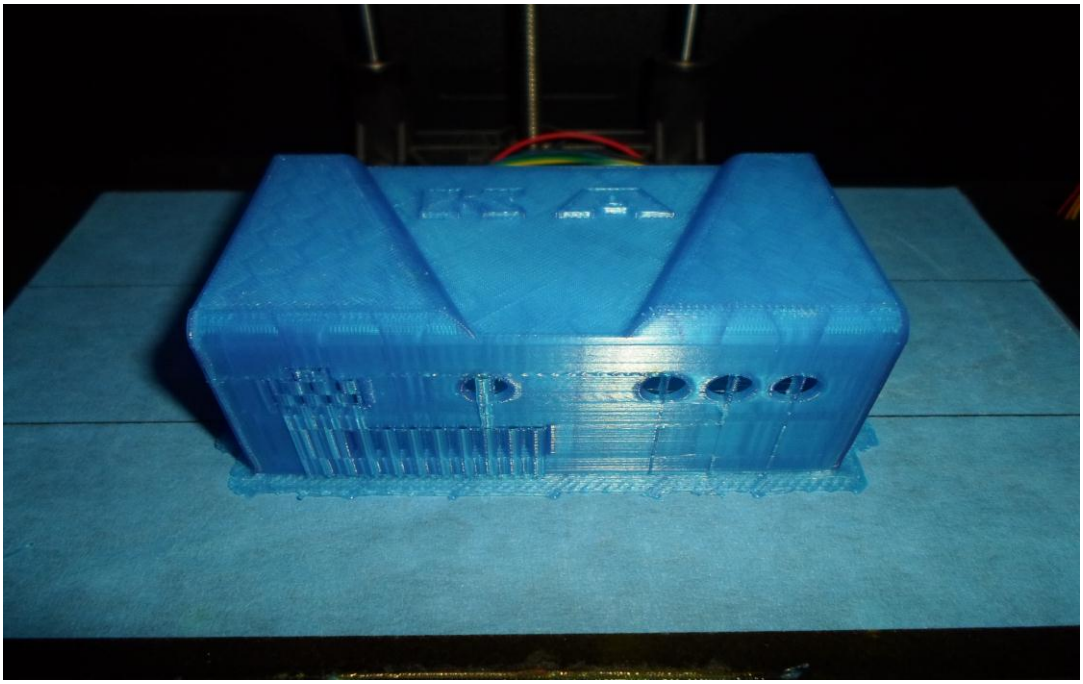
Izradak, odnosno proizvod koji je izrađen na FDM uređaju je rekreacija kućišta elektroničke kutijice. Na slici 28 je prikaz proizvoda kao 3D model.



Slika 28. Proizvod u 3D prikazu

Detaljniji prikaz sa svim dimenzijama je u prilogu 1.

Na FDM uređaju je izrađeno ukupno deset ovakvih proizvoda. Pet su iz ABS materijala (bijela kućišta) a pet su iz PLA materijala (plava kućišta). Kućište je dimenzija 100 x 60 x 41 mm (D x Š x V) sa debljinom stjenke od 2 mm.



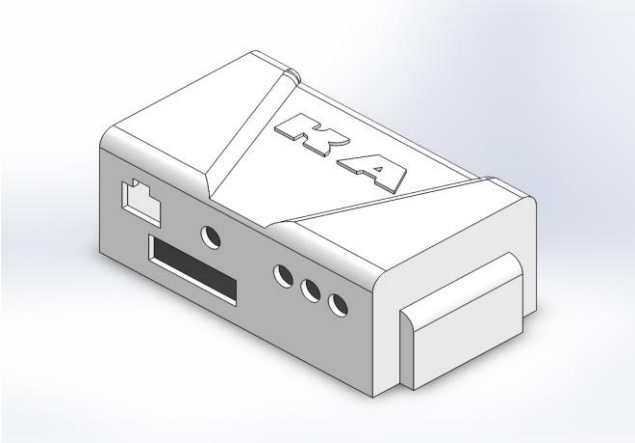
Slika 29. Proizvod nakon izrade aditivnom proizvodnjom

6.2. Problematika

Prvi korak za izradu bilo je modeliranje 3D modela u programu SolidWorks 2014. Cilj je bio konstruirati kućište elektroničke kutije s istom debljinom stjenke kao i u spomenutom primjeru u praksi. Dužina, širina, visina, utori za konektore su veoma slični. Debljina stjenke od svega 2 mm je glavni problem za greške pri izradi. Izradci sa tankim i visokim stjenkama (dugačak vremenski interval izrade) izrađeni na ovom uređaju ne postižu dobru dimenzijsku postojanost kao skuplji industrijski uređaji. U praksi zbog manjka iskustva s tek nabavljenim uređajem pojavili su se problemi s obadva materijala. ABS je vizualno imao veću sklonost vitoperenju, odnosno odvajanju od radne podloge. S korištenjem PLA materijala došlo je do poteškoća u obliku začepljenja mlaznice. Promjer žice materijala je previše odstupao pa bi došlo do gomilanja materijala i pucanja žice. Pošto naknadno istraživanje nije provedeno to ćemo provjeriti ovim pokusom da zaključimo s upotrebom kojeg materijala su bolji rezultati dimenzijske postojanosti.

Pod pojavom vitoperenja smatramo odvajanje rubova izradka zbog nedovoljnog prianjanja na radnu grijanu podlogu. Te deformacije se javljaju zbog razlika u temperaturi između podloge i izradka. Također treba uzeti u obzir temperaturnu razliku između pojedinih slojeva izradka po z-osi. Sklonost materijala prema vitoperenju ovisi o njegovom kemijskom sastavu.

Raslojavanjem nazivamo pojavu odvajanja dva sloja. Relativno česta pojava prilikom izrade iz ABS-a. Rješava se s postavljanjem uređaja na mjesto gdje nema propuha koji naglo hladi izradak, što je glavni uzrok za raslojavanje. Zbog navedenog novije generacije ovakvih uređaja imaju akrilne ploče kao vanjsku zaštitu.



Slika 30. 3D model proizvoda u SolidWorks 2014 programu

6.3. Izrada modela na FDM uređaju

Nakon kreiranja virtualnog proizvoda, odnosno 3D modela, sljedeći korak je izrada na FDM uređaju za aditivnu proizvodnju. Takav uređaj i njegove mogućnosti su detaljno opisane u poglavlju 4. U SolidWorks programu 3D model pohranjujemo kao STL tip datoteke. To je potrebno kako bi model mogao očitati računalni program za FDM uređaj. Korišten je MakerWare program čiji izgled zajedno s proizvodom iz praktičnog dijela možemo vidjeti na slici 21.

Prilikom izrade proizvoda iz ABS materijala korištene su sljedeće postavke. Ispunjenost od 10% je korištena kako bi se uštedjelo na materijalu i skratilo vrijeme izrade. Na ovakvom tipu uređaja nije pogodno raditi s ispunjenošću od 70-100 % jer su rezultati izradci puno lošijeg izgleda i kvalitete. Visina sloja od 0,20 mm je standardna postavka za ovakav uređaj. Moguće je odabrati visinu sloja od 0,15 mm. Temperatura grijane radne podloge je obavezna kako bi se uspješno prihvatio prvi sloj iz ABS-a. Ta temperatura je inače između 100 i 110 ºC. Brzine pomicanja glave su malo smanjene s obzirom na tvorničke postavke. To je učinjeno kako bi se uređaj manje trošio i time produžio vijek trajanja.

Tablica 2. Parametri korišteni pri izradi proizvoda sa ABS materijalom

Ispunjenost (%)	10
Visina sloja (mm)	0,2
Temperatura grijača (ºC)	225
Temperatua grijane radne podloge (ºC)	102
Brzina glave prilikom ekstrudiranja materijala (mm/s)	60
Brzina glave kad nema ekstrudiranja (mm/s)	90

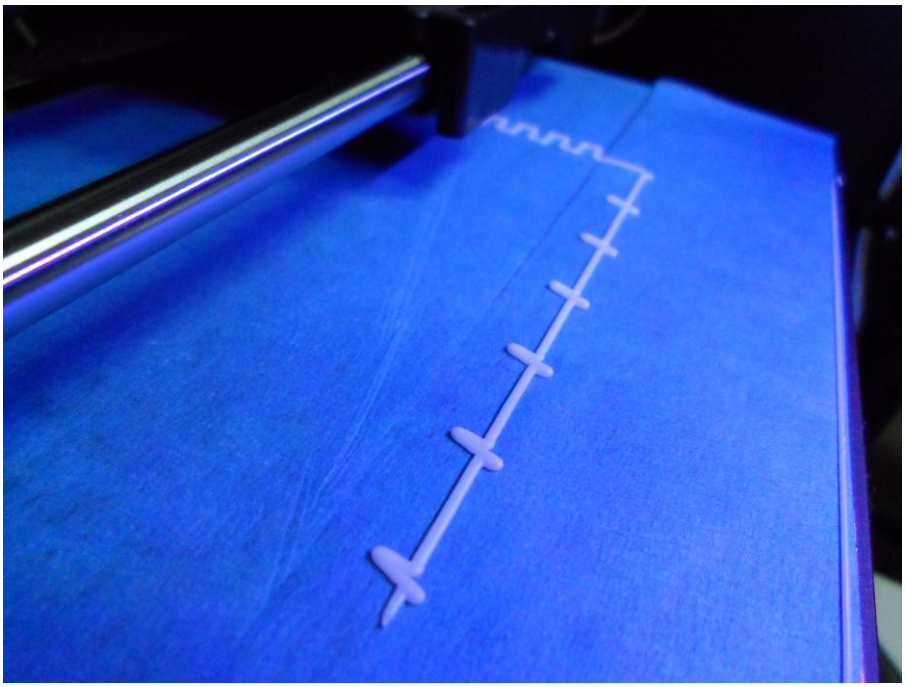
Prilikom izrade proizvoda iz PLA materijala promijenjene su neke postavke. Visina sloja (preciznost izrade) i brzine pomicanja glava su ostale identične. Promijenjena je temperatura grijane radne podloge. U ovom slučaju je namještena na 60 ºC. U pravilu nije potrebno grijati podlogu jer će se PLA uspješno prihvatiti za podlogu i pri sobnoj temperaturi. Taj efekt prihvaćanja prvog sloja se u praksi pokazao boljim ako je grijana radna podloga na 60 ºC. Temperatura grijača je 210 ºC jer je to temperatura pogodna za ekstrudiranje PLA materijala. Svi parametri su vidljivi u tablici 3.

Tablica 3. Parametri korišteni pri izradi proizvoda sa PLA materijalom

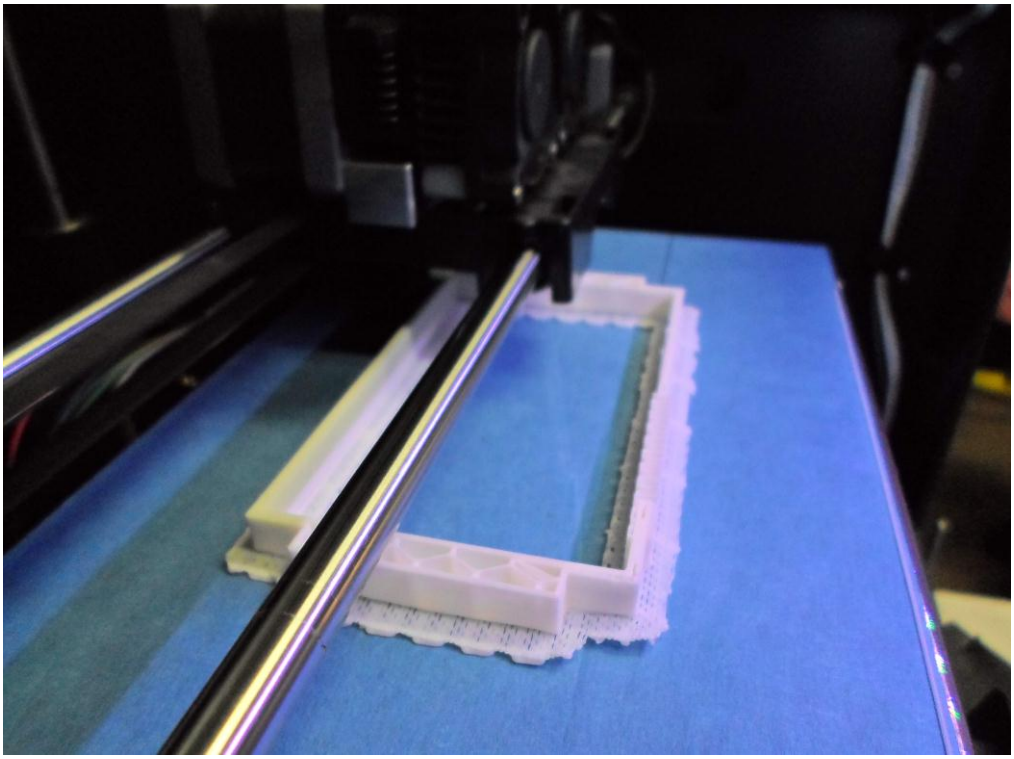
Ispunjenost (%)	10
Visina sloja (mm)	0,2
Temperatura grijača (ºC)	210
Temperatura grijane radne podloge (ºC)	60
Brzina glave prilikom ekstrudiranja materijala (mm/s)	60
Brzina glave kad nema ekstrudiranja (mm/s)	90

Svih deset proizvoda je izrađeno tijekom vremenskog intervala od deset uzastopnih dana tako da su vanjski utjecaji bili minimalni (razlika u temperaturi okoline, vlažnost).

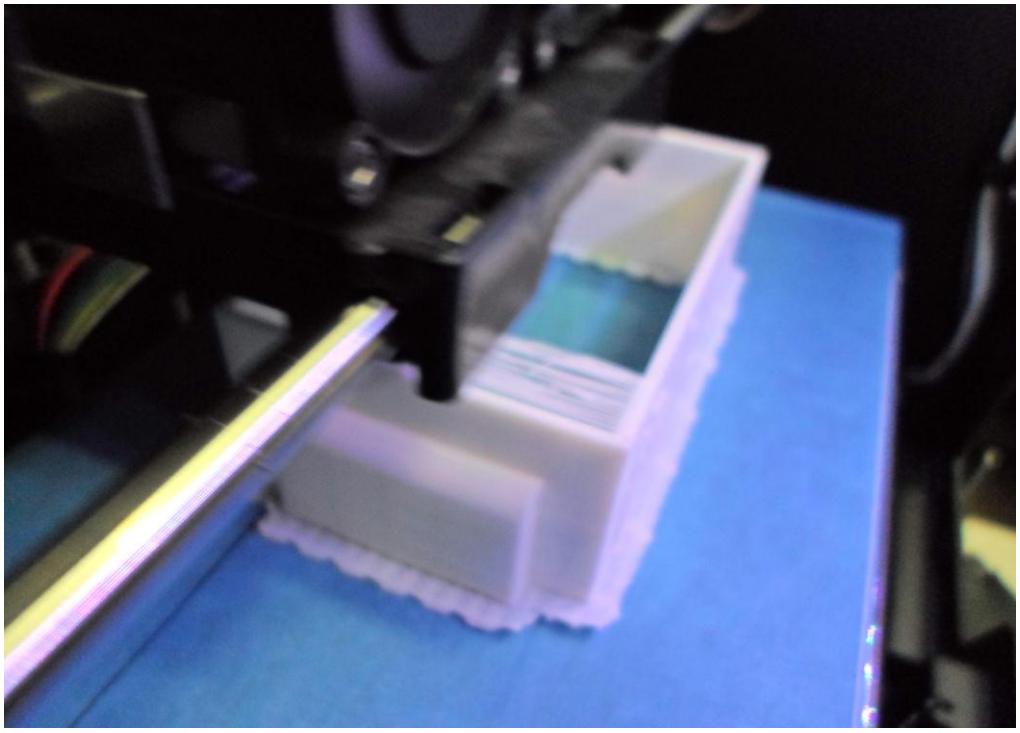
Izrada proizvoda kroz vremenski interval od 3h je vidljiva na idućim slikama.



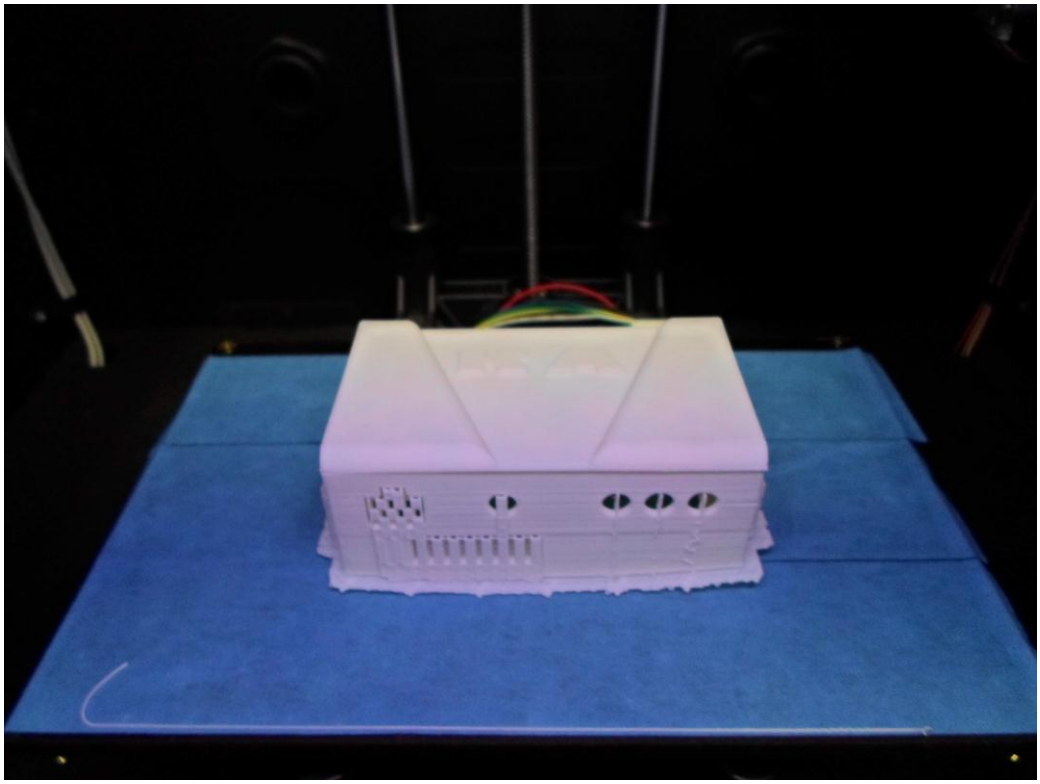
Slika 31. Proizvod u izradi na FDM uređaju (1%)



Slika 32. Proizvod u izradi na FDM uređaju (15%)



Slika 33. Proizvod u izradi na FDM uređaju (85%)



Slika 34. Proizvod u izradi na FDM uređaju (100%)

6.4. Digitaliziranje modela

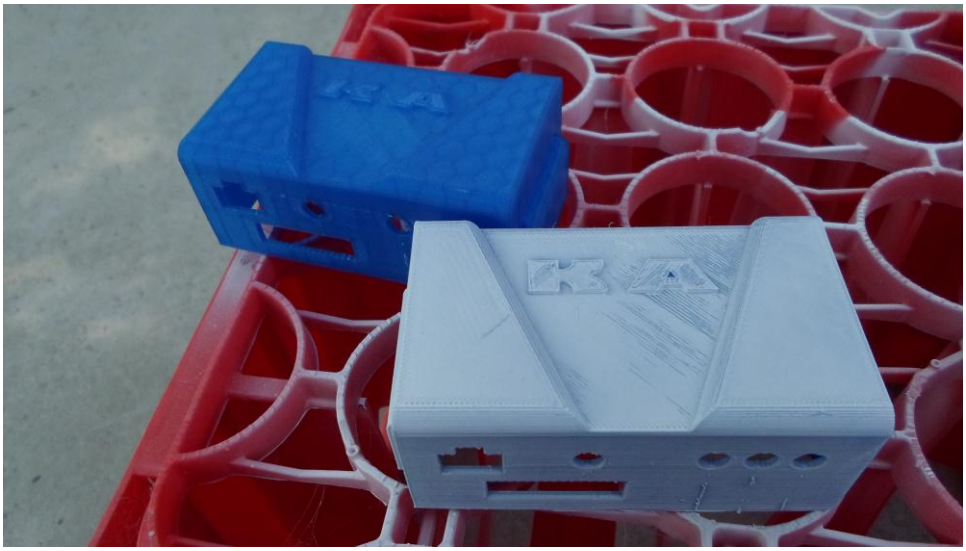
Postupak digitaliziranja proizvoda obavljen je u prostorima Veleučilišta u Karlovcu na opremi Steinbichler Optotechnik serije Comet. Postupak digitaliziranja s navedenom opremom je brzo, jednostavno i precizno. Karakteristike uređaja su navedene u tablici 4.

Tablica 4. Karakteristike uređaja za digitaliziranje [29]

Mjerni volumen (x, y, z)	444 x 330 x 250 mm ^{3}
Rezolucija kamere	1.4 Mpx
Mjerna udaljenost (z)	850 mm
Mjerna udaljenost točaka (x, y)	0,320 mm
Veličina (širina, dužina, visina)	modul kamere 160 x 235 x 155 mm³: projektor modul : 280 x 255 x155 mm³: duljina snopa 600 mm
Vrijeme po prikazu	2 sek. (modul velike brzine)
Izvor svjetlosti 200 W	Lampa s visokim tlakom pražnjenja
Podržani formati podataka	CATIA V4/V5, IGES, STEP, Pro/E, TXT, STL

Nakon probe digitaliziranja proizvoda uočeni su problemi sa proizvodom od PLA materijala. Problem je u reflektirajućoj površini koja otežava digitaliziranje. Problem nije u materijalu, nego u plavoj sjajnoj boji. Bijeli proizvodi iz ABS-a su u mat bijeloj boji pa se taj problem nije pojavljivao.

Rješenje problema PLA proizvoda je u nanošenju privremene prevlake koja nije reflektirajuća. Na slici 35 je vidljiva razlika nakon i prije nanošenja privremene prevlake.



Slika 35. PLA proizdvod nakon i prije nanošenja prevlake

Nakon sljedeće probe dobiveni su zadovoljavajući rezultati i s PLA proizvodom. Slijedilo je digitaliziranje svih 10 proizvoda.

Prosječno digitaliziranje jednog proizvoda je oko 15 minuta računajući i vrijeme uređenja 3D modela.

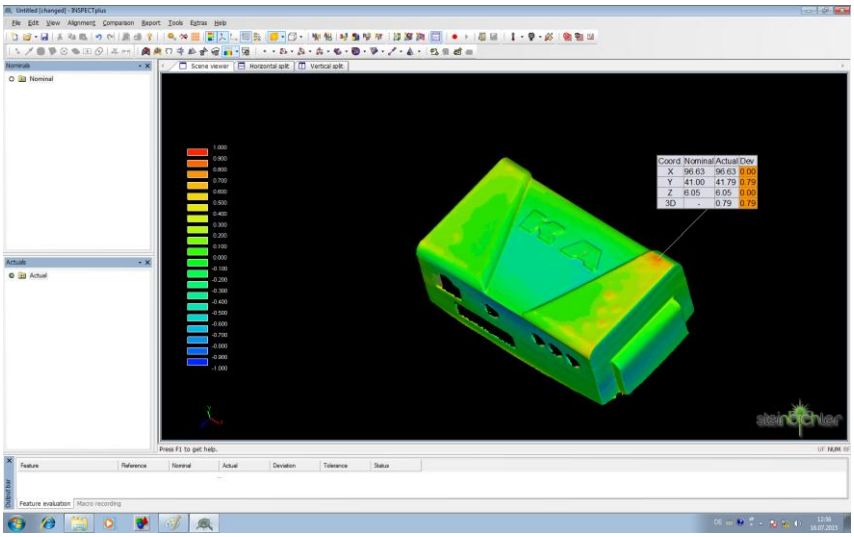
Cilj digitaliziranja je da se dobije STL datoteka, odnosno 3D model na računalu. To se čini spajanjem slika proizvoda u virtualni model. Slike se uzimaju iz različitih kuteva. Proizvod koji se digitalizira je postavljen na okretno postolje. U računalnom programu se podesi broj željenih slika za digitalizaciju tijekom jednog punog okreta postolja. Npr. ako se postavi da je željeni broj slika 10, to znači da će se za svaku sliku okretno postolje okrenuti za 36°.

Nakon punog kruga, na ekranu računala se prikaže 3D model digitaliziranog proizvoda. Potrebno je pregledati model kako bi se uočile potencijalne greške. Kaktkad je bilo potrebno popuniti površinu modela jer se nije dobro digitalizirao. To su normalne pojave tijekom ovakvog postupka. Zato u računalnom programu za digitalizaciju postoji niz alata za brži ispravak modela.

Također treba paziti na površinu okretnog postolja koje mora biti u potpunosti čisto inače će se očitati prašina kao sastavni dio 3D modela. Naknadni ispravci na računalu su mogući, ali oduzimaju dodatno vrijeme. Nakon probe za ovaj rad uočen je problem s prašinom na postolju. Problem je riješen odmah, kako tijekom 10 digitaliziranja nemamo 10 3D modela s istim greškama, nego da vrijeme ispravka svakog modela smanjimo na najmanju moguću mjeru.

Uvjeti u kojima se odvija postupak digitalizacije trebaju biti temperaturno i svjetlosno konstantni. Uređaj za digitalizaciju sadrži senzor za temperaturu tako da odstupanje u temperaturi ne utječe na rezultat. Ako senzor očita temperaturu koja je iznad ili ispod zadane granice, uređaj se ugasi. Količina svjetlosti treba biti konstantna jer direktno utječe na digitaliziranje, odnosno izgled 3D modela.

Izgled dobivenog 3D modela u računalnom programu za digitalizaciju možemo vidjeti na slici 36.

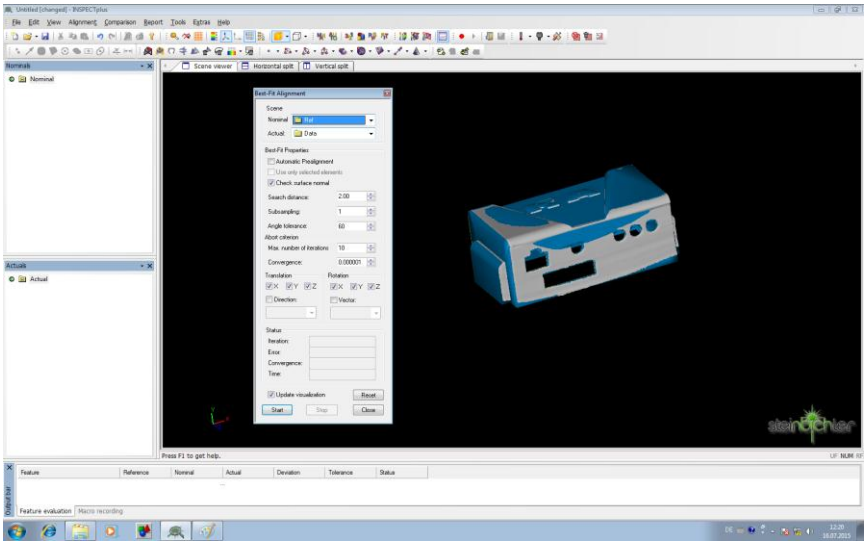


Slika 36. Prikaz 3D modela dobivenog postupkom digitalizacije

6.5. Analiza rezultata

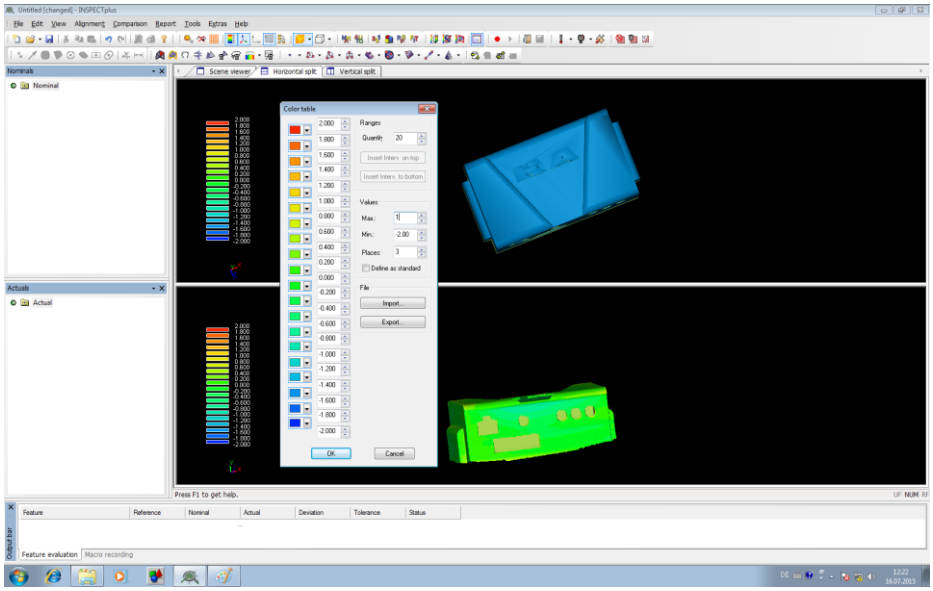
Usporedba rezultata između nominalnog i digitaliziranog 3D modela je moguća pomoću posebnog računalnog programa (Inspection plus software).

Potrebno je prvo odabrati nominalni model, u ovom slučaju naziva „kutija ver 8“. Zatim pod „actual“ je potrebno odabrati model dobiven postupkom digitalizacije. Proizvodi u ovom radu su obilježeni kao ABS 1-5 i PLA 1-5 kako nebi došlo do zabune tijekom obrade rezultata. Dalje je potrebno jednako orijentirati modele u prostoru kako bi ih virtualno preklopili. To se čini pomoću naredbe „alignment“. Naknadno se ručno odvija poravnavanje odabirom nekoliko točaka na svakom modelu. Što se odabere više točaka to će i poravnavanje modela, odnosno koordinatnih sustava, biti točnije. Za poravnavanje modela je odabrana „best fit“ opcija koja je vidljiva na slici 37.



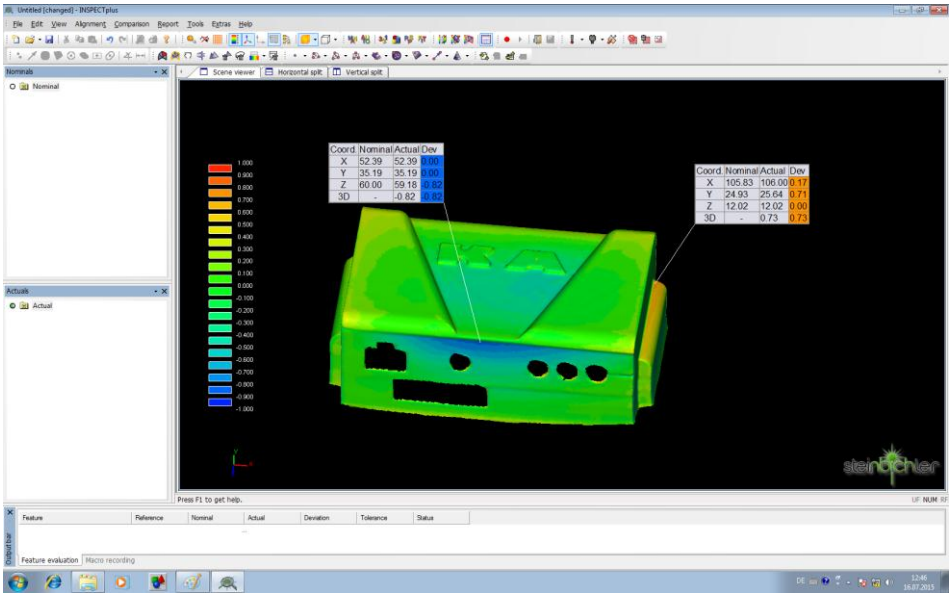
Slika 37. Poravnavanje nominalnog i dobivenog 3D modela

Sljedeći korak je provjera vrijednosti odstupanja. Najlakše se postiže uključivanjem tzv. „color table“, odnosno tablice koja pomoću različitih boja obilježava vrijednosti odstupanja na preklopljenim modelima. Vrijednosti odstupanja za svaku pojedinu boju je moguće ručno zadati kao što je prikazano na slici 38. Što je model crveniji to je odstupanje veće u plusu i obrnuto za plavu boju.



Slika 38. Prikaz tablice „color table“

Konačno moguće je očitati odstupanja za svaku pojedinu točku na modelu. U svrhu ovog rada za svaki dobiveni model je očitana točka najvećeg odstupanja u plusu i minusu (crvena i plava točka). Očitanje tih točaka je najbolje vidljivo na slici 39 na primjeru proizvoda „ABS 2“.



Slika 39. Odstupanja 3D modela na primjeru proizvoda „ABS 2“

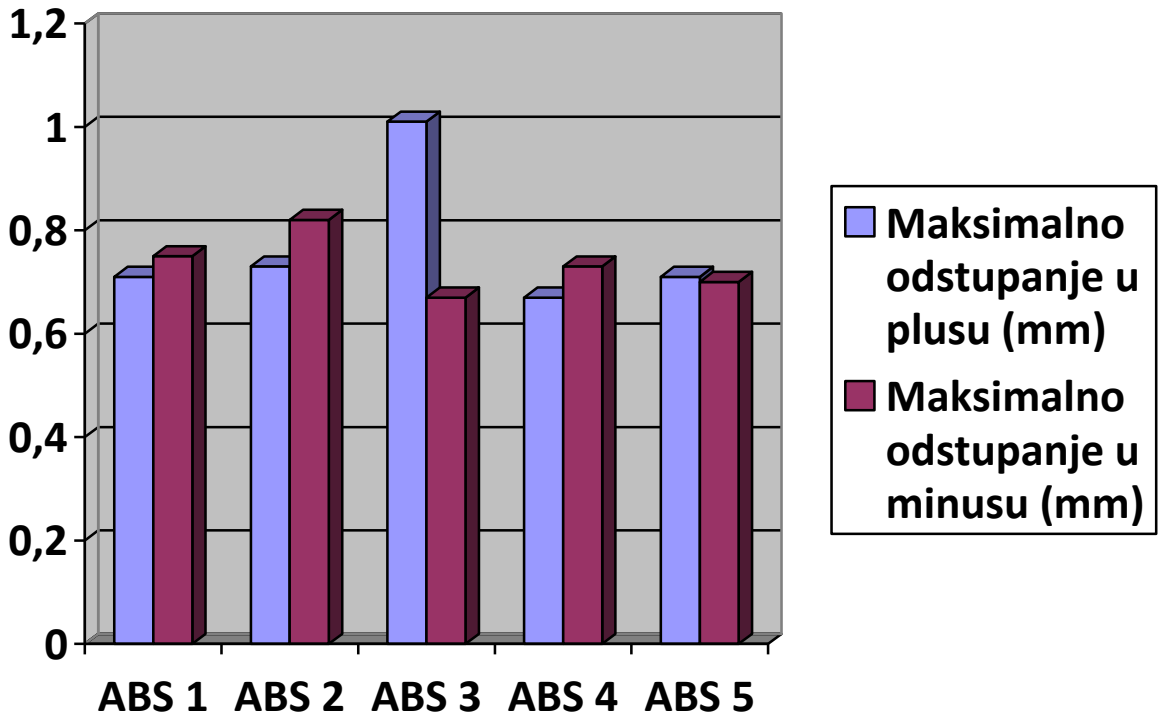
Tablica 5. Popis rezultata odstupanja za 10 proizvoda

Broj proizvoda	**Maks. odstupanje u plusu (mm)**	**Lokacija**	**Maks. odstupanje u minusu (mm)**	**Lokacija**
ABS 1	0,71	Desno rebro	-0,75	Prednja strana
ABS 2	0,73	Desno rebro	-0,82	Prednja strana
ABS 3	1,01	Greška u izradi (nečistoća)	-0,67	Stražnja strana
ABS 4	0,79	Gornja strana	-0,73	Prednja strana
ABS 5	0,71	Desno rebro	-0,70	Prednja strana
PLA 1	0,26	Desno rebro	-0,59	Stražnja strana
PLA 2	0,24	Gornja strana	-0,52	Stražnja strana
PLA 3	0,26	Desno rebro	-0,54	Stražnja strana
PLA 4	0,24	Lijevo rebro	-0,53	Stražnja strana
PLA 5	0,39	Lijevo rebro	-0,52	Prednja strana

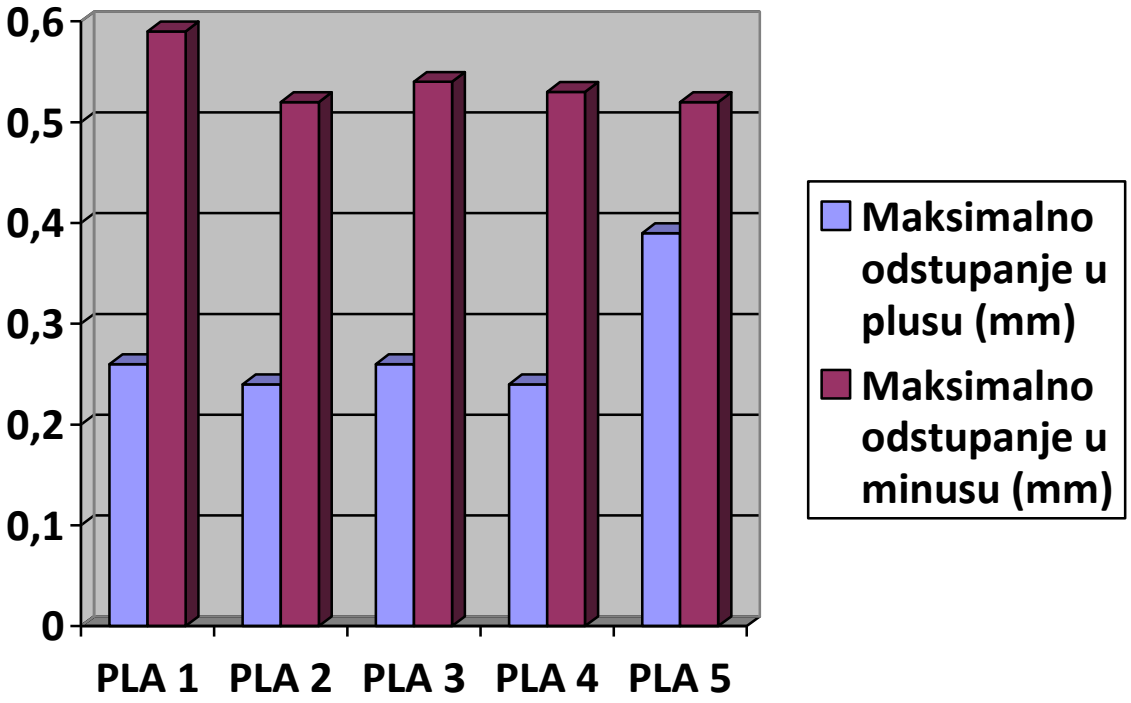
Analizirajući rezultate u tablici 5, očito je da su manja odstupanja pri izradi s PLA materijalom. Proizvod ABS 3 ima najveće zabilježeno odstupanje od 1,01 mm. Razlog za takvo odstupanje je greška pri izradi. Točnije, riječ je o nečistoći koja se pojavila najvjerojatnije u samom materijalu i imala utjecaj na konačan rezultat.

Pomoću „color table“ opcije lako se odabrala točka koja ima najveće odstupanje. Također se vodila evidencija gdje su najveća odstupanja. Promatrajući lokacije maksimalnog odstupanja u minisu (uvlačenju materijala) vidimo konstantno ponavljanje prednje i stražnje strane. Pošto su te strane najduže, bile su sklone najvećem uvlačenju jer nije bilo nikakvog ojačanja s unutarnje strane (vidljivo na nacrtu u prilogu). Da je riječ o prototipu stvarnog proizvoda, trebalo bi razmisliti o dodavanju ojačanja u obliku rebara kako bi se dobilo na čvrstoći proizvoda. Maksimalna odstupanja u plusu su očekivano bila na samim krajevima proizvoda (rebra) zbog pojave vitoperenja materijala. Kako se rubovi prvi počinju odvajati od podloge na rebrima je bilo najveće odstupanje.

U dijagramima 6 i 7 može se vidjeti razlika u dobivenim rezultatima za obadva materijala, a u tablici 6 prosječne vrijednosti odstupanja.



Dijagram 5. Analiza odstupanja ABS proizvoda



Dijagram 6. Analiza odstupanja PLA proizvoda

Tablica 6. Prosječne vrijednosti odstupanja

	ABS	PLA
Prosječno maks. odstupanje u plusu (mm)	0,79	0,28
Prosječno maks. odstupanje u minusu (mm)	0,73	0,54
Ukupno prosječno odstupanje (mm)	**0,76**	**0,41**

Ukupno prosječno odstupanje za ABS je 0,76 mm, a za PLA je 0,41 mm. To znači da su iz PLA materijala dobiveni rezultati 1,85 puta točniji nego sa ABS materijalom.

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio eksperimentalno ispitati i dokazati iz kojeg materijala se dobivaju dimenzijski postojaniji uzorci na FDM aditivnom uređaju. Testirani su ABS i PLA materijali. Provjera dimenzijske postojanosti je izvršena usporedbom nominalnog CAD modela sa svakim od 10 modela dobivenih postupkom digitalizacije. Usporedbom rezultata maksimalnih odstupanja dolazi se do zaključka da za izradu promatranog proizvoda s tankim stjenkama je bolje koristiti PLA materijal. Osim bolje dimenzijske postojanosti, bitno je napomenuti da pri izradi iz PLA materijala nije potrebno grijati radnu podlogu kako bi se uspješno prihvatio prvi sloj proizvoda. To nas dovodi do zaključka da uređaji bez grijane radne podloge predstavljaju razuman izbor radi prihvatljive nabavne cijene. Uređaje s grijanom radnom podlogom bih preporučio tvrtkama i ljudima koji imaju namjeru eksperimentirati s drugim materijalima kao što su PA, WPC, kombinacije polimera s metalima ili kompozitima. Kemijske i mehaničke karakteristike tih materijala su drugačije od testiranog PLA i ABS-a, a većina tih materijala zahtjeva grijanu radnu podlogu. Karakteristike između ABS-a i PLA su preslične da bi se opravdale dodatne komplikacije pri izradi s ABS-om. Tijekom rada u spomenutoj tvrtki radilo se je dosta protipova na istom FDM uređaju. Iskustvo je pokazalo da bez obzira na geometriju prototipa, rezultati su bili bolji koristeći PLA materijal. U uredskom okruženju predstavlja sigurnost da pustite uređaj u pogon, a da za to vrijeme radite na idućem projektu. S ABS-om se zahtjeva veća pažnja na promatranje pri izradi, kako bi se na vrijeme uočile greške.

LITERATURA

[1] Pilipović, A.: Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa, doktorski rad, FSB, Zagreb, 2012.
[2] https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing
[3] Noorani, R.: *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, John Wiley & Sons Inc., SAD,2006.
[4] Wohlers, T.T.: Wohlers Report 2012 – Additive Manufacturing, State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, Wholers Associates, Inc., Colorado, 2012.
[5] Application of 3D printed drill guides in implant dentistry, N. Šimunić, D. Vidović, D. Bursać, I. Matković / IFMBE Proceedings / I. Lacković; D. Vasić. Springer International Publishing, 2014. 383-386 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)
[6] http://www.stratasys.com/industries
[7] http://cateh.eu/en/
[8] http://www.ge.com/
[9] http://www.madeinspace.us/
[10] http://www.stratasys.com/
[11] http://www.bmw-motorsport.com/en/news/current-news.html
[12] http://bazis.cablogwp-contentuploads/201402/Models_.jpg
[13] Godec. D: Doprinos sustavnom razvoju kalupa za injekcijsko prešanje plastomera, FSB, Zagreb, 2006.
[14] http://3dprintingforbeginners.com/category/3d-software/
[15] techhive.com
[16] http://3dprintersuperstore.com.au/products/up-filament-snow-white
[17] http://www.3ders.org/images/Acetone-vapor-3d-printed-parts-1.jpg
[18] wohlersassociates.com
[19] http://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling
[20] http://printspace3d.com/wp-content/uploads/2014/03/FDM_Illustration1.jpg
[21] https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid
[22] https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene
[23] http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/materials/
[24] http://3dprint.com/42417/3d-printing-material-strengths/
[25] http://en.wikipedia.org/wiki/Polycarbonate
[26] http://carbon3d.com/
[27] http://www.3dprintingin.com/carbon-3d-clip-revolutionary-layerless-3d-printing-technology/
[28] https://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner
[29] http://cmk.vuka.hr/hr/povratno-inzinjerstvo/
[30] Ergonomic design of handle using rapid prototyping technology: Šimunić, Nikola; Mustapić, Nenad; Bursać,Danijel // Ergonomics 2013 / Mijović, Budimir; Salopek Čubrić, Ivana; Čubrić, Goran; Sušić, Aleksandar. Zadar, Tiskara Zrinski d.d., 2013. 181-186 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

PRILOZI

1 – 2D crtež proizvoda

2 – CD sa završnim radom i 3D modelom proizvoda