

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU**

**DIPLOMSKI RAD**  
sveučilišnog dodiplomskog studija

**Dušan Vrbanec**  
12970960

Slavonski Brod, 2011.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU

# **DIPLOMSKI RAD**

sveučilišnog dodiplomskog studija

**Dušan Vrbanec**  
12970960

Voditelj diplomskog rada:  
**doc. dr. sc. Tomislav Galeta**

Slavonski Brod, 2011.

# I. AUTOR

Ime i prezime: Dušan Vrbanec

Mjesto i datum rođenja: Čakovec, 21.06.1978. g.

STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU

Datum završetka nastave: 2009. g.

Sadašnje zaposlenje: AutoCAD crtač, AVC d.o.o., Zagreb

# II. DIPLOMSKI RAD

Naslov: Analiza dostupnih postupaka brze izrade prototipova

Broj stranica: 50    slika: 33    tablica: 16    priloga: /    bibliografskih podataka: 46

Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen: **STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU**

Postignut akademski naslov: **diplomirani inženjer strojarstva**

Voditelj rada: doc. dr. sc. Tomislav Galeta

Obranjeno na **Strojarskom fakultetu u Slavonskom Brodu**

Oznaka i redni broj rada: \_\_\_\_\_

# III. OCJENA I OBRANA

Datum preuzimanja zadatka: 15.07.2011.

Datum predaje rada: 23.09.2011.

Datum obrane rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo za ocjenu i obranu diplomskog  
rada prema kojim je rad obranjen: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
STROJARSKI FAKULTET  
U SLAVONSKOM BRODU  
Trg Ivane Brlić-Mažuranić 2  
**Povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
sveučilišnog dodiplomskog studija**

U Slavonskom Brodu, 15. 7. 2011.

## **DIPLOMSKI ZADATAK**

**Pristupnik: DUŠAN VRBANEC**

**Zadatak: Analiza dostupnih postupaka brze izrade prototipova**

**Rješenjem zadatka potrebno je obuhvatiti sljedeće:**

1. Pojasniti osnovna načela brze izrade prototipova
2. Istražiti dostupne postupke
3. Razmotriti tehničke i ekonomske značajke postupaka
4. Izraditi usporedne prikaze postupaka
5. Razmotriti i diskutirati smjernice za primjenu

U diplomskom se radu treba obvezno pridržavati **Uputa za izradu diplomskog rada.**

**Zadatak uručen pristupniku: 15. 7. 2011.**

**Rok predaje diplomskog rada: 23. 9. 2011.**

**Datum predaje diplomskog rada: \_\_\_\_\_**

**PREDSJEDNIK POVJERENSTVA ZA  
DIPLOMSKE ISPITE:**

**prof. dr. sc. Franjo Matejiček**

**ZADATAK ZADAO:**

**doc. dr. sc. Tomislav Galeta**

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno, koristeći se vlastitim znanjem i navedenom literaturom.

---

## SAŽETAK

U diplomskom radu predstavljeni su postupci brze izrade prototipova i proizvoda aditivnom metodom. Tehnologija je relativno nova i još uvijek u stadiju razvoja, standardizacije i dokazivanja. Nakon uvoda, u drugom poglavlju opisani su početak i razvoj i osnovna načela brze izrade prototipova. U trećem poglavlju predstavljene su različite metode, uređaji i materijali koji se koriste u brzom izradi prototipova. Tehničke i ekonomske značajke obrađene su u četvrtom poglavlju, gdje su opisane smjernice za odabir adekvatnog postupka. U petom poglavlju prikazani su međusobni usporedni podaci svih metoda pomoću grafova. Šesto poglavlje prikazuje smjernice za primjenu tehnologije brze izrade prototipova.

Ključne riječi: brza izrada prototipa, brza izrada alata, projektiranje podržano računalom, razvoj proizvoda, izrada kompleksnih oblika, vrijeme izrade, smanjenje troškova, aditivna proizvodnja.

---

# SADRŽAJ

## PREGLED VELIČINA, OZNAKA I JEDINICA

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OSNOVNA NAČELA BRZE IZRADE PROTOTIPA.....</b>	<b>3</b>
2.1	PROCES BRZE IZRADE PROTOTIPA .....	3
2.2	POVIJEST I RAZVOJ TEHNOLOGIJE BRZE IZRADE PROTOTIPA .....	3
2.3	CIKLUS BRZE IZRADE PROTOTIPA .....	4
2.4	PREDNOSTI POSTUPKA BRZE IZRADE PROTOTIPA .....	4
2.5	NEDOSTACI POSTUPKA BRZE IZRADE PROTOTIPA .....	5
2.6	STL DATOTEKA .....	5
<b>3</b>	<b>DOSTUPNI POSTUPCI BRZE IZRADE PROTOTIPOVA.....</b>	<b>9</b>
3.1	STEREOLITOGRAFIJA .....	9
3.1.1	<i>Proces izrade prototipa.....</i>	<i>9</i>
3.1.2	<i>Dodatne operacije.....</i>	<i>11</i>
3.1.3	<i>Materijali i svojstva .....</i>	<i>11</i>
3.1.4	<i>Tipična primjena .....</i>	<i>12</i>
3.1.5	<i>Prednosti .....</i>	<i>12</i>
3.1.6	<i>Nedostaci.....</i>	<i>12</i>
3.2	SELEKTIVNO LASERSKO SRAŠĆIVANJE MODELA .....	13
3.2.1	<i>Proces izrade prototipa.....</i>	<i>13</i>
3.2.2	<i>Dodatne operacije.....</i>	<i>14</i>
3.2.3	<i>Grupe materijala.....</i>	<i>14</i>
3.2.4	<i>Kapacitet proizvodnje .....</i>	<i>16</i>
3.2.5	<i>Prednosti .....</i>	<i>16</i>
3.2.6	<i>Nedostaci.....</i>	<i>17</i>
3.3	3D TISAK.....	17
3.3.1	<i>Proces izrade prototipa.....</i>	<i>17</i>
3.3.2	<i>Dodatne operacije.....</i>	<i>19</i>
3.3.3	<i>Tipična primjena .....</i>	<i>19</i>
3.3.4	<i>Prednosti .....</i>	<i>19</i>
3.3.5	<i>Nedostaci.....</i>	<i>19</i>
3.4	3D TISAK MLAZOM FOTOPOLIMERA .....	19

---

3.4.1	<i>Proces izrade prototipa</i> .....	19
3.4.2	<i>Dodatne operacije</i> .....	20
3.4.3	<i>Materijali i svojstva</i> .....	20
3.4.4	<i>Tipična primjena</i> .....	21
3.4.5	<i>Prednosti</i> .....	21
3.4.6	<i>Nedostaci</i> .....	21
<b>3.5</b>	<b>3D TISKANJE METALA (PROMETAL)</b> .....	<b>21</b>
3.5.1	<i>Proces izrade prototipa</i> .....	21
3.5.2	<i>Dodatne operacije</i> .....	22
3.5.3	<i>Materijali i svojstva</i> .....	23
3.5.4	<i>Tipična primjena</i> .....	23
3.5.5	<i>Prednosti</i> .....	23
3.5.6	<i>Nedostaci</i> .....	23
<b>3.6</b>	<b>MODELIRANJE TOPLJENIM DEPOZITIMA</b> .....	<b>23</b>
3.6.1	<i>Proces izrade prototipa</i> .....	23
3.6.2	<i>Svojstva materijala</i> .....	27
3.6.3	<i>Dodatne operacije</i> .....	28
3.6.4	<i>Tipična primjena</i> .....	28
3.6.5	<i>Prednosti</i> .....	29
3.6.6	<i>Nedostaci</i> .....	29
<b>3.7</b>	<b>IZRADA PROTOTIPA LAMINIRANJEM</b> .....	<b>29</b>
3.7.1	<i>Proces izrade prototipa</i> .....	29
3.7.2	<i>Dodatne operacije</i> .....	31
3.7.3	<i>Materijali i svojstva</i> .....	31
3.7.4	<i>Tipična primjena</i> .....	31
3.7.5	<i>Prednosti</i> .....	31
3.7.6	<i>Nedostaci</i> .....	31
<b>3.8</b>	<b>IZRAVNO TALOŽENJE METALA LASEROM</b> .....	<b>31</b>
3.8.1	<i>Proces izrade prototipa</i> .....	32
3.8.2	<i>Dodatne operacije</i> .....	33
3.8.3	<i>Svojstva materijala</i> .....	33
3.8.4	<i>Tipična primjena</i> .....	33
3.8.5	<i>Prednosti</i> .....	33
3.8.6	<i>Nedostaci</i> .....	33

---



---

<b>4</b>	<b>TEHNIČKE I EKONOMSKE ZNAČAJKE POSTUPAKA .....</b>	<b>34</b>
4.1	TEHNIČKE ZNAČAJKE .....	34
4.2	EKONOMSKE ZNAČAJKE .....	35
4.3	VRIJEME IZRADE MODELA .....	36
4.4	IZRAČUN TROŠKOVA IZRADE.....	38
<b>5</b>	<b>USPOREDNI PRIKAZ POSTUPAKA .....</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>SMJERNICE ZA PRIMJENU.....</b>	<b>44</b>
6.1	PODRUČJA PRIMJENE .....	44
6.2	PRIMJER IZ PRAKSE .....	45
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>48</b>

---



## PREGLED VELIČINA, OZNAKA I JEDINICA

CAD	oblikovanje podržano računalom (engl. <i>Computer Aided Design</i> )
RP	brza izrada prototipova (engl. <i>Rapid Prototyping</i> )
STL	programski jezik za prostorni opis volumena (engl. <i>Standard Tessellation Language</i> )
CAM	proizvodnja podržana računalom (engl. <i>Computer Aided Manufacturing</i> )
RM	brza proizvodnja (engl. <i>Rapid Manufacturing</i> )
RT	brza izrada alata (engl. <i>Rapid Tooling</i> )
AM	aditivna proizvodnja (engl. <i>Additive Manufacturing</i> )
SL	stereolitografija (engl. <i>Stereolithography</i> )
SLS	selektivno srašćivanje laserom (engl. <i>Selective Laser Sintering</i> )
3DP	trodimenzionalni tisak (engl. <i>3D Printing</i> )
3DP PJ	3D tisak mlazom fotopolimera (engl. <i>3D Printing – Photopolymer Jetting</i> )
FDM	modeliranje topljenim depozitima (engl. <i>Fused Deposition Modeling</i> )
LOM	izrada prototipa laminiranjem (engl. <i>Laminated Object Manufacturing</i> )
LENS	izravno taloženje metala laserom (engl. <i>Laser Engineered Net Shaping</i> )
FEM	metoda konačnih elemenata (engl. <i>Finite Element Method</i> )
$N_b$	broj prolaza za izradu jednog sloja jednog komada
$W_p$	širina modela (x), m
$W_{gl}$	širina glave, m
$N_{gl}$	broj glava za printanje
$N_{ml}$	broj mlaznica
$d_n$	promjer mlaznica, m
$N_l$	broj slojeva za izradu jednog komada
$d_p$	visina modela, m
$LT$	debljina sloja, m
$t_{pl}$	vrijeme izrade jednog ili više modela u jednom sloju komore, m
$t_l$	vrijeme izrade jednog sloja, s
$t_{re}$	vrijeme nanošenja sloja praha, s
$t_{pt}$	pripremno vrijeme, s
$v_{pi}$	brzina dizanja/spuštanja postolja, m/s
$v_{re}$	brzina rotirajućeg klizača, m/s
$W_f$	širina komore sa zalihom praha, m
$t_{prime}$	vrijeme punjenja uloška vezivom, s

---

$t_{\text{prime, tot}}$	vrijeme čišćenja mlaznice i punjenja , s
$h_b$	prolaz glave po y osi komore, m
$v_f$	brzina glave, m/s
$N_p$	broj ugniježđenih modela
$W_b$	prolaz glave po x osi komore, m
$v_s$	brzina nosača glave, m/s
$x_s$	razmak između ugniježđenih modela po x osi, m
$y_s$	razmak između ugniježđenih modela po y osi, m
$h_p$	dubina model (y), m
$N_{pl}$	broj slojeva u komori
$d_b$	visina komore, m
$t_t$	ukupno vrijeme izrade svih modela u komori, s
$t_{su}$	pripremno vrijeme, s
$t_{cl}$	vrijeme čišćenja modela, s
$t_{dr}$	vrijeme sušenja modela, s
$t_{sin}$	vrijeme srašćivanja modela, s
$C_t$	ukupni godišnji trošak, €
$N_{PPY}$	broj izradaka u godini
$C_{fix}$	fiksni troškovi, €
$C_{3DP}$	troškovi uređaja, €
$C_{odr}$	troškovi održavanja, €
$N_{3DP}$	ukupan broj uređaja
$C_{pe}$	troškovi peći, €
$C_{ks}$	troškovi komore za sušenje, €
$C_{gr}$	troškovi izrade pojedinačne grupe, €
$C_{mat}$	troškovi materijala po grupi, €
$C_{op}$	operativni troškovi po stanu, €
$C_{red}$	troškovi reduciranja broja modela u grupi, €
$\rho_{ox}$	gustoća materijala, kg/m <sup>3</sup>
$V_{mod}$	volumen zelenog komada, m <sup>3</sup>
$C_{ox}$	trošak materijala, €/kg
$P_{vez}$	vezivo, %
$C_{vez}$	trošak veziva, €/kg
$C_{ot}$	trošak otpada, €/m <sup>3</sup>

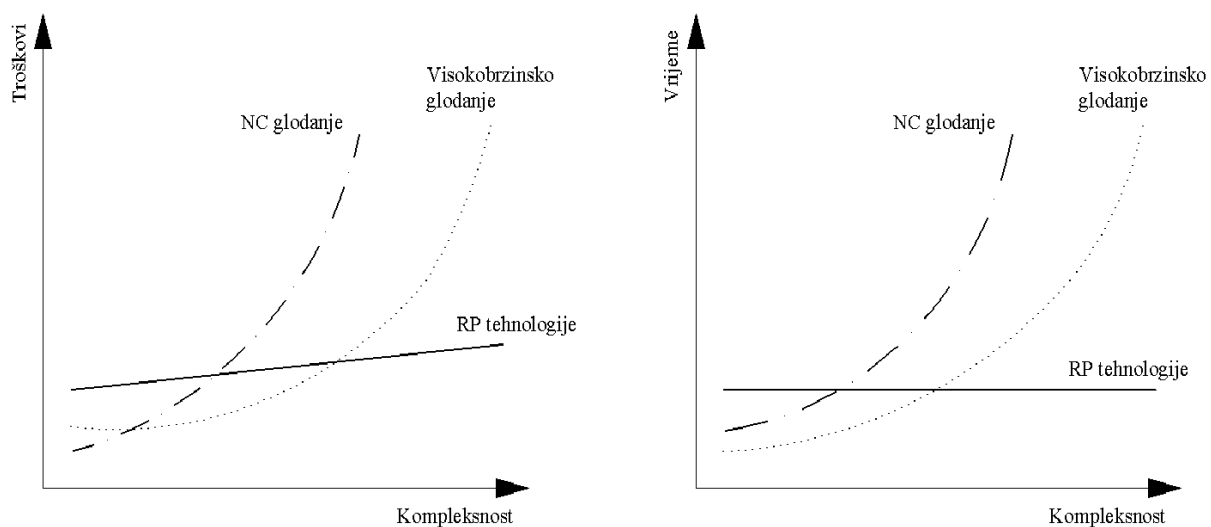
---

$C_{\text{mod}}$       ukupni trošak po modelu, €

## 1 UVOD

U inženjerstvu svaka želja ili potreba za novim proizvodom započinje idejom. Ideja da bi se pretvorila u krajnji proizvod mora proći kroz nekoliko faza od razrade koncepta, dizajna, izrade tehničke dokumentacije preko izrade prototipa, testiranja prototipa, izmjena nedostataka i ispravljanje grešaka, odabira proizvodne tehnologije te na kraju izrada proizvoda. Reduciranje potrebnog vremena za realizaciju od ideje o proizvodu do konačne proizvodnje, a samim time i reduciranje troškova, jedan je od važnijih faktora kako bi se moglo efikasno reagirati na zahtjeve tržišta i konkurirati na tržištu.

Kroz povijest, veliki korak u tom smjeru učinjen je razvitkom i uvođenjem računalne tehnologije i CAD (engl. *Computer Aided Design*) alata u inženjerstvu. Sljedeći korak u tom pravcu može se smatrati razvoj trodimenzionalnog, digitalnog prikaza proizvoda. Izradom 3D modela pospješuje se evaluacija geometrije, poboljšava ispitivanje, analiza i procjena mehaničkih svojstava modela i ubrzava se proces razvoja tvorevine. Danas je modernu proizvodnju nemoguće zamisliti bez upotrebe 3D alata. Geometrija trodimenzionalnog modela, kojeg je moguće izraditi u digitalnom obliku, može biti veliki izazov za realizaciju u stvarnosti. Klasične metode obrade, ograničene su kada je u pitanju izrada kompliciranih geometrija i oblika neke tvorevine stoga se kao odgovor na ove zahtjeve postavlja tehnologija brze izrade prototipova (engl. *Rapid Prototyping – RP*) i proizvoda pomoću aditivnih metoda. Ti postupci omogućuju izradu fizičkog modela, kompliciranog oblika, direktno iz računalnih podataka u vrlo kratkom vremenu i automatiziranim procesima. Usporedni dijagram konvencionalnih i RP tehnologija prikazuje Slika 1.1.



Slika 1.1 Usporedba konvencionalnih i RP tehnologija [1]

RP je alat koji se koristi za dizajn, inženjerstvo i proizvodnju. Kao i svaka nova tehnologija tako i tehnologija brze izrade prototipa mora proći kroz fazu prilagodbe tržišta. Za razumijevanje i upotrebu tehnologija brze izrade prototipova, potrebno je znati koristiti jedan ili više trodimenzionalnih (3D) alata. Drugi korak je upoznavanje s tehnologijom, procesom izrade, upoznavanje s prednostima i nedostacima te prikupljanje informacija koje su još uvijek nedovoljno specificirane i raspršene pa je potrebno temeljno istraživanje. Veliki nedostatak u istraživačkom dijelu je taj što su nedovoljno zastupljene unificirane, empirijske informacije korisnika, koje bi precizno definirale mogućnosti i ograničenja RP tehnologija.

U ovom radu, kandidat se nastoji upoznati, ali i približiti RP tehnologije svakom tko traži informaciju više. Prikupljeni podaci o uređajima i materijalima su trenutno aktualni.

## 2 OSNOVNA NAČELA BRZE IZRADE PROTOTIPA

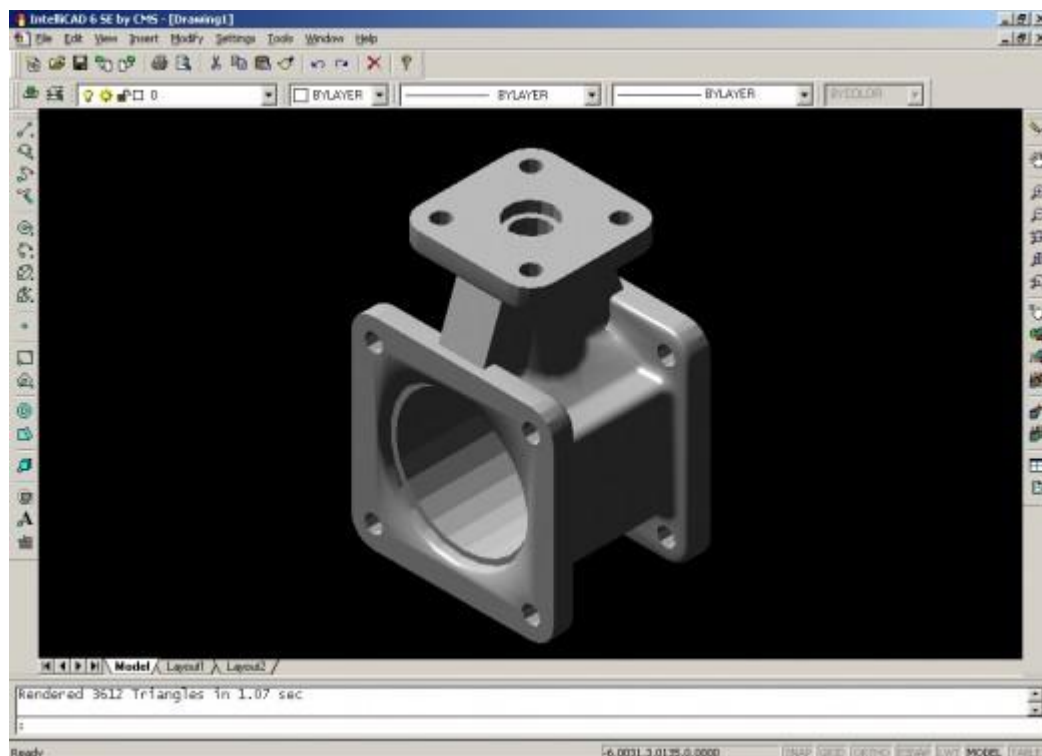
U poglavlju će kratko biti opisano što je to proces brze izrade prototipa. Slijedi povijesni razvoj tehnologije, ciklus brze izrade prototipa, prednosti i nedostaci i opis STL (engl. *Standard Tessellation Language*) datoteke.

### 2.1 Proces brze izrade prototipa

Brza izrada prototipa označava tehnologije kojima je moguće direktno iz digitalnog prikaza prostornog ili trodimenzionalnog (3D) modela, napravljenog u nekom od CAD alata, stvoriti njegovu fizičku reprezentaciju i posve funkcionalan i relativno kompleksan radni prototip. RP uređaji grade model, za razliku od CAM (engl. *Computer Aided Manufacturing*) tehnologija koje geometriju realiziraju uklanjanjem materijala. Gradnja modela bazira se na digitalno rezanim slojevima modela koji se u fizičkom prostoru sloj po sloj lijepe u finalni oblik. Prednost gradnje u slojevima je izrada kompleksnih oblika koje je klasičnim metodama gotovo nemoguće izraditi. Moguće je izgraditi komplicirane strukture unutar modela i tanke stjenke. Sve RP tehnologije (aditivnim metodama) izgrađuju model tako da nanose sloj po sloj materijala u obliku poprečnih presjeka modela u x-y ravnini po z osi [2].

### 2.2 Povijest i razvoj tehnologije brze izrade prototipa

Izvor tehnologije je u CAD industriji, točnije u izradi čvrstog trodimenzionalnog modela (engl. *Solid Model*) u digitalnom obliku. Čvrsti model ima „ispunjen“ volumen, potpuno je zatvoren i ima osobinu vodonepropusnosti. Takvom modelu mogu se pripisati svojstva fizičkog modela kao što su masa i gustoća. Slika 2.1 prikazuje primjer čvrstog modela.



Slika 2.1 Čvrsti model [38]

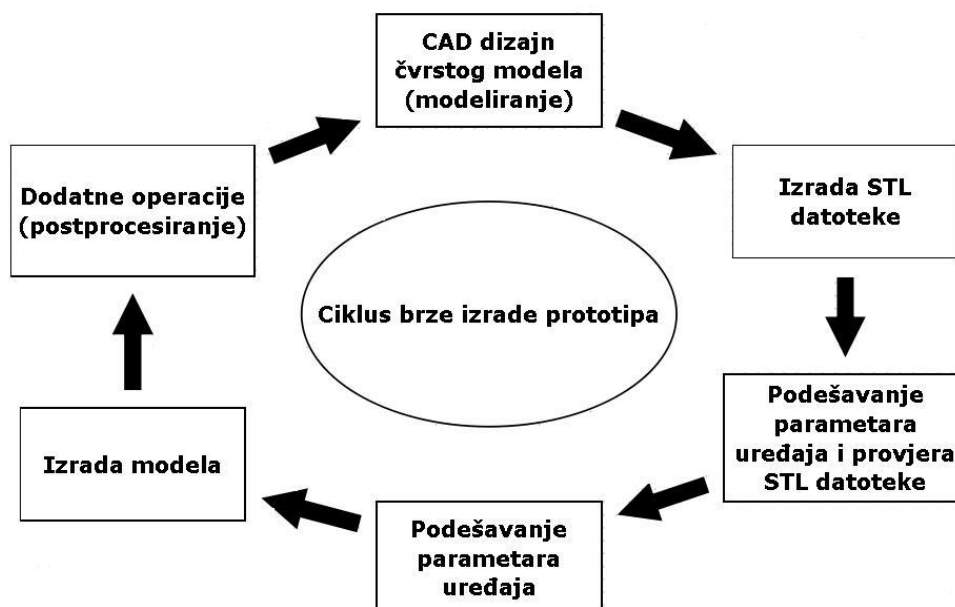


Prije pojave čvrstog modela 3D objekti bili su rađeni pomoću žičanih okvira (engl. *Wire Frame*) i površina (engl. *Surfaces*). Žičani okvir je samo približni prikaz 3D objekta. Dodavanjem površina na žičani okvir dobije se vizualno poboljšani objekt.

Do trenutka kad je razvijen čvrsti model RP tehnologija nije mogla zaživjeti pa je prva RP tehnologija (stereolitografija) razvijena u *3D Systems* tek 1986. godine [2].

### 2.3 Ciklus brze izrade prototipa

Da bi se izradio prototip prethodno je potrebno proći kroz proces dizajna. Potreba za određenim proizvodom, koji može biti nov ili poboljšan stari, mora započeti konceptom. Nakon toga izrađuje se preliminarni dizajn u obliku skice, tehničkog crteža ili CAD čvrstog modela. U ovom dijelu procesa mogu se vršiti preliminarna ispitivanja pomoću računala, kao što su analiza naprezanja ili sukladnost objekata u sklopu. Nakon toga slijedi izrada prototipa pomoću kojeg se verificira oblik, dimenzije, točnost, sukladnost ili se koristi za testiranje mehaničkih svojstava. Sve greške i mane koje se detektiraju na prototipu ispravljaju se u CAD datoteci i proces izgradnje novog prototipa se ponavlja. Ciklus izrade prototipa definiran je shematskim prikazom na slici (Slika 2.2).



Slika 2.2 Ciklus brze izrade prototipa

Nakon izrade čvrstog modela u CAD alatu, model je potrebno eksportirati u STL datoteku kako bi se takva datoteka pripremila za različite tipove RP sustava. Neki sustavi mogu prihvatiti STL datoteku direktno u interni program uređaja gdje se datoteka dorađuje, tj. priprema za proces izgradnje fizičkog modela. Na tržištu postoje aplikacije za pripremu različitih CAD formata u STL datoteku. Te aplikacije služe za analizu, popravljavanje i optimizaciju 3D modela, rezanje modela na slojeve, pozicioniranje i orijentaciju modela u komori i postavljanje potporne konstrukcije. Nakon što je STL datoteka importirana u uređaj podešavaju se parametri uređaja.

### 2.4 Prednosti postupka brze izrade prototipa

- Skraćenje vremena razvoja proizvoda i sniženje troškova;
- Skraćenje vremena dolaska proizvoda na tržište;

- Omogućena dobra komunikacija između funkcija marketinga, inženjerstva, proizvodnje i prodaje;
- Primjena fizičkih prototipova za analizu kritičnih elemenata konstrukcije;
- Testiranje funkcijskih prototipova prije izrade alata za izradu proizvoda;
- Precizno definiranje potrebnih alata za izradu proizvoda.

## 2.5 Nedostaci postupka brze izrade prototipa

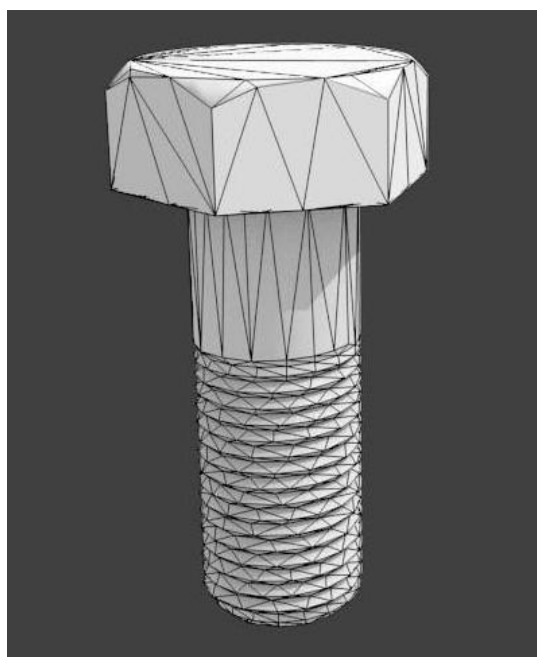
- Ograničen izbor materijala;
- Kvaliteta površine;
- RP/RM neekonomičan kod velikih serija;
- Ograničene dimenzije modela;
- Nedostatak kompleksnosti dizajna koji bi RP činilo konkurentnim.

## 2.6 STL datoteka

STL datoteka je postala de facto standardni format za prijenos podataka koje koriste RP uređaji [2]. STL format osmislila je 1989. godine tvrtka *3D Systems*. To je prikaz geometrije trodimenzionalnih površina u obliku trokuta. Površina modela je logički razbijena u seriju malih trokuta, tzv. lica (engl. *Faces*), koji imaju svoj smjer i orijentaciju i opisani su trima točkama u prostoru [3]. Datoteka u tom obliku koristi se za izrezivanje modela na slojeve horizontalnih poprečnih presjeka (engl. *Layers*). Priprema STL datoteke, odnosno prikaz modela u mrežnom obliku (engl. *Mesh*), mora biti optimalna za izradu modela, tj. mreža koja je izgrađena od lica mora biti toliko gusta da zadovolji traženu kvalitetu površine i prikaz detalja.

### Gruba površina

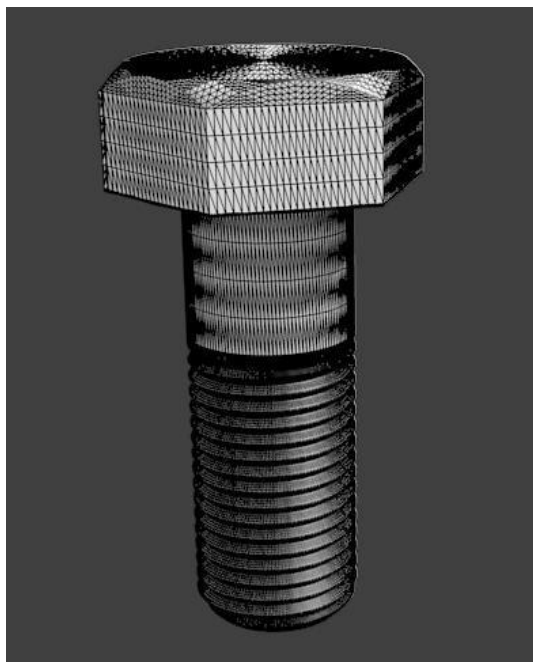
Mreža male gustoće površinu slobodnih formi modela čini neravnom. Linije i površine su stepenaste i ne zadovoljavaju željeni prikaz oblika, kružnih površina, površina slobodnih formi i detalja malih dimenzija (Slika 2.3).



Slika 2.3 Mreža male gustoće

### Pretjerano fina površina

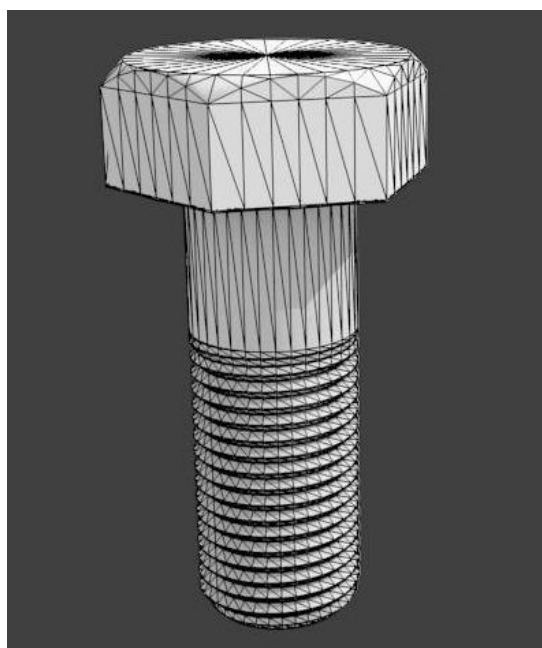
Slika 2.4 prikazuje model koji ima pretjerano gustu mrežu koja definira površinu modela odlične kvalitete i prikaz sitnih detalja. Mreža takve gustoće je nepotrebna i problematična jer opterećuje i usporava računalo pri izračunu geometrije modela, a time se povećava vrijeme pripreme i mogućnost pogreške kod izračuna.



*Slika 2.4 Mreža velike gustoće*

#### Dobra kvaliteta površine

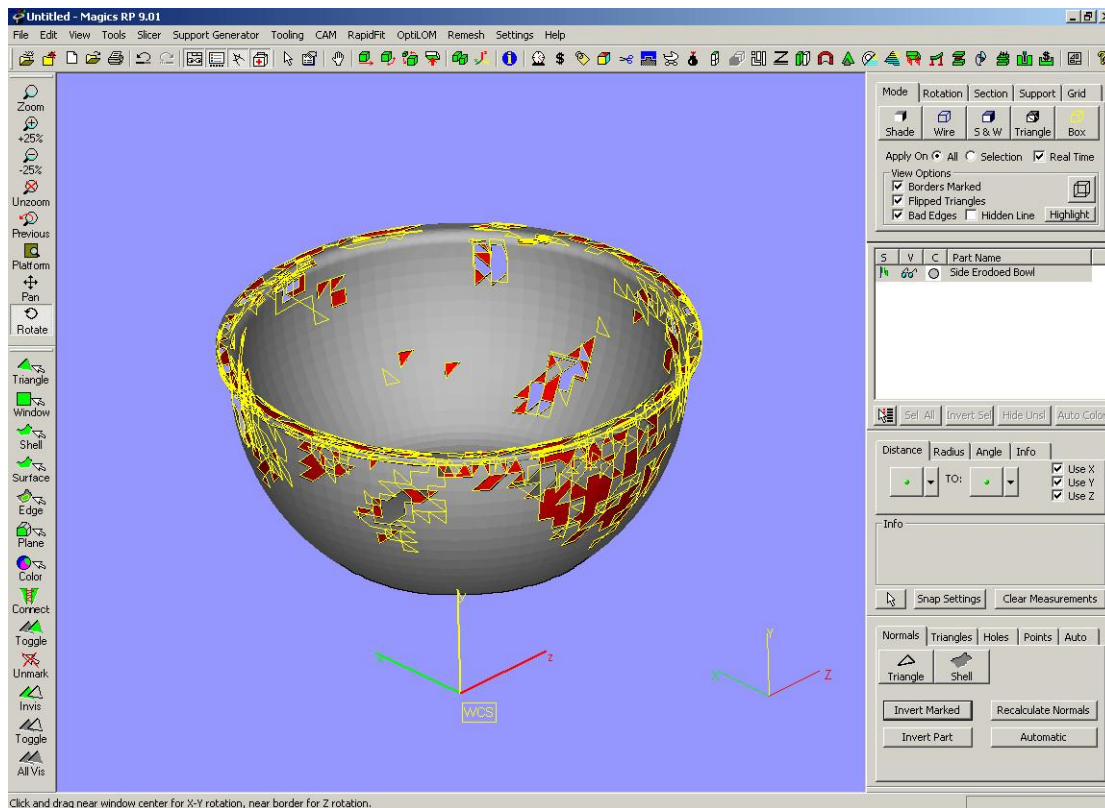
Slika 2.5 prikazuje optimalni odabir gustoće mreže. Model izrađen iz ovakvog prikaza ima dobru kvalitetu površina i geometrije. Postavke za optimalnu kvalitetu ovise o specifičnom modelu i CAD paketu koji se koristi. Takve postavke ovise o slobodnoj procjeni dizajnera.



*Slika 2.5 Mreža optimalne gustoće*

Gotovo svi CAD sustavi imaju mogućnost eksportiranja STL datoteke. Samo eksportiranje je jednostavno i razlikuje se u koracima od sustava do sustava, no osnovni principi selekcija naredbi *File* → *Save As* → *STL*.

Neki STL alati koji se mogu pronaći na tržištu su: SolidView, STLView v7.0, Magics RP, VICES, Imageware, DeskArtes. Slika 2.6 prikazuje izgled sučelja Magics RP alata.

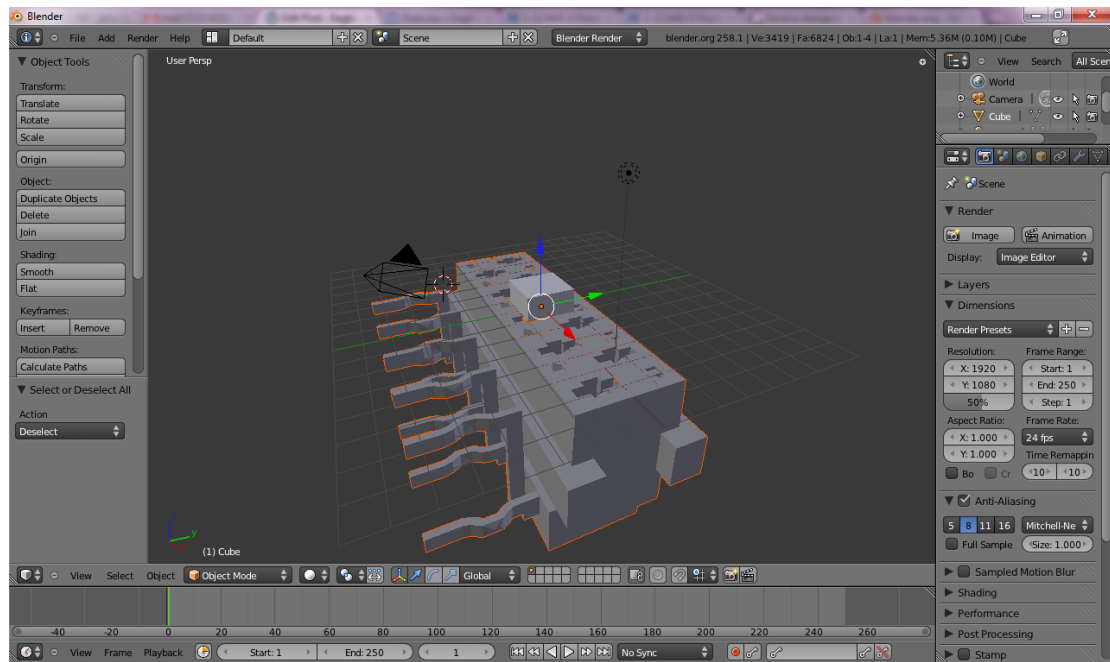


Slika 2.6 Izgled sučelja Magics RP alata

CAD alati koji se koriste u izradi čvrstog modela:

- Solid Works
- Pro/ENGINEER
- Catia
- IronCAD
- McNeel Rhino
- UGS NX
- Solid Edge
- AutoDesk Inventor
- Blender (besplatni alat)

Na slici (Slika 2.7) je prikazan izgled sučelja Blender 3D alata.



Slika 2.7 Izgled sučelja Blender alata

### 3 DOSTUPNI POSTUPCI BRZE IZRADE PROTOTIPOVA

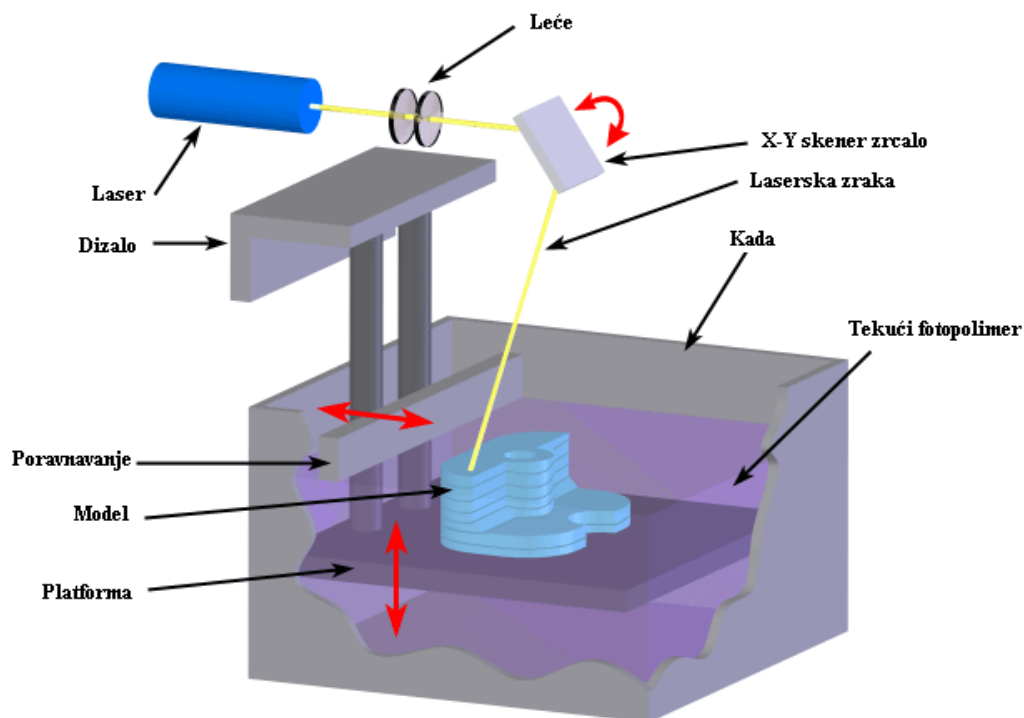
U nastavku prikazani su različiti postupci brze izrade prototipova (RP). Neki od tih postupaka koriste se i za brzu izradu proizvoda i brzu izradu alata. Brza izrada proizvoda (engl. *Rapid Manufacturing* - RM) je kategorija brze izrade prototipova koja se primjenjuje za izradu gotovih dijelova koji idu u prodaju. Brza izrada alata (engl. *Rapid Tooling* - RT) obuhvaća niz tehnika koje se koriste za brzu izradu složenih alata, kalupa i oblika koji se zatim koriste za izradu gotovih dijelova. Ovi se postupci najčešće primjenjuju kada se radi o malim serijama proizvoda i kada bi izrada alata uobičajenim postupcima bila jako skupa [4]. Za svaki postupak opisan je proces izrade modela, materijali koji se koriste i njihova svojstva, mogućnosti primjene, prednosti i nedostaci. RP-RM-RT postupci svedeni su pod zajednički naziv aditivna proizvodnja (engl. *Additive Manufacturing* - AM).

#### 3.1 Stereolitografija

Stereolitografija (engl. *Stereolithography* - SL) je prvi proces koji je korišten u brzom izradi prototipova. Na tržište ga je izbacila tvrtka 3D Systems iz Kalifornije 1987. godine [5]. Za izgradnju modela koristi se tekući fotopolimer, a za skrućivanje fotopolimera koristi se laserska zraka (3D Systems) ili DLP (engl. *Digital Light Processing*) projekcija (EnvisionTEC). SL tehnologija je postala zlatni standard za brzu izradu prototipova, gdje je potrebna preciznost u montaži sklopova. Točnost i dobro stanje površine čini SL tehnologiju pogodnom za verifikaciju montaže i izradu master uzoraka kalupa za oblikovanje silikonske gume [5].

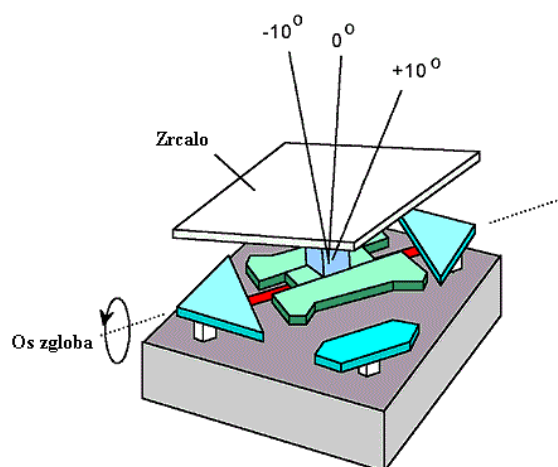
##### 3.1.1 Proces izrade prototipa

Osnovni koncept postupka zasniva se na upotrebi lasera ili nove tehnike projiciranja voxel ravnina (UV slika sa mikrodebljinom) pomoću DLP projektora [6]. Kao i kod većine sustava, potrebno je importirati STL datoteku pomoću koje se podešavaju parametri uređaja. 3D Systems koristi princip učvršćenja tekućeg fotopolimera laserom. Tip lasera koji se koristi je na bazi kristala (Nd: YVO<sub>4</sub> - itrium vanadat). Laserska zraka navodi se pomoću zakretnih zrcala u x-y ravnini. Zraka pada na površinu fotopolimera i dolazi do kemijske reakcije polimerizacije. Nakon toga, kada u kojoj je fotopolimer spušta se po z osi. Prije izgradnje novog sloja kroz komoru prolazi oštrica koja poravnava prethodno izgrađeni sloj (*Slika 3.1*).



Slika 3.1 Princip SL postupka [39]

Spuštanjem kade po z osi određuje se debljina sloja, koja se kreće od 0,02 do 0,15 mm. U slučaju EnvisionTEC uređaja koristi se UV svjetlost projicirana iz DLP izvora, koji se upotrebljava u projektorima za projekciju filmova. Slojevi voxel ravnina projicirani su na površinu tekućeg fotopolimera i izazivaju reakciju polimerizacije. Glavna komponenta DLP projektor je DMD uređaj (engl. *Digital Micromirror Device*). DMD uređaj, pomoću kojeg se dobiva visokokvalitetna digitalna projekcija, razvila je tvrtka Texas Instruments. DMD sadrži 1,5 milijuna individualnih zrcala, montiranih na zglobove tako da njihova gibanja mogu biti pojedinačno kontrolirana [6]. Svako od tih zrcala veličine je 0,013 mm. Trenutna rezolucija im je 1400 x 1050 (Slika 3.2).



Slika 3.2 Prikaz DMD zrcala [40]

U slučaju kompliciranih geometrija model je potrebno poduprijeti kako bi se osigurala njegova stabilnost. Potporne strukture mogu se kreirati ručno ili zajedno s glavnim modelom u

nekom od CAD programa. Točnost izrade kreće se od 0,12 mm na 24,5 mm, a na svakih dodatnih 24,5 mm se smanjuje za 0,03 mm. Minimalne dimenzije koje se mogu postići u x-y ravnini su 0,25 mm, a po z osi 0,4 mm. Preporučena debljina stjenke potporne konstrukcije je 0,5 mm [7]. *Tablica 3.1* prikazuje usporedne tehničke podatke nekih SL uređaja [6], [8].

*Tablica 3.1 Usporedni podaci SL uređaja (3D Systems; EnvisionTEC)*

Uređaj	Model	Dimenzije radnog volumena, mm	Tip
3D Systems	iPro 8000	650x350x300 650x750x50 650x750x275 650x750x550	Laser Nd: YVO <sub>4</sub>
	iPro 9000XL	650x350x300 650x750x50 650x750x275 650x750x550 1500x750x550	Laser Nd: YVO <sub>4</sub>
	Viper SLA	250x250x250	Laser Nd: YVO <sub>4</sub>
EnvisionTEC	Perfactory Xtreme	355x290x381	DLP Technology žarulja
	Perfactory Xede	406x330x381	DLP Technology žarulja
	Ultra <sup>2</sup>	228x149x100	DLP Technology žarulja

### 3.1.2 Dodatne operacije

U mnogim slučajevima potrebno je dodatno otvrdnjivanje materijala u UV peći. Nakon otvrdnjivanja potporni materijal se skida trganjem (rezanjem).

### 3.1.3 Materijali i svojstva

Tekuće smole koje se koriste u SL uređajima su foto osjetljivi epoksi polimeri koji imaju bolja svojstva od akrilata i manje su štetni za zdravlje. Koriste se materijali koji imaju slična svojstva kao i standardni materijali. *Tablica 3.2* i *Tablica 3.3* prikazuju svojstva nekih materijala ponuđenih na tržištu [6],[8]. Podaci su dobiveni ispitivanjem ASTM metodama (engl. *American Society for Testing and Materials*).



Tablica 3.2 Tipovi i svojstva materijala SL postupka (3D Systems)

3D Sytems – Accura materijali						
Svojstva materijala	Accura 10	Accura 40	Accura 48 HRT	Accura 50	Accura Bluestone	Accura CeraMAX
Zatezna čvrstoća, MPa	62-76	57-61	64-67	48-80	66-68	78-87
Modul elastičnosti, MPa	3048-3532	2628-3321	2800-3980	2480-2690	7600-11700	9460-9680
Savijanje, MPa	89-115	93-97	105-118	72-77	124-154	137-145
Modul savijanja, MPa	2827-3186	2618-3044	2760-3400	2210-2340	8300-9800	8270-8370
Produljenje, %	3,1-5,6	4,8-5,1	4-7	5,3-15	1,4-2,4	1-1,5
Toplinska deformacija, °C (0,46MPa)	58	101-114	130	74-80	267-284	220

Tablica 3.3 Tipovi i svojstva materijala SL postupka (EnvisionTEC)

EnvisionTEC			
Svojstva materijala	R05/11	SI 500	Y8
Zatezna čvrstoća, MPa	49,5-54	78,1	27,3
Modul elastičnosti, MPa	/	2680	282-707
Savijanje, MPa	79,7-87,9	65	25
Modul savijanja, MPa	1960-2250	2500	68
Produljenje, %	3,7-5,24	4,39	27
Toplinska deformacija, °C (0,46 MPa)	84,5-5,24	4,39	/

### 3.1.4 Tipična primjena

Koristi se u različitim granama industrije gdje su potrebni modeli za testiranje oblika i pozicioniranje, izradu kalupa, za brzu izradu alata, izradu kopča i aplikacija otpornih na toplinu.

### 3.1.5 Prednosti

- precizna izrada;
- kvaliteta površine;
- brzina izrade;
- nema sustava za dobavu materijala;
- stabilnost dimenzija.

### 3.1.6 Nedostaci

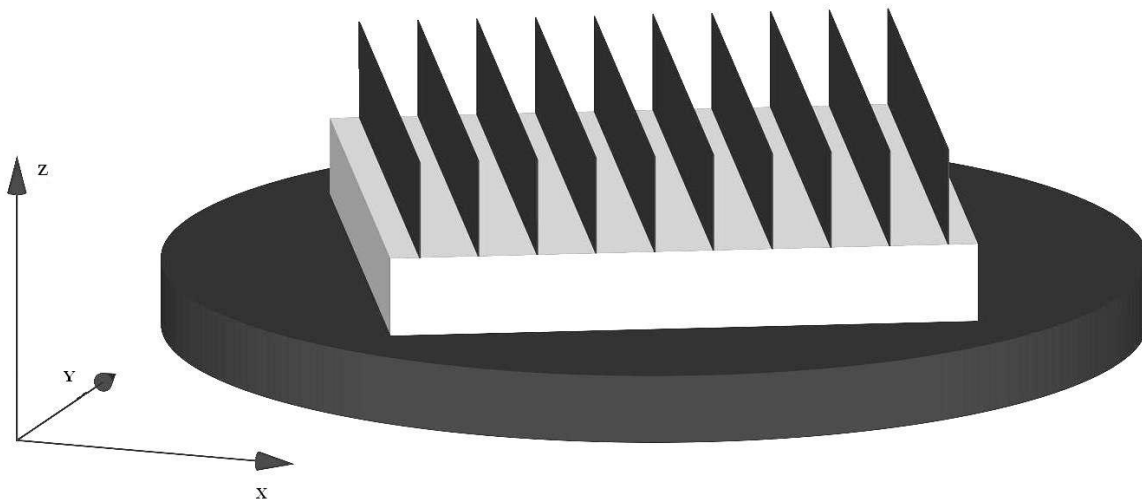
- škart je neupotrebljiv;
- cijena materijala i uređaja;
- kratak vijek trajanja žarulje kod DLP.

## 3.2 Selektivno lasersko srašćivanje modela

Postupak selektivnog laserskog srašćivanja (engl. *Selective Laser Sintering* – SLS) je razvijen 1987. na teksaskom sveučilištu, a komercijalizirala ga je tvrtka DTM, koju je kasnije preuzela tvrtka 3D Systems. Prvi komercijalni SLS sistem lansiran je na tržište 1992. godine [2]. Trenutno je u uporabi nekoliko sistema, među kojima su najistaknutiji EOS i 3D Systems. SLS je proizvodni proces izrade 3D modela pomoću lasera, aditivnom proizvodnom metodom. Trenutno postoji širok raspon različitih praškastih materijala koji se mogu koristiti unutar istog stroja, što je jedna od glavnih prednosti ove metode.

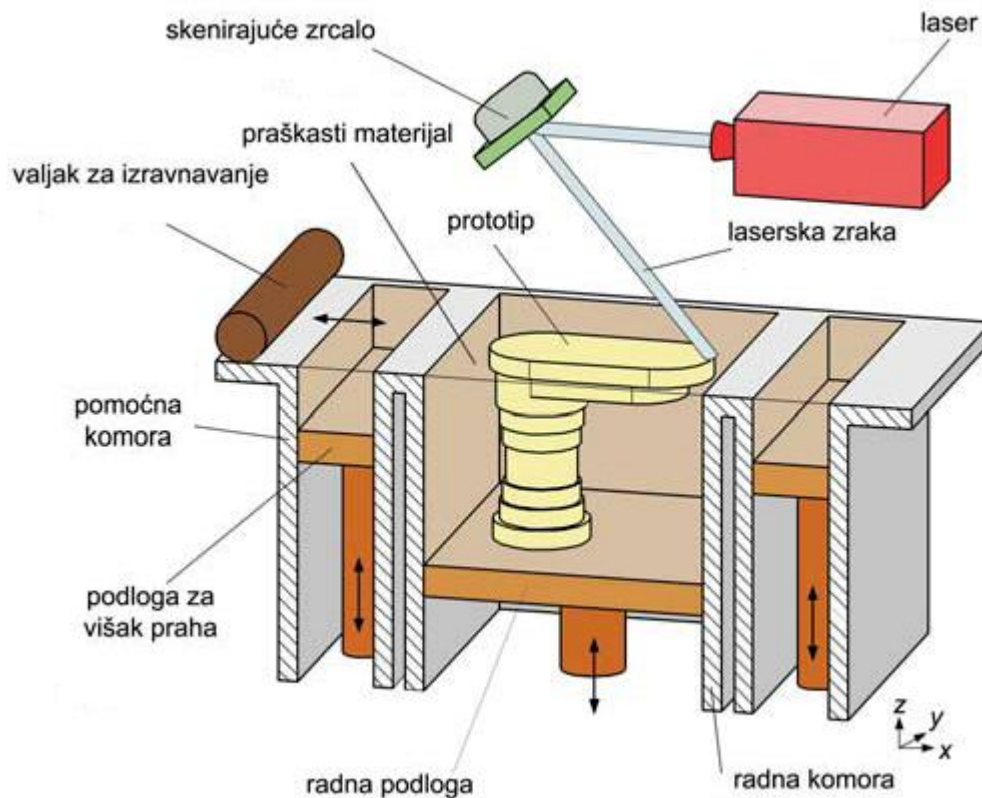
### 3.2.1 Proces izrade prototipa

Kao i kod većine metoda brze izrade prototipova, SLS metoda započinje pretvaranjem 3D CAD modela u standardni STL format. Model u STL formatu može se, unutar internog programskog paketa uređaja, uvećavati ili smanjivati i mijenjati orijentaciju. Orijehtacija je bitan faktor da bi se osigurala kvaliteta i točnost oblika. Ako npr. u dizajnu postoji kružni promjer čija točnost je od funkcionalne važnosti, ta točnost se postiže tako da se promjer postavi u xy ravninu, a ako na modelu postoje tanke stjenke, debljine 0,5 mm, tada najbolji rezultat daje orijentacija po z osi (Slika 3.3).



Slika 3.3 Orijehtacija modela u komori

Princip rada je slijedeći: zraka jakog karbon–dioksid ( $\text{CO}_2$ ) lasera usmjerava se na prethodno zagrijani materijal u obliku praška, koji se pod utjecajem visoke temperature srašćuje. Visoka temperatura između čestica povećava adheziju tako da se prah grupira u veću krutinu točno određenog oblika, koji je prethodno definiran čvrstim modelom u digitalnom obliku (3D CAD). Nakon srašćivanja prvog sloja presjeka modela, platforma na kojoj se nalazi prah spušta se od 0,05 - 0,12 mm po z osi. Pomoću rotirajućeg valjka u komoru za modeliranje nanosi se novi sloj praška te se ponavlja postupak srašćivanja poprečnog presjeka modela. Na taj način, aditivnim nizanjem slojeva, formira se krajnji oblik 3D modela (Slika 3.4).



Slika 3.4 Princip SLS postupka [46]

Višak praha iz komore za izgradnju modela usisava se u kanistre, te se taj prah reciklira i ponovno koristi. Zarobljeni prah, u provrtima, udubljenjima i zazorima na izgrađenom modelu, odstranjuje se u komori za ispuhivanje. Većina tako proizvedenih modela spremna je za uporabu već nakon čišćenja, ovisno o korištenom materijalu, dok neki materijali zahtijevaju dodatnu termičku obradu. Plinovi koji se tijekom procesa oslobađaju prolaze kroz sustav filtra, tako da ta tehnologija nije štetna za okoliš. Kod ove tehnologije nema potrebe za izrađivanjem potpornih konstrukcija jer prah koji je van gabarita modela ima potpurnu funkciju (engl. *Powder-Bed*).

### 3.2.2 Dodatne operacije

Model u ovom stanju je tzv. zeleni, porozan komad te je potrebno toplinskim ili kemijskim procesima dodatno odstranjivanje polimernog veziva koji u sebi sadrži metalni prah. Zaostali metalni prah nakon odstranjivanja veziva potrebno je otvrdnuti srašćivanjem ili ako vezivo ne zadrži prah potrebna je infiltracija broncom. Postupak je različit za različite materijale [9].

### 3.2.3 Grupe materijala

SLS tehnologija trenutno koristi nekoliko tipova materijala koji su grupirani u tri glavna modula:

#### 1. Ljevački modul

Ljevački modul (engl. *The Casting Module*) može sadržavati do pet različitih materijala i svi se koriste u industriji lijevanja. Ti materijali su komercijalno nazvani: TrueForm, CastForm, SandForm Zr II & Si, Croning sands.

TrueForm je akril-stiren polimer i koristi se za investicijsko lijevanje, gdje izgaranjem tog materijala zaostaje 1% pepela i zadržava visoku točnost dimenzija od 0,12 mm, te je moguće izrađivati stjenke debljine 0,5 mm.

CastForm je nasljednik TrueForm materijala i time posjeduje bolja svojstva koja su pogodna za investicijsko lijevanje.

SandForm Zr II & Si je cirkon-silicijev ljevački pijesak. Koristi se za izradu jezgri i kalupa do točnosti 0,5 mm. Pijesak se može koristiti za direktno lijevanje, pa se tako mogu proizvesti jezgre kompleksnih oblika. Pogodan je za lijevanje željeza i aluminija.

## 2. Modul funkcionalnih prototipova

Modul funkcionalnih prototipova (engl. *The Functional Prototyping Module*) može sadržavati do pet različitih materijala, koji su namijenjeni za funkcionalne finalne proizvode, kao i konceptualne modele, sekundarne uzorke alata, te dijelove sklopova. Materijali koji se koriste su DuraForm, Nylon, FineNylon, 415-GF, TPE 210-S, Somos 201.

DuraForm je poliamid s odličnim mehaničkim svojstvima (*Tablica 3.4*). Daje dobru kvalitetu površine, posjeduje dobra termička svojstva i kemijski je otporan. Točnost oblika je 0,25 mm.

Nylon, FineNylon i 415-GF su najloni dobre čvrstoće (*Tablica 3.4*), što ih čini idealnima za izradu funkcionalnih prototipova [10]. Točnost oblika je 0,25 mm.

415-GF je najlon miješan sa staklom, otporan je na velika naprezanja pa se koristi za ispitivanja u aerodinamičnim tunelima.

Somos 201 je termoplastični elastomer, ima slična svojstva kao i guma, te se koristi u brzom izradi prototipova kod kojih su potrebna elastična svojstva, kao što su brtve, membrane, manžete ili bilo gdje su potrebne elastične komponente (Shore A tvrdoća=81). Točnost dimenzija je 0,25 mm, a elongacija je preko 100%.

TPE 210-S je termoplastični elastomer koji se koristi za fleksibilne dijelove, a služi kao imitacija mekane gume ili kože. Moguće je učvrstiti materijal tekućom smolom.

## 3. Brza izrada alata

Kod brze izrade alata (RT) koriste se do četiri različita materijala: LaserForm A6, Copper Polyamid, DuraForm TiAl6V4, StainlessSteel GP1.

LaserForm A6 je polimer pomiješan prahom ugljičnog čelika. Njime se dobivaju „zeleni komadi“ (engl. *Green Part*). Da bi se dobili upotrebljivi „smeđi komadi“ (engl. *Brown Part*) model se mora peći kako bi se maknulo polimerno vezivo, a u takav porozan metal infiltrira se bronca (*Tablica 3.5*) [11].

LaserForm ST-100/200 idealan je za proizvodnju funkcionalno izdrživih metalnih prototipova, dijelova ili alata (*Tablica 3.5*). Tijekom srašćivanja vezivo izgara i infiltrira se bronca, tako da se dio sastoji od 54% čelika i 46% bronce. Dijelovi se mogu zavarivati i imaju dvostruko veću toplinsku vodljivost od čelika.

Tablica 3.4 Tipovi i svojstva materijala SLS postupka (3D Systems)

3D systems						
Mehanička svojstva	415-GF	DuraForm AF	DuraForm PP100	TPE-210S	FR106	DuraForm HST
Zatezna čvrstoća, MPa	40	35	22	8,3	46	51
Modul elastičnosti, MPa	2700	3960	1350	/	1345	5725
Produljenje, %	3,5	1,5	20-75	250	38	4,5
Savijanje, MPa	/	44	33	/	/	89
Modul savijanja, MPa	/	3517	1150	/	/	4550
Toplinska deformacija, °C (0,46 MPa)	106	180	/	/	/	184

Tablica 3.5 Svojstva metalnih materijala SLS postupka

Mehanička svojstva	3D Systems		EOS			
	LaserForm A6/bronca	LaserForm ST100/bronca	MP1-CoCr	MS1	GP1	Ti64
Zatezna čvrstoća, MPa	610	510	1400	1100	1050	1150
Modul elastičnosti, 10 <sup>5</sup> MPa	1,37	1,37	2,1	1,8	1,7	1,1
Produljenje, %	4	/	10	8	25	1,1

### 3.2.4 Kapacitet proizvodnje

Proizvodnost varira ovisno o materijalu koji se koristi, a svodi se na sljedeće:

#### 1. Brzina skeniranja

Predstavlja vektor brzine pomicanja lasera po površini praška kojeg tali. Sustavi su opremljeni laserima jačine 30-400 W (CO<sub>2</sub>, Yb). Brzina lasera je vrlo velika, tako da velike površine mogu biti skenirane u sekundi, što omogućava brzu izgradnju i izradu više modela u jednom procesu.

#### 2. Pozicioniranje modela u komori

Kako se modeli grade u komori ispunjenoj praškastim medijem (engl. *Powder-Bed*), istovremeno se može nanizati više modela različitih orijentacija unutar komore. Time se postiže veća proizvodna efikasnost i fleksibilnost. Druga prednost ovakvih sustava je što svaki pojedinačni model može biti građen pod utjecajem različitih parametara (npr. snaga lasera).

#### 3. Veličina komore

Velika komora za srašćivanje (700x380x580mm) u kombinaciji sa velikom brzinom skeniranja i pozicioniranjem modela daje procesu visok stupanj proizvodnosti.

### 3.2.5 Prednosti

- dijelovi boljih mehaničkih svojstava od onih izgrađenih stereolitografijom;
- SLS dijelovi mogu se koristiti za funkcionalna ispitivanja;

- postupak SLS brži je od stereolitografije;
- moguća primjena većeg broja materijala;
- nije potreban potporanj jer višak praha podupire prototip;
- neuporabljeni prah može se iskoristiti za sljedeći prototip;
- bolja obradivost izrađenih dijelova u odnosu na stereolitografske dijelove;
- mala zaostala naprezanja.

### 3.2.6 Nedostaci

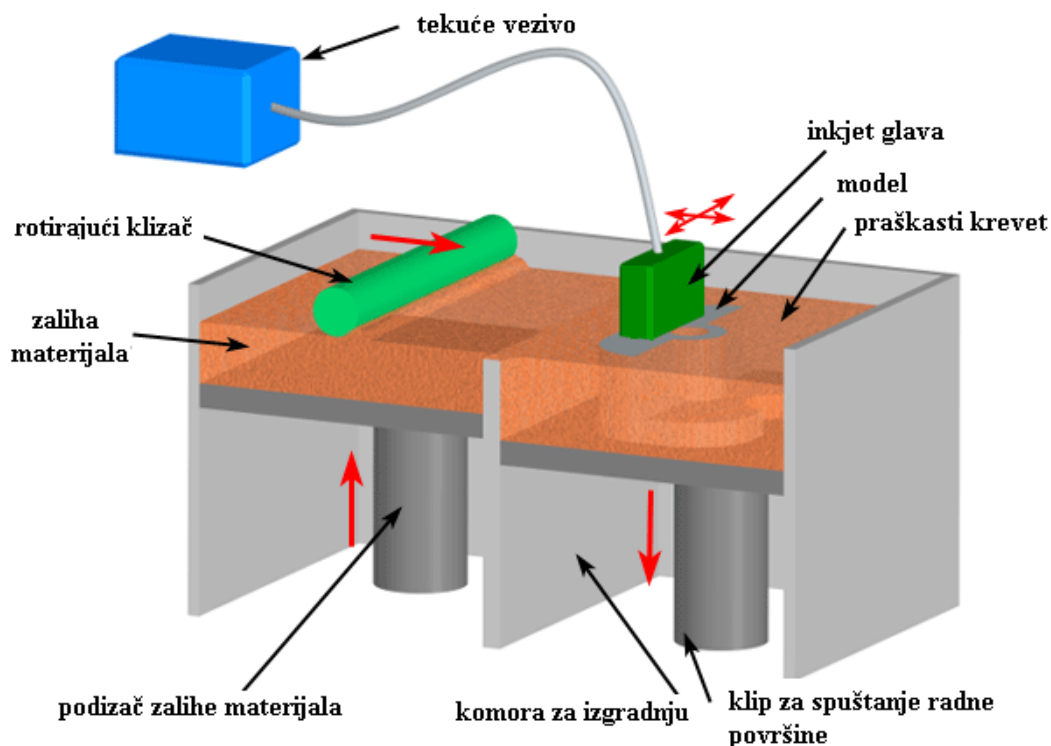
- lošija kvaliteta površine u odnosu na stereolitografske dijelove;
- pri korištenju nekih materijala potrebna je zaštitna atmosfera radi pojave otrovnih plinova tijekom srašćivanja;
- potrebe za perifernim uređajima za čišćenje proizvoda (engl. *Break Out Station*);
- za potrebe brze izrade alata potrebna je Hydrogen Lindbergh-ova peć, koja služi za stvrdnjavanje i infiltraciju metalnih čestica, što zahtijeva dodatno sigurnosno skladištenje radnih plinova;
- sustav zauzima veliku radnu površinu.

## 3.3 3D tisak

Trodimenzionalni tisak (engl. *3D Printing* - 3DP) je licencirao MIT (engl. *Massachusetts Institute of Technology*). Postupak se bazira na inkjet mlaznicama, pomoću kojih se nanosi tekuće vezivo na praškast polimerni materijal kojeg povezuje. Postupak je brz i precizan način izrade modela, koji se koristi za verifikaciju koncepta ili izgradnju kalupa i jezgre za lijevanje [2].

### 3.3.1 Proces izrade prototipa

Pomoću CAD programa eksportira se STL datoteka, te se programskim paketom uređaja izrezuje na stotine digitalnih poprečnih presjeka modela. Ciklus 3D tiska započinje zagrijavanjem komore, nakon čega se ispunjava slojem od 3,18 mm polimernog praha, na kojem se model izgrađuje i kasnije lakše vadi. Time je završena priprema. Pomoću klizača uzduž komore nanosi se novi sloj debljine 0,1 mm. Nakon toga glava prolazi komorom te nanosi vezivo (i boju ako je printer u boji). Klizač sa glavom kreće se po x-y ravnini dok se radni stol spušta za visinu sloja po z osi (Slika 3.5).



Slika 3.5 Princip 3DP postupka [41]

Prvi sloj praša vezivom je očvrstnut po obliku prvog STL sloja modela. Ostatak praša koji se nalazi van kontura služi kao potporna konstrukcija, a kasnije se reciklira. Ciklus se ponavlja do završetka izgradnje modela. Podešavanje orijentacije modela i parametri printanja mogu bitno utjecati na geometriju i točnost izrade. Smjer orijentacije osjetljivih detalja postavlja se u vertikalni položaj. Kod tankih stjenki debljina sloja mora se smanjiti na 0,089 mm i podesiti vrijednost zasićenja praša vezivom, čime se one ojačavaju. Ojačanjem na ovaj način povećava se vrijeme sušenja [12]. Kad je model izgrađen višak praša iz komore usisava se u spremnik. Izgrađeni model se propuhuje komprimiranim zrakom u zasebnoj komori. Proizvođači ovakvih sustava su ZCorp i Voxeljet. Usporedni podaci uređaja dani su u tablicama (Tablica 3.6, Tablica 3.7) [13], [14].

Tablica 3.6 Usporedni podaci 3DP uređaja (ZCorp)

ZCorp					
Model uređaja	ZPrinter 150	ZPrinter 250	ZPrinter 350	ZPrinter 450	ZPrinter 650
Boja	bijela	64 boja	bijela	180 000 boja	390 000 boja
Dimenzije komore, mm	236x185x127	236x185x127	203x254x203	203x254x203	254x381x203
Debljina sloja, mm	0,1	0,1	0,089-0,102	0,089-0,102	0,089-0,102
Broj mlaznica	304	604	304	604	1520
Materijal	Silikatni sadrašti praš				
Tolerancije, mm	± 0,1				
Minimalna debljina stjenke, mm	0,5				

Tablica 3.7 Usporedni podaci 3DP uređaja (Voxeljet)

Voxeljet			
Model	VX500	VX800	VX4000
Dimenzije komore, mm	500x400x300	850x450x500	4000x2000x1000
Debljina sloja, mm	0,08 - 0,15	0,1 - 0,15	0,2 - 0,5
Materijal	polimetil-metakrilat (PMMA)	modificirano akril staklo	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub> pijesak Kerphalit
Tolerancije, mm	± 0,1	± 0,1	± 0,2

### 3.3.2 Dodatne operacije

Nakon čišćenja propuhivanjem u model se, kako bi se učvrstio, infiltrira epoksi ljepilo (cijanoakrilat) ili uretan, kojim se dobivaju elastičniji dijelovi. Infiltrirani modeli mogu imati čvrstoću do 25 MPa. Modeli se naknadno mogu pjeskariti, metalizirati i bojati.

### 3.3.3 Tipična primjena

Modeli se koriste za verifikaciju oblika i izradu kalupa i jezgri za lijevanje, izradu alata i elastičnih dijelova.

### 3.3.4 Prednosti

- izrada modela srednjih do velikih dimenzija;
- nema gubitaka materijala na izradi potporne konstrukcije;
- materijali koji nisu štetni za zdravlje;
- prikaz u bojama;
- brzina izrade;
- točnost;
- mogućnost očvršćivanja vodom (ZCorp).

### 3.3.5 Nedostaci

- potrebna česta zamjena uložaka sa vezivom (100 sati operacije);
- slabe mehaničke karakteristike;
- ograničen broj primjenjivih materijala;
- mogućnost oštećenja kod manualnog rukovanja zelenim komadom.

## 3.4 3D tisak mlazom fotopolimera

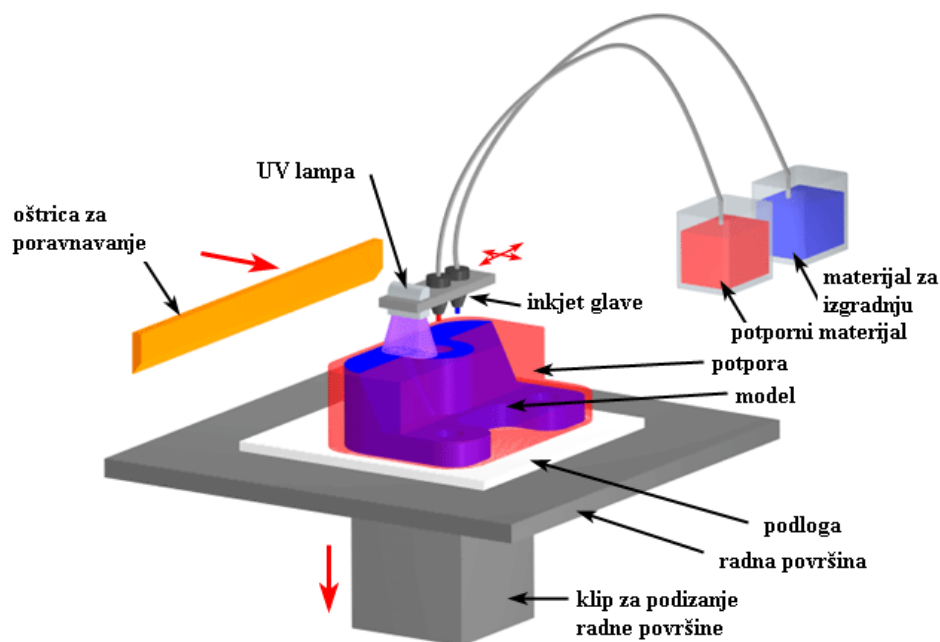
3D tisak mlazom fotopolimera (engl. *3D Printing-Photopolymer Jetting* - 3DP PJ) je sličan procesu stereolitografije. Materijal je tekući fotopolimer koji se polimerizira pomoću UV lampe. Fotopolimer se nanosi pomoću inkjet mlaznica. Izraelska tvrtka Objet Geometries vodeća je u razvoju ove tehnologije, a na tržištu je prisutna i tvrtka 3D Systems [15].

### 3.4.1 Proces izrade prototipa

Koristi se STL datoteka, pomoću koje se model u digitalnom obliku izrezuje na tanke slojeve (debljina sloja 0,015 mm) u horizontalnoj ravnini. Izgradnja modela bazira se na inkjet metodi. Tekući fotopolimer nanosi se na radnu površinu sloj po sloj, pomoću dvije glave koje sadrže



nekoliko stotina (do 1536) mlaznica, koje u jednom koraku istovremeno raspršuju potporni materijal i materijal za izgradnju modela. U istom koraku odvija se i polimerizacija pomoću UV lampe [16]. Radna površina spušta se po z osi za debljinu sloja te se nanosi novi sloj (Slika 3.6).



Slika 3.6 Princip 3DP PJ postupka [42]

Pomoću 3DP PJ metode izgrađuju se modeli stabilnih dimenzija, točnosti 0,025-0,05 mm (ProJet) i 0,1-0,3 mm (PolyJet). Mogu se izrađivati stijenke debljine 0,6 mm. Površina ovakvih modela je među kvalitetnijim u industriji brze izrade prototipova [15]. maksimalne dimenzije modela su 550 x 400 x 300 mm. Nova tehnologija pod nazivom PolyJet Matrix, koja se koristi u uređaju Connex 500, a patentirala ga je tvrtka Objet, novi je pravac u 3D tiskanju. Ovo je prva tehnologija koja omogućava istovremeno nanošenje mlaza različitih materijala. Time je otvorena mogućnost da model bude izgrađen od različitih materijala i ima različita mehanička i fizička svojstva [17]. Pored toga, moguće je miješati materijale te tako dobivati kompozite specifičnih mehaničkih svojstava pod nazivom digitalni materijali (engl. *Digital Materials*). Miješanjem materijala moguće je proizvesti do 60 različitih plastomera i elastomera koji imitiraju svojstva standardnih materijala.

### 3.4.2 Dodatne operacije

Potrebno je skidanje dodatnog materijala potporne konstrukcije. Kod Objet tehnologije potrebna je dodatna peć gdje se potporni materijal u obliku voska tali, a 3D Systems tehnologija koristi potporni materijal koji je topiv u vodi. Model je moguće naknadno doradivati obradom odvajanja čestica, a površinu zaštititi metalizacijom.

### 3.4.3 Materijali i svojstva

Bazična podjela akrilne plastike svodi se na imitaciju polipropilena, ABS plastike, polikarbonata i gume. Tablica 3.8 prikazuje tipove i svojstva materijala [18].

Tablica 3.8 Tipovi i svojstva materijala 3DP PJ postupka

Svojstva materijala	Imitacija inženjerske plastike	Imitacija standardne plastike	Imitacija gume
Zatezna čvrstoća, MPa	50-80	50-65	0,5-25
Modul elastičnosti, MPa	3000	1200-3000	/
Savijanje, MPa	70-130	110	/
Modul savijanja, MPa	1700-3500	2200-3300	/
Produljenje, %	/	/	30-170

Koriste se i materijali za izradu jezgri za investicijsko lijevanje sa niskim postotkom zaostalog pepela od 0,01-0,02% (FullCure 720).

### 3.4.4 Tipična primjena

Širok spektar materijala omogućava izradu modela finih detalja, složene geometrije i točnosti 0,1 mm omogućuje primjenu u različitim granama industrije: provjera montaže sklopova, provjera oblika, funkcionalna testiranja, testiranja kinematike pokretnih dijelova.

### 3.4.5 Prednosti

- Kvaliteta površine;
- Izbor dostupnih materijala;
- Brzina izrade;
- Postojanost dimenzija;
- Izrada detalja;
- Modeli od kombiniranih materijala;
- Lako topljiv potporni materijal.

### 3.4.6 Nedostaci

- Potreba za potpornom konstrukcijom;
- Potrebna peć za otapanje potporne konstrukcije;
- Efektivni radni volumen.

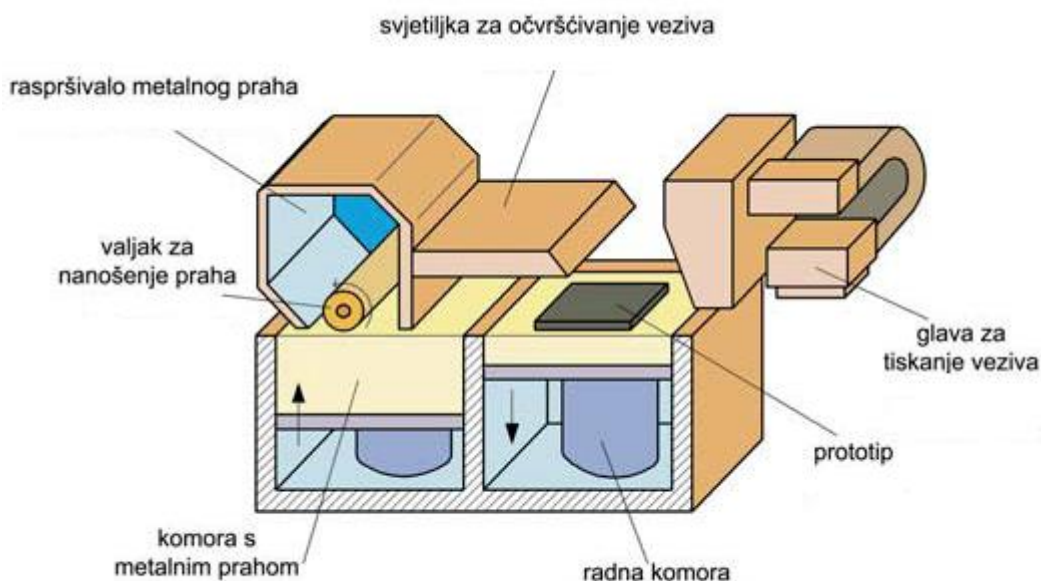
## 3.5 3D tiskanje metala (ProMetal)

Trodimenzionalno tiskanje metala je licencirana tehnologija MIT-a. Uređaje za 3D tiskanje metala pod imenom ProMetal proizvodi američka tvrtka The Ex One. Pomoću ovog postupka mogu se izrađivati prototipni kalupi i metalni prototipovi. Postupak je razvijen na temeljima inkjet tiskanja. Modeli se izgrađuju direktno iz CAD datoteke tako da se na sloj metalnog praha ili specijalnog pijeska nanosi sloj organskog veziva [19].

### 3.5.1 Proces izrade prototipa

ProMetal je jednostavan za korištenje, samo je nekoliko naredbi potrebno do izgradnje modela. Kako se gradnja vrši unutar komore ispunjene praškastim materijalom, model leži u prahu pa nije potrebna potporna konstrukcija [2]. Proces započinje standardnim importiranjem STL formata u uređaj. STL, tj. digitalni model se sječe na tanke horizontalne slojeve. Model se automatski postavlja u orijentaciju tako da najkraća dimenzija predstavlja visinu po z osi. Moguće je importirati

više STL datoteka u jednom procesu. Rotirajući cilindar nanosi prvi sloj praha. Nakon toga nanosi se organsko vezivo pomoću višekanalnih piezoelektričnih elemenata, koji raspršuju vezivo u kapljice [19]. Kapljice prolaze kroz elektrostatsko polje, pri čemu se električki nabijaju, a njihov se naboj rabi za precizno nanošenje na metalni prah. Kada kapljica dotakne prah, nastaje kuglasti konglomerat veziva i metalnog praha. Kapilarne sile djeluju na vezivo te ga pomiču na željena mjesta na metalnom prahu. Time se povezuju čestice metala na jednom sloju te slojevi međusobno [19]. Nakon završenog sloja postolje sa prahom se spušta po z osi za visinu sloja, te se pomoću raspršivala, tj. valjka, nanosi novi sloj praha, koji se poravnava pomoću klizača. Nosač mlaznice vrši kretanje po y osi, a mlaznica na nosaču po x osi (Slika 3.7).



Slika 3.7 Princip ProMetal postupka

ProMetal nudi dva tipa uređaja, koji su namijenjeni za tisak metalne prašine ili pijeska. Uređaji za metalnu prašinu su R-1 te njegov nasljednik MPrint. Komore za izgradnju su veličine 60 x 40 x 50 mm (R-1) i 750 x 380 x 400 mm (MPrint). Debljina sloja iznosi 0,05-0,2 mm. ProMetal RCT uređaji za printanje pješčanih kalupa i jezgri koriste silicij pijesak. Dimenzije komore S Print uređaja za printanje pješčanih kalupa i jezgri su 750 x 380 x 400 mm, a 1800 x 1000 x 700 mm kod S-Max uređaja. Debljina sloja kreće je 0,28-0,5 mm.

### 3.5.2 Dodatne operacije

Nakon izrade modela potrebni su dodatni koraci kako bi model bio funkcionalan.

- Prvo je potrebno očistiti zaostalu prašinu ispuhivanjem. U ovom stanju model je krhak pa je potrebno pažljivo rukovanje.
- Prvi termički ciklus je srašćivanje. Nakon isparavanja kapljevite faze veziva pomoću posebnog sušila, načinjeni prototip sastoji se od 60% obujmnog udjela metalnog praha i 10% udjela veziva. U ovom ciklusu model se zagrijava kako bi se spalilo vezivo.
- Drugi termički ciklus je infiltracija bronce. Model se zagrijava, te se u njegovu poroznu strukturu infiltrira bronca, kako bi se dobila potpuna gustoća. Time su poboljšana mehanička svojstva prototipa, čiji je sastav 60% čelika i 40% bronce.
- Završni postupak je klasična strojna obrada, bušenje, brušenje, poliranje radnog komada.

### 3.5.3 Materijali i svojstva

Metalni prah je mješavina nehrđajućeg čelika i bronce. To su legure pod imenom S3 i S4 (Tablica 3.9) [20].

Tablica 3.9 Svojstva ProMetal čelika

Svojstva materijala	S3	S4
Zatezna čvrstoća, MPa	406	682
Naprezanje tečenja, MPa	234	455
Modul elastičnosti, MPa	148000	147000
Produljenje, %	8	2,3
Tvrdoća	60 HRb	20-25 HRc

Moguće je koristiti elastomere, kompozitne materijale, keramiku, zlato i alatne čelike.

### 3.5.4 Tipična primjena

Pomoću R-1 uređaja mogu se izraditi kompleksni oblici koji se koriste kao kalupi za injekcijsko prešanje matrice za ekstrudiranje, prototipni komadi za ograničena ispitivanja, kalupi za ekstruzijsko puhanje. Uređaj za izradu kalupa i jezgri od silicij pijeska (S-Print) koristi se u autoindustriji za proizvodnju V-8 bloka motora. U svijetu se koristi 30 takvih uređaja različitih namjena.

### 3.5.5 Prednosti

- Direktna proizvodnja funkcionalnih metalnih dijelova;
- Izrada alata;
- Izrada dijelova kompleksnih površina;
- Brzina izrade;
- Radni volumen.

### 3.5.6 Nedostaci

- Naknadna obrada (mogućnost oštećenja manualnim radom);
- Cijena uređaja i materijala;
- Gruba površina.

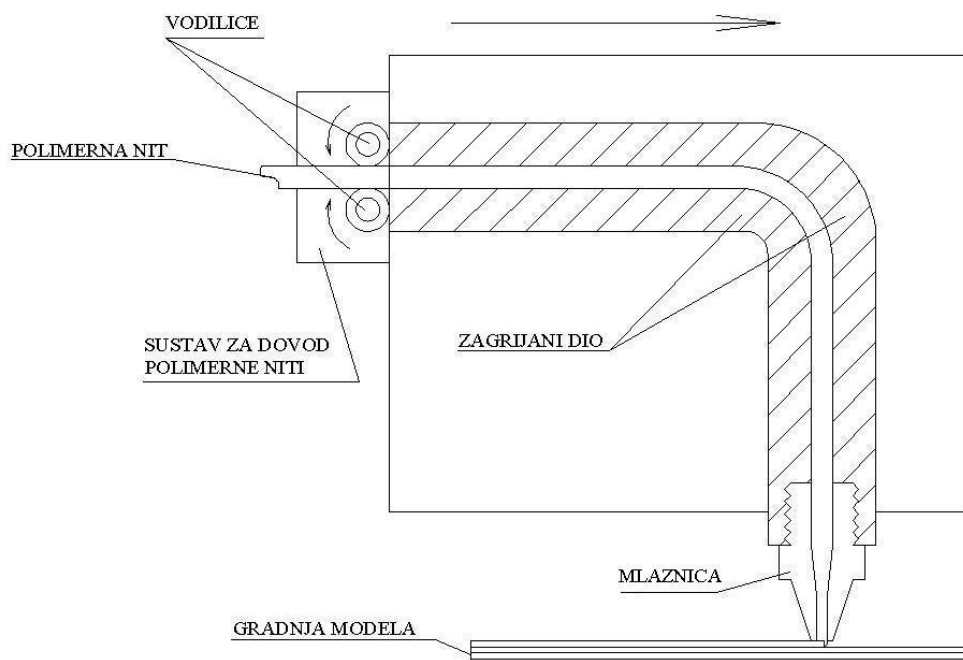
## 3.6 Modeliranje topljenim depozitima

Tehnologiju modeliranja topljenim depozitima (engl. *Fused Deposition Modeling* - FDM) razvila je i patentirala tvrtka Stratasys početkom 1990-ih godina. Početna svrha bila je izrada konceptnog dizajna, no danas se koristi za izradu ljevačkih jezgri i dijelova za direktnu uporabu [2]. Razvojem FDM tehnologija tijekom dva desetljeća, udio na tržištu znatno se povećao, te se po nekim izvorima procjenjuje da na ukupnom tržištu brze izrade prototipova FDM zauzima više od 50% [21].

### 3.6.1 Proces izrade prototipa

Proces započinje pretvaranjem 3D CAD datoteke u STL datoteku. FDM uređaji koriste vlastiti programski paket, pomoću kojeg se manipulira importiranom STL datotekom. Nakon importiranja, na uređaju se podešavaju temperature zagrijavanja depozita, materijala potporne konstrukcije i radnog prostora. U programskom paketu *Insight*, koji koristi FDM tehnologija kod orijentacije modela najčešće se koristi položaj modela gdje se velike površine stavljaju u horizontalnu ravninu,

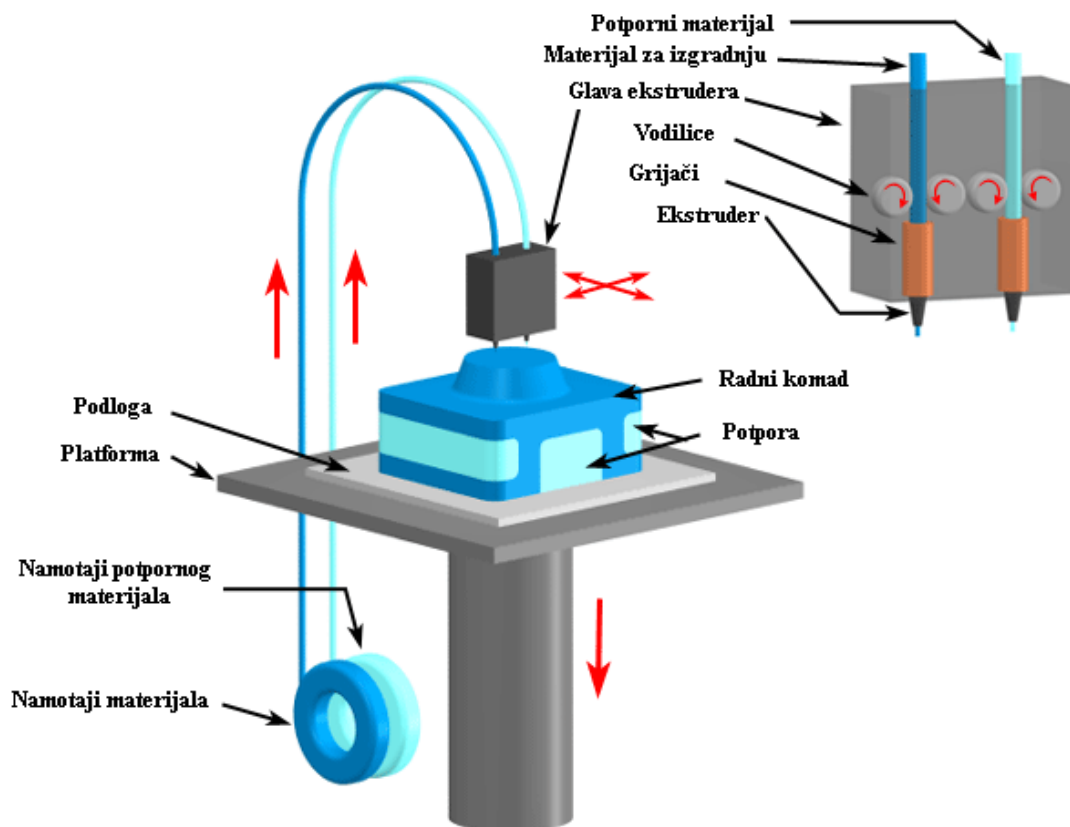
čime se povećava stabilnost i smanjuje potrošnja materijala potporne konstrukcije. Uvjet je da se izbjegne kontakt bitnih detalja modela i potporne konstrukcije, kako bi se očuvala kvaliteta površine. Uređaj nudi tri opcije ispune modela: šuplji model, ispunjen model, mrežna veza između stjenka modela. Nakon toga model se sječe po z osi, te prema potrebi dodaje potporna konstrukcija [22]. Polimerne niti tale se unutar glave ekstrudera. Viskozni materijal dovodi se do mlaznice gdje se volumen depozita reducira, čime se dobiva preciznija izrada detalja (Slika 3.8). Za izradu mlaznice koriste se materijali koji imaju visoku toplinsku vodljivost kako bi materijal za izgradnju modela i potporne konstrukcije bio zagrijan na temperaturu iznad tališta.



Slika 3.8 Glava ekstrudera

Mlaznice se mogu mijenjati kako bi se dobile različite širine položenog depozita. Dvije najčešće dimenzije otvora mlaznice su 0,3 mm i 0,6 mm. Mlaznica koja polaže potporni materijal ima dimenzije otvora od 0,5 - 3,8 mm [2], [23].

Glava ekstrudera ima pomak po x osi dok konstrukcija na kojoj se glava nalazi ima pomak po y osi. Materijal istisnut kroz mlaznicu prati put glave i sljepljuje unaprijed zadane slojeve poprečnih presjeka modela. U jednom ciklusu može se izrađivati više komada. Nakon svakog izgrađenog sloja, platforma na kojoj se nalazi model spušta se po z osi za debljinu sloja (Slika 3.9).



Slika 3.9 Princip FDM postupka [43]

Usporedni podaci Fortus i Dimension uređaja nalaze se u tablicama (Tablica 3.10, Tablica 3.11) [24], [25].

Tablica 3.10 Usporedni podaci FDM uređaja (Stratasys)

Stratasys						
Uređaj	Dimenzije komore, mm	Debljina sloja, mm	Debljina stjenke, mm	Tolerancije, mm	Materijal	Potporni materijal
Fortus 250mc	254 x 254 x 305	0,178 0,254 0,330	0,3 - 0,6	0,127 - 2  (ovisno o veličini modela)	ABSPlus-P430	1
Fortus 360mc	355 x 254 x 254	0,127 0,178 0,254 0,330			ABS-M30 PC-ABS PC	1, 2
Fortus 400mc	356 x 254 x 254	0,127 0,178 0,254 0,330			ABS-M30 ABS-M30i ABSi ABS-ESD7 PC-ABS PC PC-ISO ULTEM 9085 PPSF/PPSU	1, 2
Fortus 900mc	914 x 610 x 914	0,178 0,254 0,330			ABS-M30 ABS-M30i ABSi ABS-ESD7 PC-ABS PC PC-ISO ULTEM 9085 PPSF/PPSU	1, 2
Potporni materijali			Materijali toplivi u vodi – 1 Materijali koji se kidaju – 2			

Tablica 3.11 Usporedni podaci FDM uređaja (Stratasys)

Dimension			
Uređaj	Dimension 1200es	Dimension Elite	Dimension uPrint Plus
Dimenzije komore, mm	254 x 254 x 305	203 x 203 x 305	203 x 203 x 152
Debljina sloja, mm	0,254	0,178	0,254
	0,330	0,254	0,330
Materijal	ABSplus	ABSplus	ABSplus
Potporni materijal	1, 2	1	1
	Materijal topivi u vodi – 1 Materijal koji se kidaju – 2		

### 3.6.2 Svojstva materijala

FDM uređaji koriste spektar termoplastike sa poboljšanim mehaničkim svojstvima tako da takvi modeli mogu podnijeti temperature do 190°C i agresivne kemikalije:

1. ABS (akril-nitril-butadien-stiren) je materijal postojanih dimenzija ima dobru abrazivnu i kemijsku otpornost, dobre čvrstoće (Tablica 3.12, Tablica 3.13). To su poželjne karakteristike kod izrade prototipova. Svi FDM uređaji koriste ABS plastiku, a gotovo 90% svih FDM prototipova izgrađeno je u toj plastici [23].
2. PC (polikarbonat) plastiku odlikuju dobre mehaničke i električne osobine i otpornost na kemikalije (Tablica 3.12).
3. ULTEM-9085, PPSF/PPSU (polifenil sulfon) se koristi u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji.

Pored navedenih materijala koji se nalaze u standardnoj ponudi, vrše se istraživanja kako bi se uveli i novi materijali poput keramike ili metala [26]. Tablica 3.12 i Tablica 3.13 prikazuju svojstva materijala koje koriste Fortus i Dimension uređaji.



Tablica 3.12 Tipovi i svojstva materijala FDM postupka (Fortus)

Fortus							
Svojstva materijala	ABSi	ABS-M30	PC-ABS	PC-ISO	PC	ULTEM-9085	PPSF/PPSU
Zatezna čvrstoća, MPa	37	36	41	57	68	71,6	55
Modul elastičnosti, MPa	2400	2400	1900	2000	2300	2200	2100
Savijanje, MPa	61	61	68	90	104	115	110
Modul savijanja, MPa	2400	2300	1900	2100	2200	2500	2200
Produljenje, %	3	4	6	4	5	6	3
Toplinska deformacija, °C (0,46 MPa) *(1,82 MPa)	96	96	110	133	138	* 153	189

Tablica 3.13 Tipovi i svojstva materijala FDM postupka (Dimension)

Dimension		
Svojstva materijala	ABS (P400)	ABS (P430)
Zatezna čvrstoća, MPa	22	37
Modul elastičnosti, MPa	1627	2320
Savijanje, MPa	41	53
Modul savijanja, MPa	1834	2250
Produljenje, %	6	3
Toplinska deformacija, °C (0,46 MPa)	96	96

### 3.6.3 Dodatne operacije

Dodatna operacija nakon izrade modela je čišćenje od potporne konstrukcije. Postoje dva tipa potporne konstrukcije: lomljiva i topiva u vodi. Lomljiva konstrukcija se najčešće koristi za veće i jače dijelove modela, gdje se kidanjem taj dio ne može oštetiti. Topiva konstrukcija koristi se za potporu sitnih dijelova ili dijelova koji su teško dostupni pa otapanje takvih potpora skraćuje vrijeme i olakšava proces čišćenja. Točnost koja se postiže ovom metodom ne zahtijeva dodatnu obradu no, kako je hrapavost površine najveći nedostatak, moguća je dodatna obrada odvajanjem čestica glodanjem, tokarenjem, brušenjem.

### 3.6.4 Tipična primjena

- Koncept dizajn (vizualizacija)

- Direktna upotreba
- Investicijsko lijevanje
- Medicina – kirurška rekonstrukcija
- Elastične komponente

### 3.6.5 Prednosti

- Manja potrošnja energije;
- Ne koristi se laserski snop;
- Nema posebnih zahtjeva za ventilacijom i hlađenjem;
- Jednostavna primjena;
- Relativno mala investicija u uređaj, niski troškovi održavanja;
- Mogućnost izrade više prototipova u jednom ciklusu;
- Zanemarivo rasipanje materijala;
- Postojanost oblika.

### 3.6.6 Nedostaci

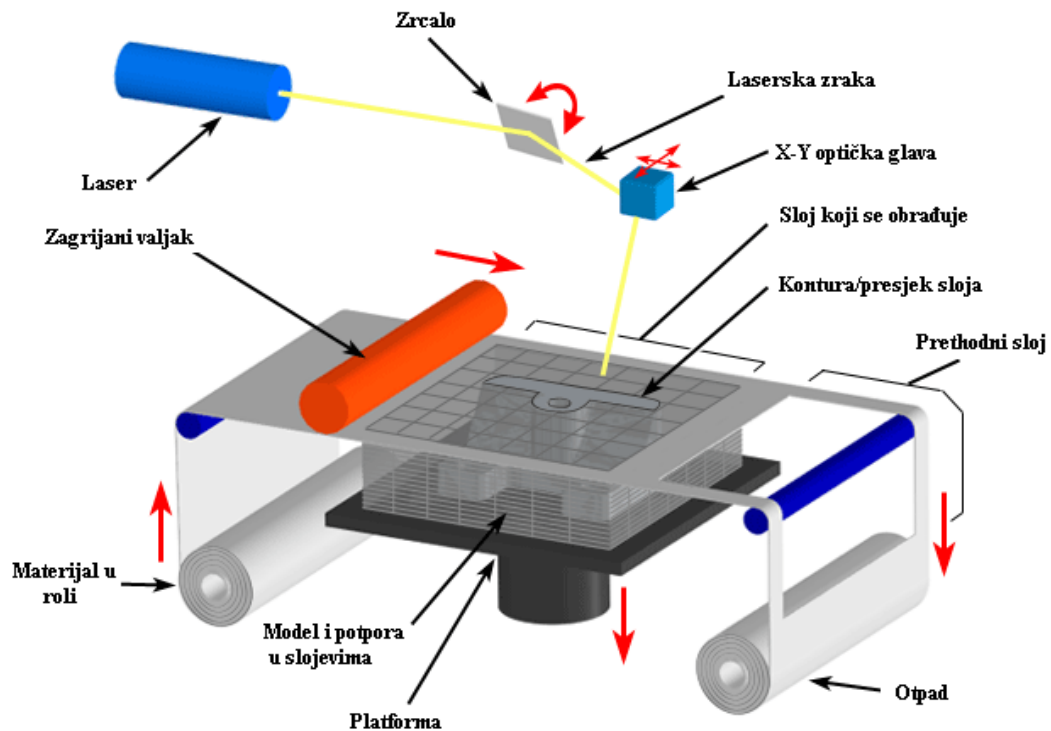
- Funkcionalnost prototipova ograničena je izborom materijala;
- Ograničen broj primjenjivih materijala;
- Nužnost primjene potporne konstrukcije;
- Niža čvrstoća prototipa u smjeru okomitom na smjer izrade;
- Cijena materijala;
- Oscilacije temperature tijekom izrade mogu uzrokovati raslojavanje prototipa.

## 3.7 Izrada prototipa laminiranjem

Izrada prototipa laminiranjem (engl. Laminated Object Manufacturing – LOM) jedna je od najbržih metoda izrade modela srednjih veličina. Proces je hibrid odvajanja i dodavanja materijala na način da se model gradi dodavanjem ploha po z osi, koje se režu u oblik poprečnih presjeka prema konturama modela u x-y ravnini. LOM je brza metoda izrade punih modela.

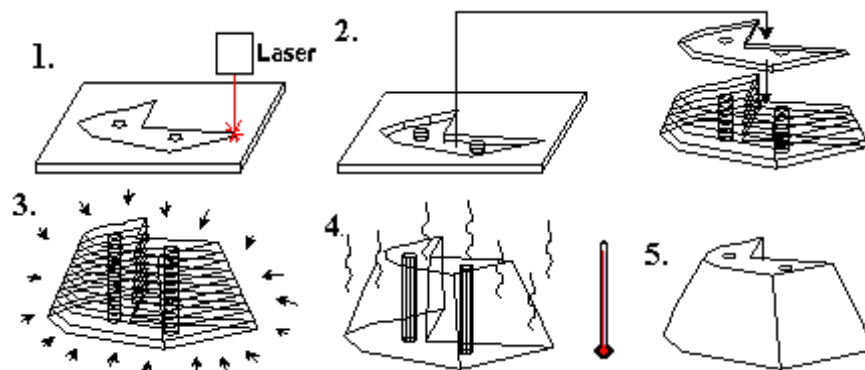
### 3.7.1 Proces izrade prototipa

U procesu se najčešće koriste papir, kompoziti ili polimerna folija koja je namotana na valjak. Pomoću valjka materijal se dovodi na radnu površinu. Folija s donje strane ima disperzirano vezivno sredstvo koje osigurava čvrsto povezivanje slojeva, a kod papira valjak nanosi vezivo (polimer, ljepilo) na donju stranu papira. Nakon toga, uz pomoć optičkog sustava, laserska zraka izrezuje konturu poprečnog presjeka i okolni materijal radi lakšeg odvajanja. Osim lasera koristi se i oštri nož za rezanje papira [26]. Nakon izrezivanja zagrijani valjak prelazi preko folije kako bi se osiguralo bolje povezivanje sloja. Platforma na kojoj se nalazi model spušta se za visinu sloja i čitav postupak se ponavlja (Slika 3.10).



Slika 3.10 Princip LOM postupka [44]

Kod CAM-LEM uređaja postoji mogućnost izrade modela od keramičkih ili metalnih ploča. Ploče su izrađene od keramičkog ili metalnog praha, koji je vezan polimernim vezivom. Debljina sloja kod keramičkih ploča kreće se od 0,03 do 0,6 mm, a kod metala 1-18 mm. Te ploče se izrezuju pomoću lasera, sloj po sloj, te se slažu jedna povrh druge. Kasnije se takav model zagrijava kako bi se vezivo otopilo, a potom se srašćuje na visokoj temperaturi (Slika 3.11).



Slika 3.11 Princip LOM postupka (CAM-LEM)

Tablica 3.14 prikazuje usporedne podatke uređaja LOM postupka [27], [28], [29]. Usporedba ovih uređaja korisna je samo kao orijentacija raspoloživih LOM tehnika i njihovih mogućnosti.

Tablica 3.14 Usporedni podaci LOM uređaja (Solido, Mcor, CAM-LEM)

Uređaj	Solido	Mcor	CAM-LEM
Model	SD 300 Pro	Matrix 300	CL-100
Materijal	Papir A4 (80 gsm) PVC	PVC inženjerska plastika (folija)	Keramika (Si, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Metal (željezo, čelik)
Dimenzije modela, mm	160x210x135	277x190x150	150x150x150 350x350x350
Tolerancije (xy), mm	± 0,1	± 0,1	± 0,5
Debljina sloja, mm	0,168	0,1	Keramika: 0,03-0,6 Metal: 1-18
Format datoteke	STL	STL	STL

### 3.7.2 Dodatne operacije

Kod folije i papira skida se višak materijala te se aplicira impregnacijsko sredstvo kako bi se model zaštitio od vlage. Prije srašćivanja zelenog komada moguća je obrada odvajanjem čestica.

### 3.7.3 Materijali i svojstva

Nakon impregnacije papir je zaštićen od vlage i takav model zadovoljava funkciju verifikacije koncepta. Zatezna čvrstoća je 24-40 MPa. SolidVC (PVC) materijal ima zateznu čvrstoću 40-50 MPa, modul elastičnosti 1200-2000 MPa, a produljenje 30-100%. Kod CAM-LEM materijala postiže se zatezna čvrstoća 550 MPa za nehrđajući čelik (X2CrNiMoN17-12-2). Model od keramike je otporan na agresivne medije i koristi se za visoke temperature do 1500°C.

### 3.7.4 Tipična primjena

CAM-LEM se koristi za izradu funkcionalnih modela gdje je potrebna visoka čvrstoća, otpornost na agresivne medije i na visoke temperature.

Modeli od papira i folije koriste se za verifikaciju oblika i sukladnosti dijelova u sklopu. Postupak se primjenjuje kod modela gdje nema sitnih detalja.

### 3.7.5 Prednosti

- Jednostavna izrada;
- Cijena uređaja i materijala;
- Održavanje;
- Nema potporne konstrukcije.

### 3.7.6 Nedostaci

- Mali izbor materijala;
- Veliki udio otpadnog materijala;
- Ograničena primjena.

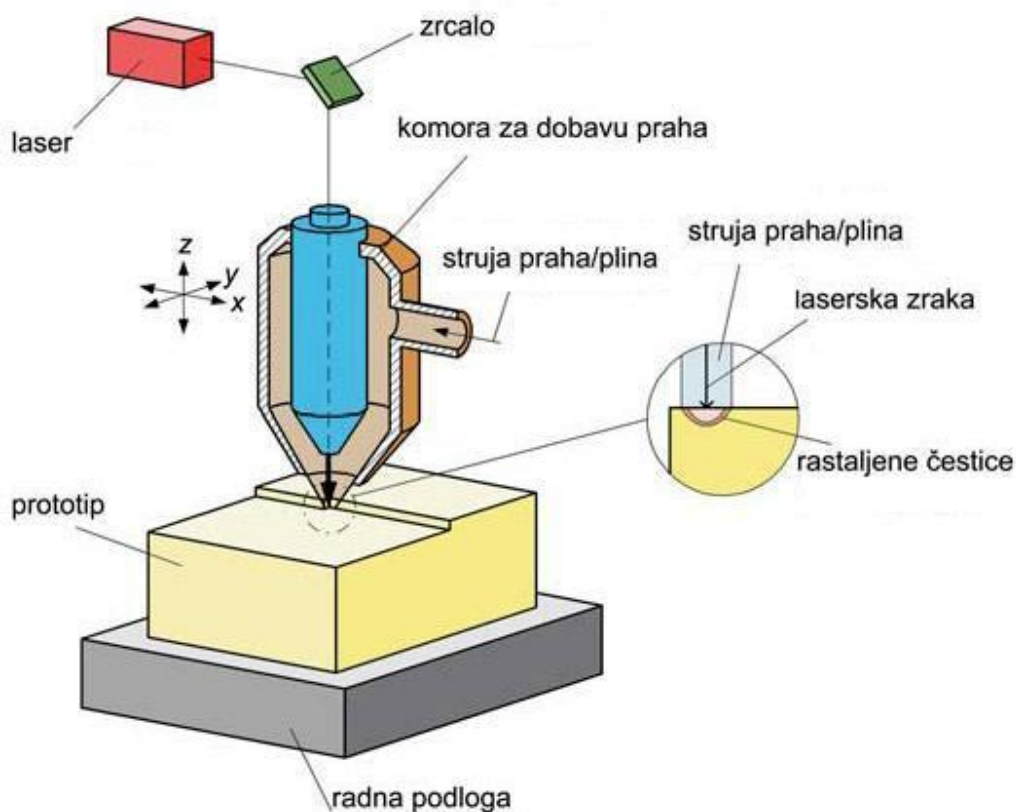
## 3.8 Izravno taloženje metala laserom

Postupak izravnog taloženja metala laserom (engl. *Laser Engineered Net Shaping – LENS*) je razvijen u Sandia National Laboratories, a sustav proizvodi i prodaje tvrtka Optomec Design Company. Materijali koji se koriste uglavnom su metali (nehrđajući čelik, alatni čelik, čelični lijev, kompozitni materijali, superlegure na bazi nikla, titan i njegove legure, bakar i njegove legure, keramika, staklo, poliester i poliamid).

### 3.8.1 Proces izrade prototipa

LENS sistemi također koriste tehniku nizanja slojeva pa se tako pred-priprema sastoji od izrade 3D CAD modela, te eksportiranja STL datoteke. Postupak započinje ubrizgavanjem točno određene količine metalnog praha kroz mlaznice u točku fokusa laserske zrake (engl. *Yag Laser*). Kako se većinom koriste metali, laseri su snage 500 W – 2 kW, ovisno o vrsti metala. Tip lasera je Nd:YAG laser s krutom jezgrom koji se sastoji od štapića itrij-aluminijevog granata (YAG), dopiranog atomima neodimija ( $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ). Aktivni medij lasera su trostruko ionizirani ioni neodimija ( $\text{Nd}^{+3}$ ). Nd:YAG laseri se koriste za rezanje, bušenje, varenje, graviranje i drugu obradu metala, plastike i drugih materijala. Laser postupno prelazi po cijeloj površini poprečnog presjeka formirajući novi sloj. Polaganje materijala prvo se vrši po konturama, a nakon toga se ispunjava unutrašnjost. Postupak se vrši u pod-tlačnoj komori, pod utjecajem inertnog plina (Ar), kako bi se spriječila oksidacija praška tijekom taljenja (Slika 3.12).

Postoje tri osi kretanja, x i y, koje osigurava glava mlaznice, te z os, koju osigurava platforma. Takvim se postupkom izgrađuju jednostavni i polu-složeni oblici. Izradu izbočina i slobodnih površina koje strše iz modela teško je izvesti bez potpornih konstrukcija.



Slika 3.12 Princip LENS postupka [30]

Prema podacima dobavljača, točnost oblika modela kod LENS sustava je 0,25 mm. Točnost oblika po xy ravnini je 0,12 mm, dok je po z osi 0,25 mm. Debljina sloja koji se nanosi kreće se od 0,025-1 mm, dok širina položenog sloja može biti 0,25-2,5 mm. Dimenzije komore za LENS 750 su 300 x 300 x 300 mm, a za LENS 850-R iznose 900 x 1500 x 900 mm.

### 3.8.2 Dodatne operacije

Kako su platforma i radni komad koji na nju naliježe od istog materijala, prvi sloj depozitnog materijala se zavari na površinu platforme, a kasnije se radni komad odvaja rezanjem. Radni komad moguće je naknadno doradivati obradom odvajanja čestica. Toplinske obrade nisu potrebne.

### 3.8.3 Svojstva materijala

Na Optomec-ovim LENS uzorcima izvršena su ispitivanja na vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja i elongaciju (Tablica 3.15) [30]. Dobiveni podaci uspoređeni su sa standardnim kaljenim uzorcima od istog materijala. Podaci ispitivanja uzoraka govore u prilog LENS sistema, iako su proizvedeni aditivnom tehnikom.

Tablica 3.15 Tipovi i svojstva materijala LENS postupka

	Nehrđajući čelik		Alatni čelik	Legure na bazi Ni		Ti legura
	LENS 304L	LENS 316L		LENS IN625	LENS IN718	
Mehanička svojstva			LENS H13			Ti-6Al-4V
Granica razvlačenja 0,2%, MPa	387	437	1467	490	1088	830
Zatezna čvrstoća, MPa	705	792	1709	829	1247	900
Produljenje, %	51	54,1	1	43	21,7	10

### 3.8.4 Tipična primjena

Kako modeli koji su proizvedeni ovim postupkom imaju gotovo identičnu čvrstoću kao gotovi proizvodi napravljeni klasičnim metodama, koriste se za ispitivanje i ocjenjivanje svojstava gotovih proizvoda ili kao alat za injekcijsko prešanje. Specifična upotreba ovog postupka je i mogućnost popravka, tj. rekonstrukcije strojnih dijelova složene geometrije (engl. *Reverse Engineering*), kao što su npr. turbine.

### 3.8.5 Prednosti

- dijelovi odličnih mehaničkih svojstava;
- izbor materijala;
- brza izrada funkcionalnih modela složenih geometrija;
- niski unos topline (male deformacije zone zagrijavanja).

### 3.8.6 Nedostaci

- gruba površina (potrebno poliranje);
- slaba dimenzionalna točnost (potrebna obrada odvajanja čestica);
- cijena.

## 4 TEHNIČKE I EKONOMSKE ZNAČAJKE POSTUPAKA

Izrada prototipova na nekoj od ponuđenih tehnologija ovisi o tehničkim zahtjevima specifične grane u industriji. Pri odabiru metode brze izrade prototipova najvažnije je da tip izrađenog modela opravdava investiciju. Kako bi izrađeni model opravdao investiciju, pri odabiru metode uzima se u kalkulaciju točnost i svojstva modela, te vrijeme i troškovi izrade.

### 4.1 Tehničke značajke

Svaka od metoda brze izrade prototipa može se klasificirati prema točnosti i kvaliteti izrade, koje model ili prototip zadovoljava ili zahtijeva. Točnost i kvaliteta izrade opisani su u tri razine: oblik, sukladnost u sklopu i funkcionalnost.

Prva razina je razina *oblika*, koja definira sposobnost modela da prikaže izgled, veličinu i odnos površina. Model koji zadovoljava *oblik* ima sposobnost da prezentira geometriju i odnos površina. U tom slučaju model ne mora imati mehaničke karakteristike i točnost izrade originalnog komada [31].

Druga razina modela je razina *sukladnosti* dijela u sklopu. Ovdje je potrebna određena točnost koju model mora imati kako bi se izvršila kontrola dimenzija i testiranje tolerancija položaja u nekom sklopu. Ni u ovom slučaju nisu potrebne mehaničke karakteristike originalnog komada.

*Funkcionalna* razina obuhvaća mehaničke karakteristike originalnog dijela i točnost geometrije i dimenzija. Na *funkcionalnim* prototipovima vrše se mehanička ispitivanja i ispitivanja funkcioniranja dijelova u sklopu. Iako se takva ispitivanja mogu vršiti postupkom konačnih elemenata (engl. *Finite Element Method* – FEM) ponekad je potrebno izraditi funkcionalan model kojim se dobivaju usporedni podaci za eventualnu daljnju izmjenu dizajna ili materijala. Kod ove razine najčešće su prepreke ograničenja materijala [31].

Brza izrada prototipova aditivnim metodama je postupak koji omogućava kratko vrijeme izrade modela uz relativno niske troškove. Odabrali odgovarajuću tehnologiju je izazov, obzirom da još uvijek nisu postavljeni standardi. Da bi se odabrala odgovarajuća metoda za određenu primjenu potrebno je uzeti u obzir prednosti i ograničenja pojedinačne metode. Kriteriji po kojima se vrši evaluacija tehnologije podijeljeni su u nekoliko kategorija [32]:

#### 1. Ekonomija:

- Troškovi tehnologije, tj. uređaja (izbjegavati skupu tehnologiju kao što je laser ili zraka elektrona);
- Dodatni troškovi (periferni uređaji, oprema za naknadnu obradu, troškovi održavanja);
- Troškovi materijala;
- Mogućnost reciklaže materijala.

#### 2. Vrijeme:

- Omjer depozita (položena količina materijala u jedinici vremena);
- Vrijeme ciklusa (ukupno vrijeme potrebno za izradu modela - fokus na naknadnu obradu).

#### 3. Performanse:

- Poželjna izrada elemenata malih dimenzija;
- Izrada potporne konstrukcije malih dimenzija;
- Sposobnost izrade kompleksnih geometrija;
- Sposobnost izrade ćelija malih dimenzija;

- Izrada više komada u jednom ciklusu;
- Izrada modela velikih dimenzija (veličina komore);
- Kvaliteta površine;
- Gustoća zelenog komada.

#### 4. Materijali:

- Kvaliteta materijala odabrane tehnologije;
- Veći izbor korištenih materijala;
- Što manje stezanje pri otvrdnjavanju;
- Materijali svojstava sličnih standardima;
- Izotropna svojstva materijala gotovih komada;
- Jednostavno skidanje potpornih konstrukcija;
- Mogućnost uvođenja novih materijala.

#### 5. Operacije:

- Minimalni čovjekov utjecaj;
- Jednostavnost upravljanja;
- Minimalni broj dodatnih operacija.

#### 6. Ostalo:

- Štetnost za zdravlje i okoliš;
- Niski postotak otpada;
- Reciklaža;
- Potreba za skladišnim prostorom (skladištenje opasnih tvari).

## 4.2 Ekonomske značajke

Iako tehnologija brze izrade prototipova omogućava značajno smanjenje vremena i troškova razvoja i izrade modela, potrebno je znati trošak samog prototipa. Treba napomenuti da svaka metoda iziskuje uključivanje specifičnih podataka u proračun troška izrade prototipa. Zato kod odabira metode treba odabrati onu koja zadovoljava potrebnu točnost, geometriju i mehanička svojstva modela uz minimalne troškove izrade.

Tablica 4.1 predstavlja primjer za usporedbu troškova izrade specifičnog modela, izrađenog različitim metodama. Izračun je napravljen za model volumena 1638,7 cm<sup>3</sup> [31].

*Tablica 4.1 Usporedba troškova izrade*

Proces brze izrade prototipa	SL	SLS	3DP	FDM	LOM
Brzina izrade, cm <sup>3</sup> /h	65,48	65,48	409,67	98,32	163,87
Cijena radnog sata, €/h	21	21	3,5	7	7
Cijena materijala, €/cm <sup>3</sup>	0,17	0,17	0,042	0,085	0,0085
Vrijeme naknadne obrade, h	4	1	0,25	1	5
Cijena naknadne obrade, €/h	14				
Cijena modela, €	861	819	875	270,2	154



### 4.3 Vrijeme izrade modela

Slijedi prikaz proračuna vremena izrade modela za 3D tisak pomoću praškastih materijala. Razlog zašto je odabran proračun za 3D tisak je niska cijena uređaja i visoki stupanj položenog materijala [32].

1. Broj prolaza za izradu jednog sloja jednog komada:

$$N_b = \frac{W_p}{W_{gl}} = \frac{W_p}{N_{gl} \cdot (N_{ml} \cdot d_n)} \quad (4.1)$$

$W_p$  - širina modela (x), mm

$W_{gl}$  - širina glave, mm

$N_{gl}$  - broj glava za printanje

$N_{ml}$  - broj mlaznica

$d_n$  - promjer mlaznica, mm

2. Broj slojeva potreban da se izgradi jedan komad:

$$N_l = \frac{d_p}{LT} \quad (4.2)$$

$d_p$  - visina modela, mm

$LT$  - debljina sloja, mm

3. Vrijeme izrade jednog ili više modela u jednom sloju komore:

$$t_{pl} = N_l \cdot (t_l + t_{re}) + t_{pt}, s \quad (4.3)$$

$t_l$  - vrijeme izrade jednog sloja, s

$t_{re}$  - vrijeme nanošenja sloja praha, s

$t_{pt}$  - pripremno vrijeme, s

4. Vrijeme nanošenja sloja praha:

$$t_{re} = \left( \frac{LT}{v_{pi}} \right) + \left( \frac{W_b + W_f}{v_{re}} \right), s \quad (4.4)$$

$v_{pi}$  - brzina dizanja/spuštanja postolja, mm/s

$v_{re}$  - brzina rotirajućeg klizača, mm/s

$W_f$  - širina komore sa zalihom praha, mm

5. Vrijeme čišćenja mlaznica i punjenja uloška vezivom<sup>1</sup>:

$$t_{prime,tot} = t_{prime} \cdot \left( \frac{N_l}{20} \right), s \quad (4.5)$$

$t_{prime}$  - vrijeme punjenja uloška vezivom ( $\approx 10$  s), s

6. Vrijeme izrade jednog sloja, jednog ili više modela:

<sup>1</sup> Uz pretpostavku da se čišćenje mlaznica vrši svakih 20 slojeva.

$$t_1 = \left( \frac{2h_b}{v_f} \right) \cdot N_p \cdot N_b + \frac{W_b}{v_s}, s \quad (4.6)$$

$h_b$  - prolaz glave po y osi komore, mm

$v_f$  - brzina glave, mm/s

$N_p$  - broj ugniježđenih modela

$N_b$  - broj prolaza za izradu jednog sloja jednog modela

$W_b$  - prolaz glave po x osi komore, mm

$v_s$  - brzina nosača glave, mm/s

7. Broj modela po sloju komore:

$$N_p = \left( \frac{W_b}{W_p + x_s} \right) \cdot \left( \frac{h_b}{h_p + y_s} \right) \quad (4.7)$$

$x_s$  - razmak između ugniježđenih modela po x osi, mm

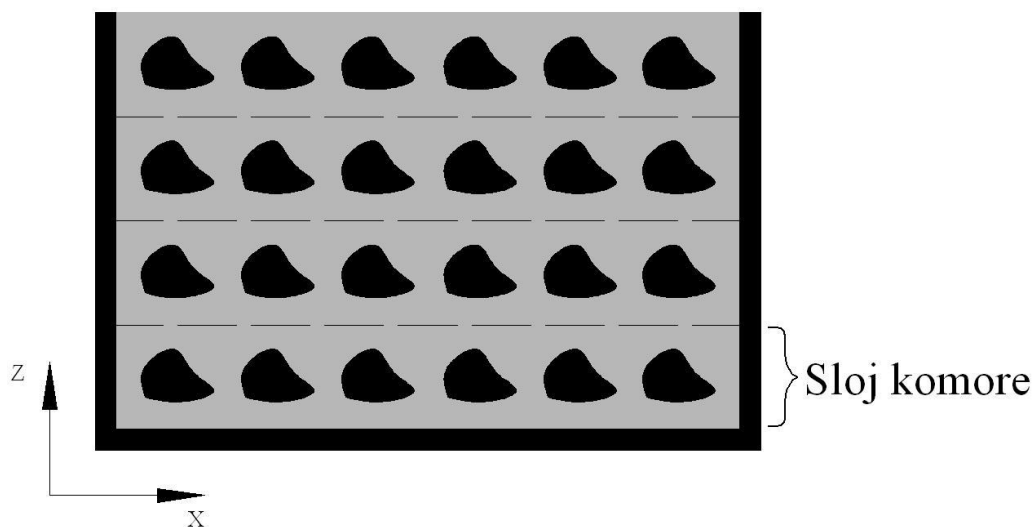
$y_s$  - razmak između ugniježđenih modela po y osi, mm

$h_p$  - dubina modela (y), mm

8. Broj slojeva u komori (Slika 4.1):

$$N_{pl} = \frac{d_b}{d_p + 25 \cdot LT} \quad (4.8)$$

$d_b$  - visina komore, mm



Slika 4.1 Slojevi komore

9. Ukupno vrijeme izrade svih modela u komori:

$$t_t = t_{pl} \cdot N_{pl} + t_{su} + t_{cl} \cdot N_{pl} \cdot N_p + t_{dr} + t_{sin}, s \quad (4.9)$$

$t_{su}$  - pripremno vrijeme (ovisi o uređaju), s

$t_{cl}$  - vrijeme čišćenja modela, s

$t_{dr}$  - vrijeme sušenja modela, s

$t_{sin}$  - vrijeme srašćivanja, s

#### 4.4 Izračun troškova izrade

Ukupni godišnji troškovi sastoje se od fiksnih troškova  $C_{\text{fix}}$  (4.9) i troškova grupe modela. Fiksni troškovi odnose se na troškove nabave opreme koji su raspoređeni na broj izradaka u godini  $N_{\text{PPY}}$ . Troškovi grupe modela su varijabilni troškovi (mijenjaju se u ukupnom iznosu razmjerno s promjenom opsega proizvodnje) **Error! Reference source not found.**, vezani na grupu proizvoda pojedinačnog ciklusa. Ukupni godišnji troškovi proizvodnje grupe modela su produkt ukupnih troškova pojedinačnih grupa i broja grupa izrađenih godišnje (broj modela u godini podijeljen sa brojem modela u grupi) [32].

1. Ukupni godišnji troškovi:

$$C_t = C_{\text{fix}} + C_{\text{ba}} \cdot \left( \frac{N_{\text{PPY}}}{N_{\text{pl}} \cdot N_{\text{p}}} \right), \text{ €} \quad (4.10)$$

$N_{\text{PPY}}$  - broj izradaka u godini

2. Fiksni troškovi:

$$C_{\text{fix}} = (C_{3\text{DP}} + C_{\text{odr}}) \cdot N_{3\text{DP}} + C_{\text{pe}} + C_{\text{ks}}, \text{ €} \quad (4.11)$$

$C_{3\text{DP}}$  - troškovi uređaja, €

$C_{\text{odr}}$  - troškovi održavanja uređaja, €

$N_{3\text{DP}}$  - ukupan broj uređaja

$C_{\text{pe}}$  - troškovi peći, €

$C_{\text{ks}}$  - troškovi komore za sušenje, €

3. Troškovi izrade pojedinačne grupe:

$$C_{\text{gr}} = C_{\text{mat}} \cdot N_{\text{pl}} \cdot N_{\text{p}} + C_{\text{op}} \cdot t_{\text{pl}} \cdot N_{\text{pl}} + C_{\text{red}}, \text{ €} \quad (4.12)$$

$C_{\text{mat}}$  - troškovi materijala po grupi, €

$C_{\text{op}}$  - operativni troškovi po satu, €

$C_{\text{red}}$  - troškovi reduciranja broja modela u grupi, €

4. Troškovi materijala po modelu:

$$C_{\text{mat}} = V_{\text{mod}} \cdot \rho_{\text{ox}} \cdot (C_{\text{ox}} + P_{\text{vez}} \cdot C_{\text{vez}}) + V_{\text{mod}} \cdot C_{\text{ot}}, \text{ €} \quad (4.13)$$

$\rho_{\text{ox}}$  - gustoća materijala,  $\text{kg/mm}^3$

$V_{\text{mod}}$  - volumen zelenog komada,  $\text{mm}^3$

$C_{\text{ox}}$  - trošak materijala, €/g

$P_{\text{vez}}$  - vezivo, %

$C_{\text{vez}}$  - trošak veziva, €/g

$C_{\text{ot}}$  - trošak otapala, €/mm<sup>3</sup>

5. Ukupni troškovi po modelu:

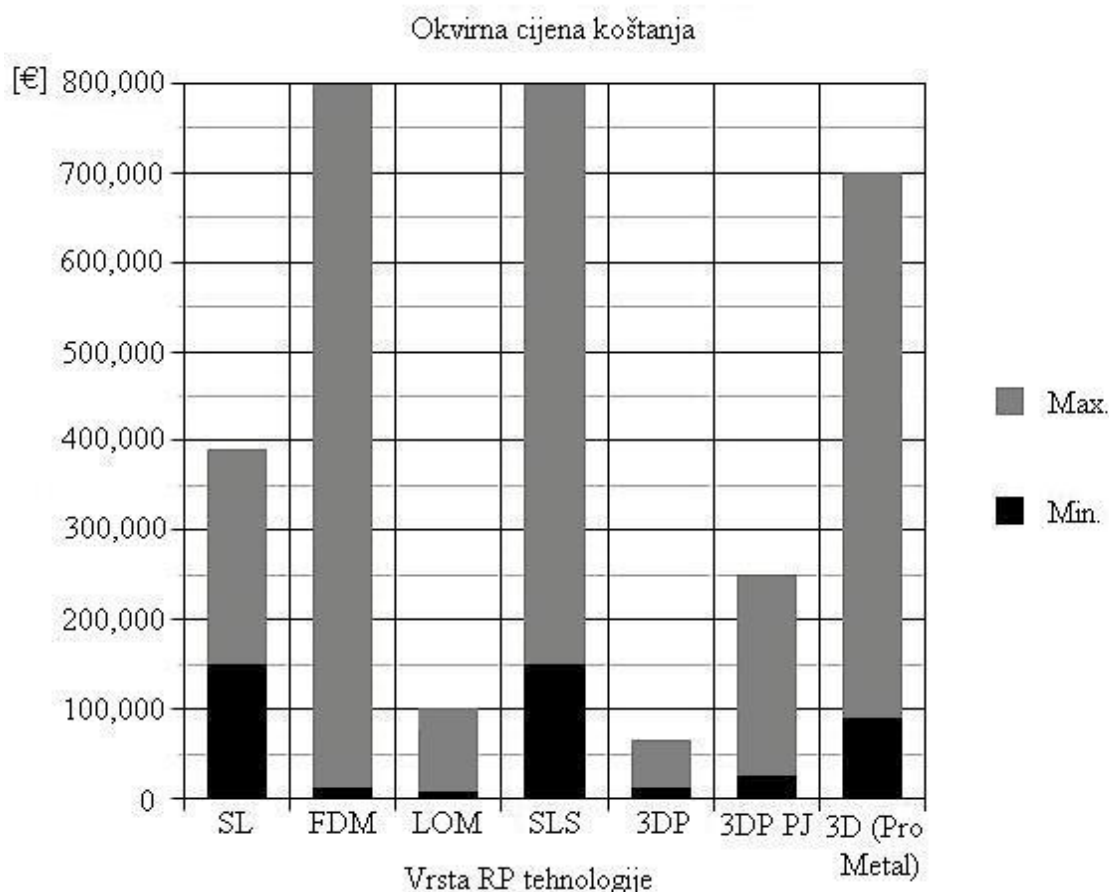
$$C_{\text{mod}} = \frac{C_t}{N_{\text{PPY}}}, \text{ €} \quad (4.14)$$

## 5 USPOREDNI PRIKAZ POSTUPAKA

U ovom poglavlju biti će predstavljeni usporedni podaci tehnologija opisanih u ovom radu. Potrebno je napomenuti kako ove usporedbe nemaju referentnog značaja te kao takve nisu primjenjive u odabiru zahtijevane tehnologije. Grafovi su približan prikaz tehničkih podataka i mogućnosti uređaja koji ovise o proizvođaču, uređaju i materijalu.

Svaka od ovih tehnologija ima svoje prednosti i nedostatke i primjenu u specifičnom području, stoga su ovi podaci samo pregled na temelju kojeg se može dobiti okvirna slika o nekim razlikama. Kako je aditivna proizvodnja relativno nova na tržištu, tehnički podaci o tehnologijama i uređajima nisu još specificirani tj. standardizirani pa se, ovisno o izvoru, pojavljuju oscilacije u brojkama koje opisuju neku tehnologiju. Stoga je prije nabavke uređaja potrebno obaviti detaljno istraživanje o uređaju i njegovim performansama te o materijalima koje koristi.

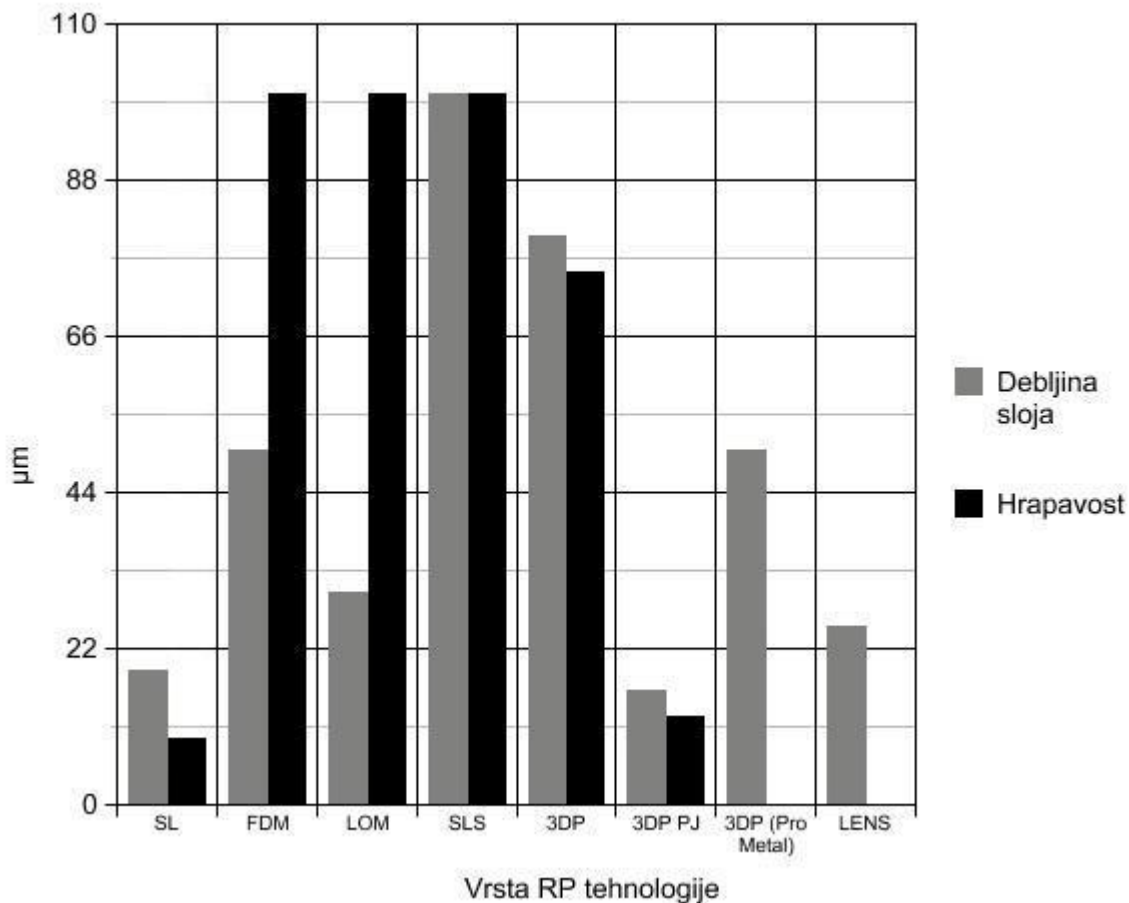
Slika 5.1 prikazuje okvirne cijene tehnologija u rasponu od najniže cijene do najviše ovisno o vrsti tehnologije. Prema grafovima je vidljivo kako su LOM i 3DP tehnologije najjeftinije, no tu treba uzeti u obzir druge parametre poput broj materijala koji je primjenjiv kod tehnologija, točnost modela, upotrebljivost izrađenog modela prema razinama oblik/sukladnost/funkcionalnost itd.



Slika 5.1 Okvirne cijene uređaja

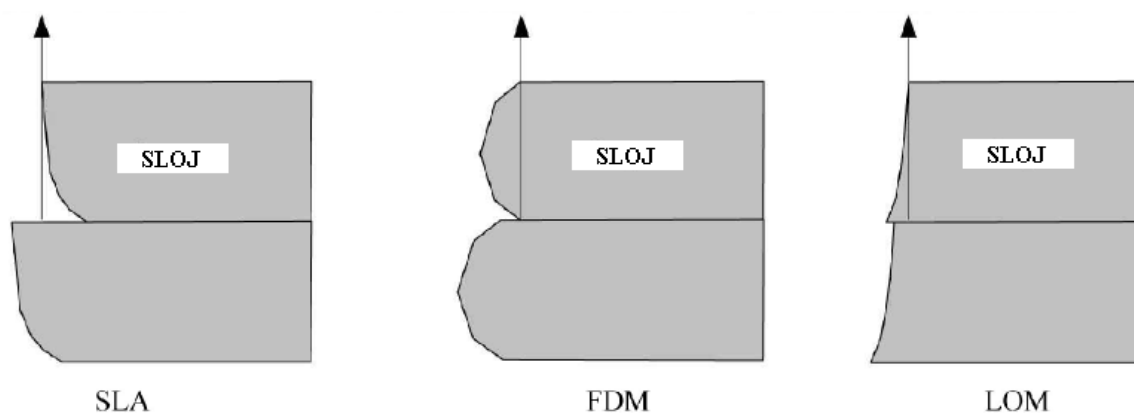
Grafom na slici (Slika 5.2) prikazan je aproksimativni odnos debljine sloja i hrapavosti površine. Kod FDM tehnologije površina je gruba zbog gustoće istopljenog, ekstrudiranog polimera

što uzrokuje višak materijala na boku položenog sloja (Slika 5.3) [33]. Bolja kvaliteta može se postići smanjivanjem debljine sloja i promjera mlaznice [23]. Kod LOM tehnologije površina je grublja, obzirom na debljinu sloja, zbog viška materijala na granici sloja. Kvaliteta površine može se poboljšati orijentacijom modela [33].



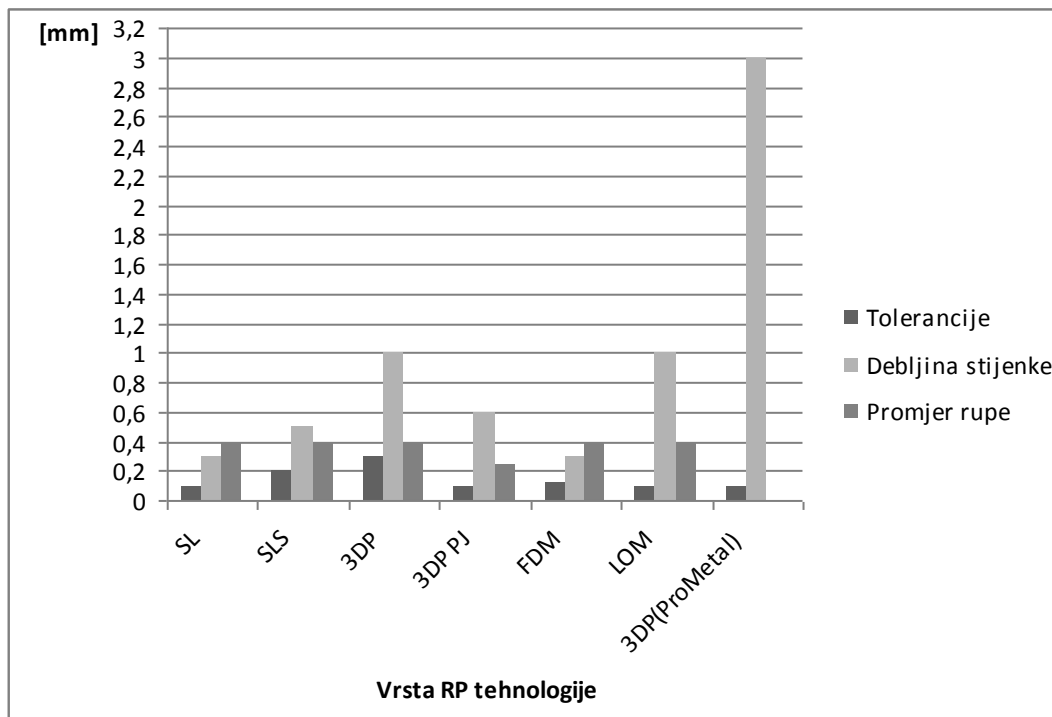
Slika 5.2 Odnos debljine sloja i hrapavosti površina

Slika 5.3 prikazuje shematski prikaz granica sloja izgrađenog SLA/FDM/LOM tehnikom.



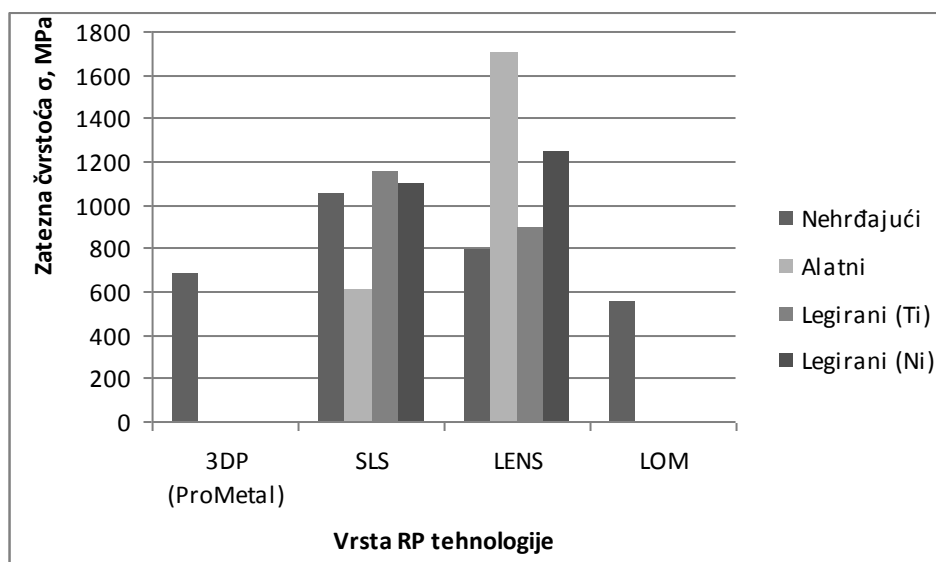
Slika 5.3 Shematski prikaz granica sloja izgrađenog SLA/FDM/LOM tehnikom [33]

Slika 5.4 prikazuje, uz dobivenu točnost modela, minimalnu debljinu stijenke i promjer rupa koje je moguće izvesti kod nabrojanih RP tehnologija.

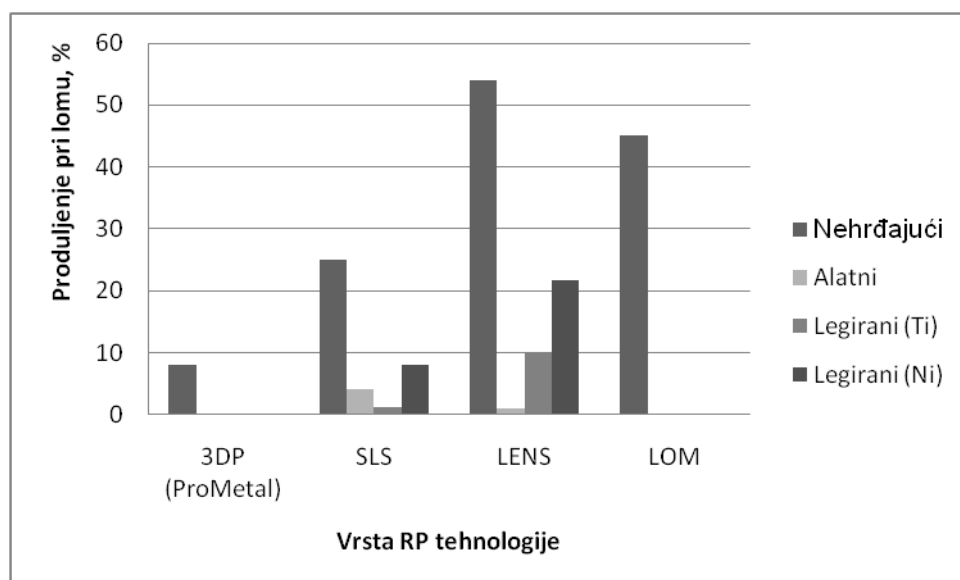


Slika 5.4 Točnost modela, minimalna debljina stijenke i promjer rupa

Grafički prikaz na slikama prikazuje zateznu čvrstoću (Slika 5.5) i produljenje pri lomu (Slika 5.6) metalnih materijala koji se koriste.

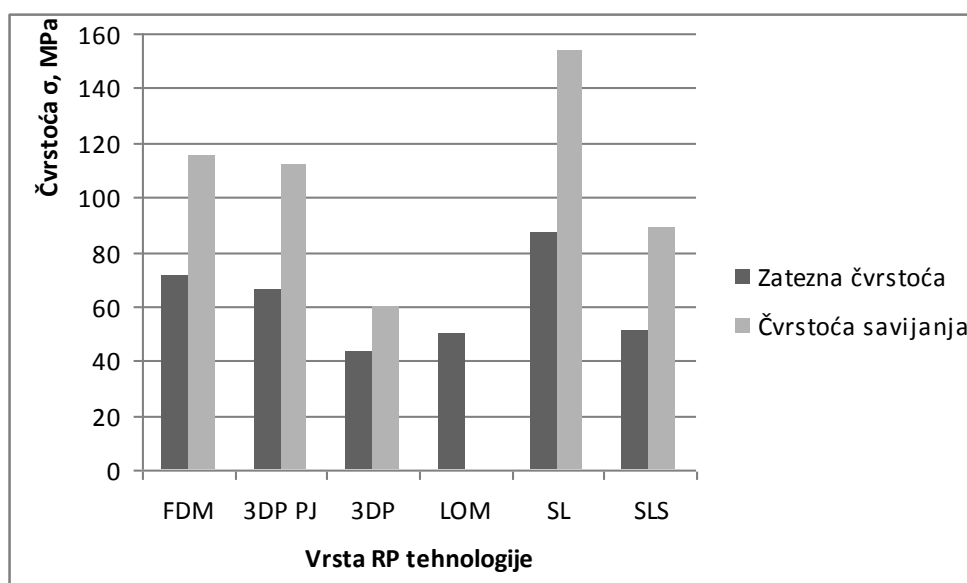


Slika 5.5 Zatezna čvrstoća metalnih materijala



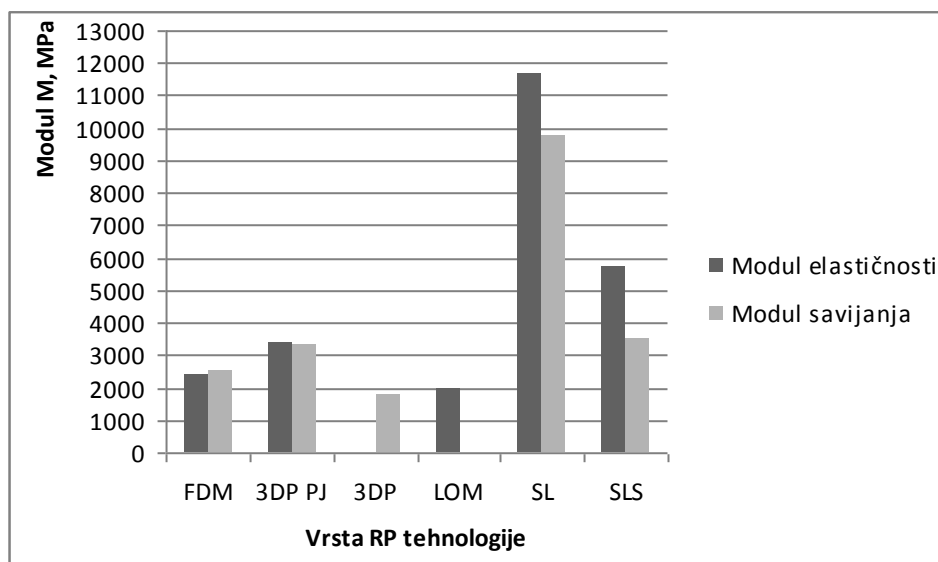
Slika 5.6 Produljenje pri lomu metalnih materijala

Slika 5.7 prikazuje maksimalne vrijednosti zatezne čvrstoće i čvrstoće savijanja polimernih materijala kod određene tehnologije.



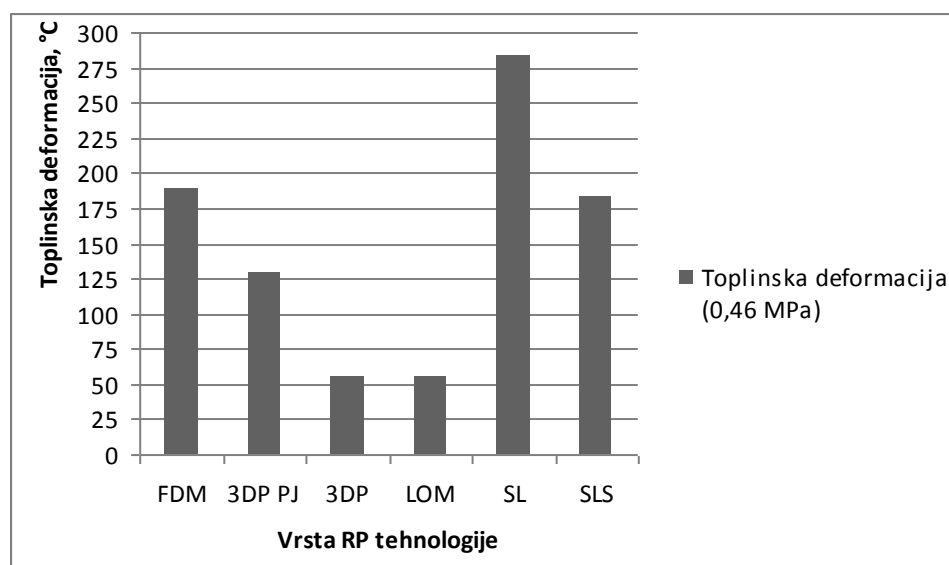
Slika 5.7 Maksimalne vrijednosti zatezne čvrstoće i čvrstoće savijanja polimernih materijala

Slika 5.8 prikazuje maksimalne vrijednosti modula elastičnosti i savijanja polimernih materijala.



Slika 5.8 Maksimalne vrijednosti modula elastičnosti i savijanja polimernih materijala

Slika 5.9 prikazuje maksimalne vrijednosti toplinske deformacije polimernih materijala korištenih u specifičnoj metodi.



Slika 5.9 Maksimalne vrijednosti toplinske deformacije polimernih materijala

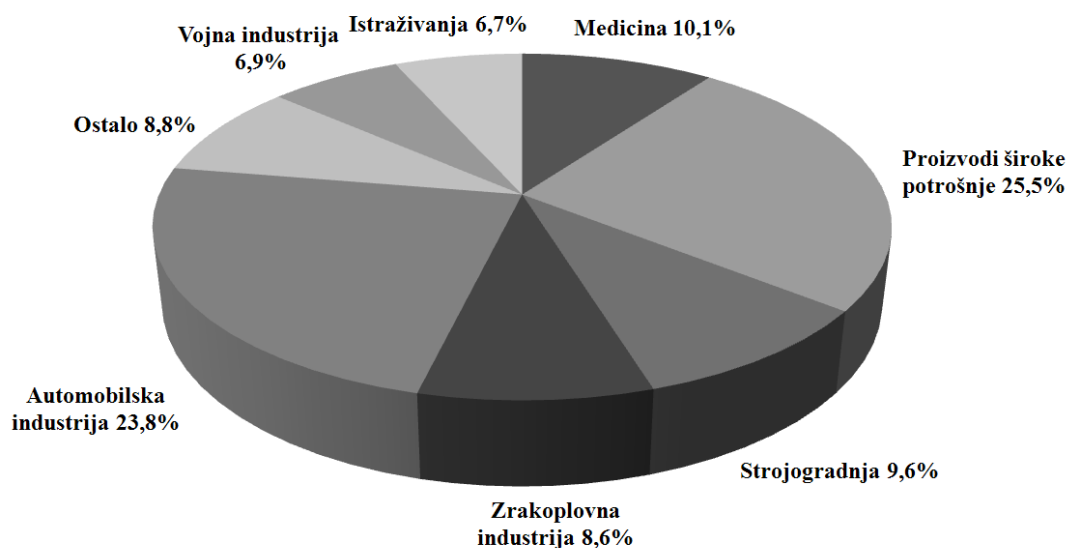


## 6 SMJERNICE ZA PRIMJENU

Integracija tehnologije brze izrade prototipa postala je prisutna u širokom području proizvodnje gdje je potrebna izrada proizvoda relativno malih dimenzija i relativno male kvantitete u kratkom vremenu. Tehnologija je primjenjiva u područjima gdje su troškovi izrade dijelova veliki. Brzom izradom prototipova aditivnim metodama povećava se sposobnost vizualizacije proizvoda u ranoj fazi razvoja dizajna i detektiranja grešaka prije same izrade proizvoda. Ti postupci omogućavaju proizvodnju tvorevina vrlo kompleksnih oblika, izravno iz računalnih podataka, pomoću automatiziranih procesa [34]. Gotovo svaki postupak proizvodnje prototipova može se rabiti za proizvodnju dijelova čija je funkcija primarno estetska [19]. Informacije o ponašanju prototipa, mogućnostima preradbe i tolerancijama dobivaju se pokusnim probama. Da bi informacije dobivene pokusnim probama bile što točnije potrebno je pažljivo odabrati tehnologiju i korištene materijale, na temelju zahtjeva područja primjene.

### 6.1 Područja primjene

Područja primjene koja najčešće koriste izradu prototipova prikazana su na slici (Slika 6.1) [35].



Slika 6.1 Područja primjene prototipova

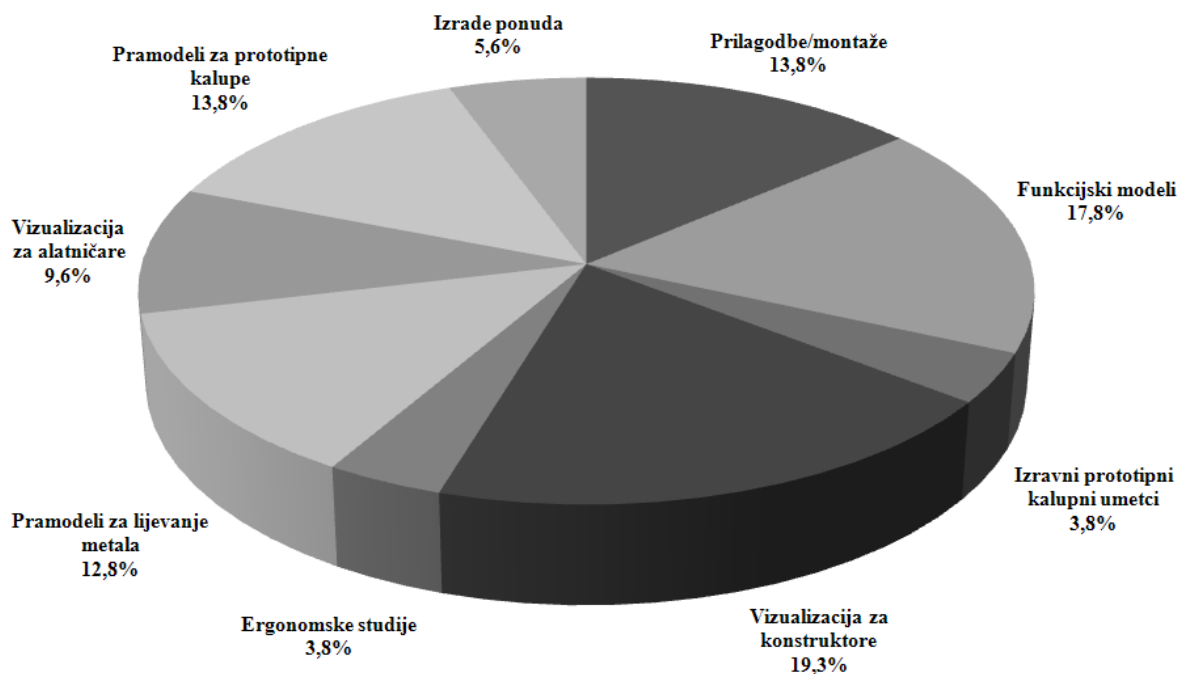
Vidljivo je kako najveći udio zauzimaju proizvodi široke potrošnje. To je grana gdje se razvijaju proizvodi poput tenisica, naočala, mobitela, opreme za ronjenje, razna kućna pomagala, slušalice itd.

Automobilska industrija koristi RP za dijelove ovjesa, mjenjačke kutije, upravljačke mehanizme, spojke, izradu kalupa za odljevke složenih oblika od titana, trkaćih automobila i bolida F1, te izradu dijelova za raritetna antikna vozila [4]. Primjerice, uređaj S-Print (ProMetal) sa komorom 1500 x 750 x 700 mm izrađen je striktno za izradu kalupa i jezgre pomoću kojih se lijeva V-8 blok motora. Uređaj je dobio i širu primjenu pa se u svijetu koristi oko 30 takvih uređaja. Pionir u upotrebi RP uređaja je Renault F1 tim. Jedna od mnogih primjena gdje se RP tehnologija koristi u F1 je izrada kanala za hlađenje, koji je dizajniran da poboljša hlađenje električnog sustava. Geometrija je takva da je kanal nemoguće proizvesti u jednom komadu, a kompleksna geometrija je potrebna da bi se kanal uklopio u slobodan prostor za montažu. Kanal je izrađen od najlona, pomoću SLS tehnologije [36].

Medicina koristi brzu izradu prototipova za izradu implantata (rekonstrukcija kostiju i estetska kirurgija) i proteza, raznih alata, pomagala i uređaja, izradu elemenata za ispravljanje zuba, slušnih aparata itd.

Nakon tih grana, tehnologija brze izrade prototipova primjenjuje se još u strojogradnji, industriji zrakoplova i svemirskog programa (izrada dijelova space shuttle-a i svemirskih postaja, borbenih i civilnih zrakoplova), vojnoj industriji, izradi uredske opreme itd. U zrakoplovnim industrijama trenutno se radi na kvalifikaciji RP tehnologije kako bi se izradila specifikacija koja garantira određenu kvalitetu. RP je u zrakoplovnoj industriji i industriji svemirskog programa korisna iz slijedećih razloga: male serije, iteracija dizajna, kompleksna geometrija, testiranje novih materijala. Tehnike koje su primjenjive u ovom području su SLS, SL i FDM [36].

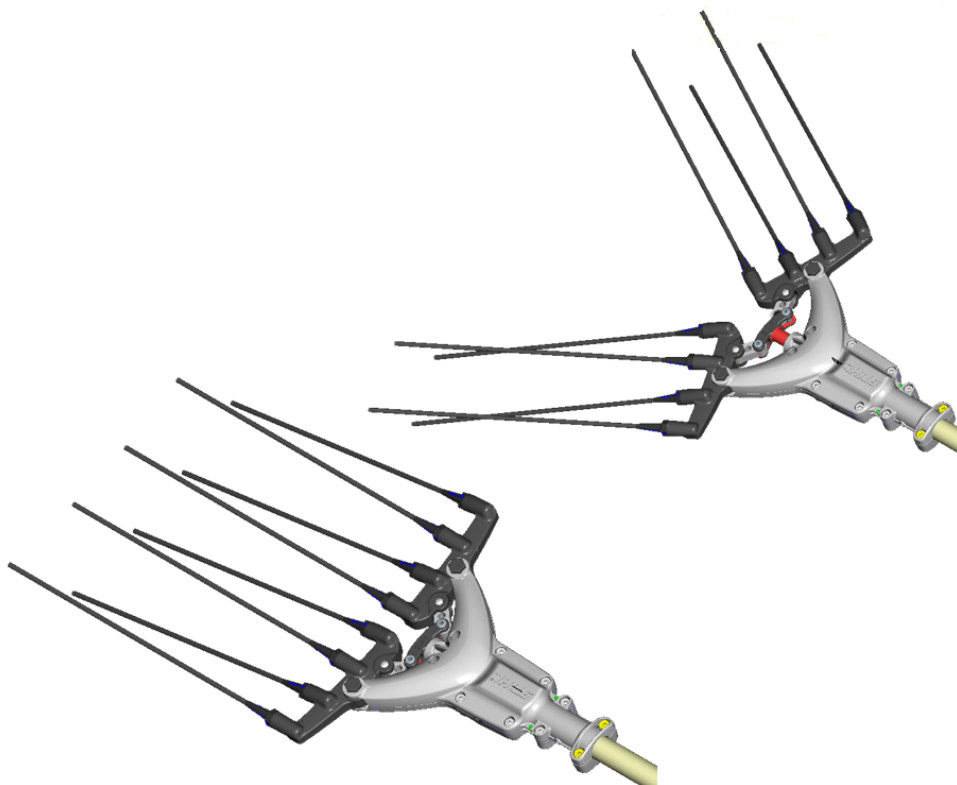
Prema slici (Slika 6.2), RP se najviše koristi za vizualizaciju, izradu funkcionalnih modela, pramodela za lijevanje i pramodela za prototipove, prilagodbe i provjeru montaže.



Slika 6.2 Raščlamba primjene prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina

## 6.2 Primjer iz prakse

Jedan od bližih primjera iz prakse upotrebe RP tehnologije dolazi iz Zagreba. Radi se o razvijanju i usavršavanju proizvoda tresalice maslina (Slika 6.3). Tvrtka KLEX d.o.o. uz pomoć inženjera iz njemačke korporacije STIHL razvila je i poboljšala već postojeći proizvod i izradila funkcionalni prototip pomoću uređaja EOS FORMIGA 100 (SLS).



*Slika 6.3 Tresačica maslina (STIHL)[45]*

Vrh „prsta“ štapa načinjen je od ugljičnih vlakana i ima ubrzanje  $100 \text{ g [m/s}^2\text{]}$ . Razvijeno je šest varijanti prihvata štapa, za što je trebalo šest mjeseci. Finalna verzija prihvata štapa je injekcijski prešani polimerni vijak u čiju glavu je umetnut ugljični štap, vijak čiji navoj ulazi u maticu na prstima tresačice. Za taj vijak izrađen je i kalup za injekcijsko prešanje. Nakon nekoliko krugova testiranja i dorade, razvijen je prototip. U ovoj fazi riješeni su zahtjevi funkcionalnosti, troškova proizvodnje i dizajna. Slijedi serijska proizvodnja te ispitivanja sklapanja u uvodnoj seriji i rasipanja kvalitete. Kako je tresačica preširoko razbacivala masline, bila je potrebna iteracija poboljšanja proizvoda. U tu iteraciju uložena su tri dana konstruiranja i dva dana rada SLS uređaja [37].

## 7 ZAKLJUČAK

Tehnologija brze izrade prototipova razvija se posljednjih 25 godina i još uvijek je relativno nepoznata. Iako omogućava brz, ekonomičan i kvalitetan proces izrade prototipa, alata i proizvoda tehnologija se sporo probija u industriji zbog nekoliko razloga: nedostatka informacija i standardizacije, troškova investiranja, ograničene dimenzije radnog volumena i ograničen broj ponuđenih materijala. U bližoj budućnosti ti nedostaci će vjerojatno biti djelomično ili potpuno uklonjeni čime će tehnologija biti spremna da ispuni sve zahtjeve koje postavlja industrija u različitim granama proizvodnje. Upotrebom bržih računala, poboljšanjem sustava kontrole i uvođenjem novih materijala, AM tehnologija trebala bi postati brža, preciznija i ekonomičnija. Treba naglasiti potrebu za edukacijom i stvaranjem referentne baze znanja sa najnovijim informacijama i podacima čime se dobiva na većem broju korisnika, a samim time i na bržem razvoju AM tehnologija i smanjenju troškova implementacije.

## 8 LITERATURA

- [1] Jurković, Milan; Mahmić, Mehmed; Jurković, Zoran: *Evolution and application of rapid prototyping technologies*, Journal for Technology of Plastic, Vol. 30, 2005, Number 1-2, str. 95-108
- [2] Cooper G. Kenneth: *Rapid Prototyping Technology*, New York, Marcel Dekker, Inc., 2001, str. 220
- [3] Dr Feng Wei, Department of Mechanical & Production Engineering, National University of Singapore: *The STL Library*. URL: [http://www.eng.nus.edu.sg/LCEL/RP/u21/wwwroot/stl\\_library.htm](http://www.eng.nus.edu.sg/LCEL/RP/u21/wwwroot/stl_library.htm), (19. srpnja 2011.)
- [4] Filetin, Tomislav; Kramer, Ivan: *Brza izrada prototipova*, Gradimo, 1, 2007. URL: <http://www.gradimo.hr/clanak/brza-izrada-prototipova/15509>, (19. srpnja 2011.), str 102-107
- [5] Paramount Industries, Inc., Langhorne, SAD: *Stereolithography (STL) Rapid Prototypes*. URL: <http://www.paramountind.com/stereolithography.html>, (19. srpnja 2011.)
- [6] envisionTEC, Gladbeck, Germany: *PerfactoryXtreme® and PerfactoryXede®*. URL: [http://www.envisiontec.de/fileadmin/pdf/MachSheet\\_Xede\\_and\\_Xtreme\\_en.pdf](http://www.envisiontec.de/fileadmin/pdf/MachSheet_Xede_and_Xtreme_en.pdf), (20. srpnja 2011.)
- [7] ProtoCAM, Northampton, SAD: *Stereolithography Prototype, SLA Prototyping*. URL: <http://www.protocam.com/html/slapro.html#tolerances>, (20. srpnja 2011.)
- [8] 3D Systems Corporation, Rock Hill, SAD: *Accura® Stereolithography (SLA) Materials*. URL: <http://production3dprinters.com/materials/sla>, (20. srpnja 2011.)
- [9] Crane B. Nathan: *Strengthening porous metal skeletons by metal deposition from a nanoparticle dispersion*, Dept. of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2005. URL: <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/32385/61660437.pdf?sequence=1>, (21. srpnja 2011.)
- [10] 3D Systems Corporation, Rock Hill, SAD: *ProductionDuraForm® Laser Sintering (SLS) Materials*. URL: <http://production3dprinters.com/materials/sls>, (21. srpnja 2011.)
- [11] Electro Optical Systems, Krailling / Munich, Germany: *Metal materials*. URL: <http://www.eos.info/en/products/materials/materials-for-metal-systems.html>, (22. srpnja 2011.)
- [12] Grujović, N.; Milivojević, N.; Milivojević, V.; Dimitrijević, V.; Grujović, Đ.: *Iskustva u brzom izradi prototipova tehnologijom 3D štampe*, 31. savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije i Crne Gore sa međunarodnim učesćem, Mašinski fakultet Kragujevac, 19-21.09. 2006., B15, str. 437-442
- [13] Z Corporation, Burlington, SAD: *3D Printers*. URL: <http://www.zcorp.com/en/Products/3D-Printers/spage.aspx>, (22. srpnja 2011.)
- [14] voxeljet technology GmbH, Friedberg; Germany: *Voxeljet 3D-printers*. URL: <http://www.voxeljet.de/en/systems/overview/voxeljet-3d-printer/>, (22. srpnja 2011.)
- [15] Wohlers, Terry: *Additive Manufacturing 101: Part III*, Time Compression, 4/20/2010. URL: <http://www.timecompression.com/articles/additive-manufacturing-101-part-iii>, (24. srpnja 2011.)
- [16] CustomPartNet, Olney, SAD: *Jetted Photopolymer*. URL: <http://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>, (25. srpnja 2011.)
- [17] Objet Geometries Inc., Billerica, SAD: *PolyJet Matrix™ 3D Printing Technology*. URL: [http://www.objet.com/PRODUCTS/PolyJet\\_Matrix\\_Technology/](http://www.objet.com/PRODUCTS/PolyJet_Matrix_Technology/), (27. srpnja 2011.)

- [18] OBJET, *Objet Materials*. URL: <http://www.objet.com/3D-Printing-Materials/>, (28. srpnja 2011. )
- [19] Godec, Damir; Šercer, Mladen: *Brza proizvodnja kalupa*, Polimeri, Vol 28/2007, 2007, str. 32-39
- [20] The Ex One Company, Irwin, SAD: *Materials*. URL: [http://www.exone.com/eng/technology/x1-prometal/materials\\_prometal.html](http://www.exone.com/eng/technology/x1-prometal/materials_prometal.html), (30. srpnja 2011. )
- [21] Wohlers Terry: *Wohlers Report 2010 – Additive Manufacturing State of Industry, Annual Worldwide Progress Report, 2010*
- [22] *FDM Tutorial 3.0*. URL: <http://www.stanford.edu/group/prl/documents/html/fdm.htm>, (01. kolovoza 2011. )
- [23] Grimm, Todd: *Fused Deposition Modelling: A Technology Evaluation, Time Compression*, Vol 11/2003, str. 2-6. URL: <http://www.laserlines.co.uk/images/m2/pdfs/WPGrimm.pdf>, (02. kolovoza 2011. )
- [24] Stratasys, Eden Prairie, SAD: *3D Production Systems*. URL: <http://www.fortus.com/Products.aspx>, (03. kolovoza 2011. )
- [25] Dimension, Inc, Eden Prairie, SAD: *Compare Dimension 3D Systems*. URL: [http://www.dimensionprinting.com/3d-printers/3d-printing-comparison\\_chart.aspx](http://www.dimensionprinting.com/3d-printers/3d-printing-comparison_chart.aspx), (03. kolovoza 2011. )
- [26] Krunic, Siniša; Perinic, Mladen; Maricic, Sven: *Načini brze izrade predserijskih proizvoda*, Engineering Review, Vol 30/2010, str. 91-100
- [27] Solido 3D, SAD: *SD 300Pro*. URL: <http://www.solido3d.com/AdminLockedFiles/File115604.pdf>, (05. kolovoza 2011. )
- [28] Mcor Technologies, Ardee, Ireland: *Matrix 300*. URL: <http://www.mcor technologies.com/products>, (05. kolovoza 2011. )
- [29] CAM-LEM, Inc., Cleveland, SAD: *The CAM-LEM Process*, 2005. URL: <http://www.camlem.com/camlemprocess.html>, (05 kolovoza 2011. )
- [30] OPTOMECH, Albuquerque, SAD: *Metal Components*. URL: <http://www.optomech.com/Additive-Manufacturing-Downloads/Metal-Components>, (08. kolovoza 2011. )
- [31] Frank, Matthew; Joshi B. Sanjay, Drs.; Wysk A. Richard: *Rapid prototyping as an integrated product/process development tool an overview of issues and economics*, Journal of Chinese Institute of Industrial Engineers, Vol 20/2003, str. 240-245. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.111.93&rep=rep1&type=pdf>, (10. kolovoza 2011. )
- [32] Williams, Christopher Bryant: *Design and development of layer-based additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructure*, Georgia Institute of Technology, 2008, str. 307-314. URL: [http://smartechnology.gatech.edu/bitstream/handle/1853/22687/Williams\\_Christopher\\_B\\_200804\\_phd.pdf?sequence=1](http://smartechnology.gatech.edu/bitstream/handle/1853/22687/Williams_Christopher_B_200804_phd.pdf?sequence=1), (11. kolovoza 2011. )
- [33] Lin, Feng; Sun, Wei; Yan, Yongnian: *Optimization with minimum process error for layered manufacturing fabrication*, Rapid prototyping journal, Vol 7/2001, str. 74-80. URL: <http://www.pages.drexel.edu/~sunwei/WSUN-Papers/J-RPJ-2001-P2.pdf>, (12. kolovoza 2011. )
- [34] Gebhardt, Andreas: *Rapid prototyping*, München, Carl Hanser Verlag, 2003

- [35] Klocke, F.; Freyer, C.: *Rapid Prototyping and Rapid Tooling*, Fraunhofer Institute of production Technology IPT, 2002.
- [36] Fox, Brad: *Rapid manufacture in the aeronautical industry*, Rapid manufacturing An industrial revolution for the digital age, 2006, 14, str. 225-231
- [37] Škevin, Igor: *Konstruktori s perspektivom*, IRT3000, Vol 13/2010, str. 20-25. URL: <http://issuu.com/irt3000/docs/irt3000-hr-13-dec10?viewMode=magazine&mode=embed>, (5. rujna 2011. )
- [38] NewFreeDownloads, Slika 2.1), URL: <http://www.newfreedownloads.com/imgs/15574-w520.jpg>, (1. rujna 2011. )
- [39] CustomPartNet , Olney, SAD: (Slika 3.1), <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/sla.png>, (1. rujna 2011. )
- [40] Le-homecinema: (Slika 3.2), <http://www.le-homecinema.com/lexique/lexique9.html>, (5. rujna 2011. )
- [41] CustomPartNet , Olney, SAD: (Slika 3.5), <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/3dp.png>, (2. rujna 2011. )
- [42] CustomPartNet , Olney, SAD: (Slika 3.6), <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/jetted-photopolymer.png>, (3. rujna 2011. )
- [43] CustomPartNet , Olney, SAD: (Slika 3.9), <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>, (2. rujna 2011. )
- [44] CustomPartNet , Olney, SAD: (Slika 3.10), <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/lom.png>, (9. rujna 2011. )
- [45] Slika 6.3, ustupila tvrtka KLEX d.o.o.
- [46] Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H., Barlow, J.: *Direct selective laser sintering of metals*, Rapid Prototyping Journal, 1 (1995) 1, str. 26-36