

UVOD

Aditivne tehnologije (*Additive Technologies*) predstavljaju postupke spajanja materijala sa ciljem formiranja radnog predmeta na osnovu digitalnog 3D modela, najčešće sloj po sloj. S početka korišćene samo za brzu izradu prototipova (*Rapid Prototyping*), sa razvojem tehnologije i materijala, tehnologije za aditivnu proizvodnju su evoluirale do stepena koji omogućava izradu završnih, funkcionalnih proizvoda (*Additive Manufacturing*) ili finalnih alata (*Rapid Tooling*).

Inicijalno su tehnologije za AM razvijene kako bi se ubrzao razvoj proizvoda, a troškovi razvoja sveli na minimum. Zahtevi koji se postavljaju pred savremene postupke razvoja proizvoda mogu se kratko sažeti na sledeći način: kvalitetan proizvod potrebno je u što kraćem vremenu, uz minimalne troškove dovesti do nivoa serijske proizvodnje. Vek trajanja jednog proizvoda drastično je skraćen što iziskuje skraćanje vremena potrebnog za njegov razvoj. U takvim uslovima pojava tehnologija za AM predstavlja sasvim novu i veoma efikasnu mogućnost da se vreme razvoja proizvoda drastično skрати. Takođe, sagledavanje grešaka na proizvodu, pre izrade seta alata i pribora, a samim tim i izbegavanje bespotrebnih troškova jedna je od mogućnosti koju ove tehnologije pružaju.

Zbog specifičnih zahteva tržišta, odnosno sve veće potrebe za izradom pojedinačnih, prilagođenih proizvoda, danas se ove tehnologije sve više primenjuju kako u izradi alata za proizvodnju (alati za brizganje plastike, alati za deformisanje, kalupi za livenje, itd.) tako i za izradu završnih proizvoda, najčešće u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji. Glavne prednosti AM u odnosu na konvencionalne načine proizvodnje čine univerzalnost, tj. za izradu modela različitih geometrijskih oblika nije neophodna posebna priprema uređaja i opreme, mogućnost je izradite gotovih sklopova, minimalan gubitak materijala, mogućnost kombinovanja više materijala i dr. Takođe, u zavisnosti od uređaja i vrste procesa, moguće je izrađivati više različitih delova istovremeno. Glavni nedostaci tehnologija za AM su dugotrajno vreme izrade, ograničen izbor materijala i cena izrađenih delova.

S tim u vezi, najčešće je neophodno zadovoljiti zahteve za određenim mehaničkim karakteristikama delova koji su proizvedeni primenom aditivnim tehnologijama. U zavisnosti od vrste korišćene tehnologije, povišene mehaničke osobine se mogu dobiti korišćenjem

odgovarajućeg osnovnog materijala, optimizacijom tehnoloških parametara procesa ili optimizacijom postprocesiranja (infiltracija, termičko procesiranje, itd).

S obzirom na svoju fleksibilnost i kvalitet izrađenih delova, tehnologije za AM su našle široku primenu u svim granama industrije, obrazovanju, medicini, arhitekturi itd. Mogu se koristiti od izrade najkompleksnijih i veoma odgovornih delova npr. u avioindustriji pa do izrade pokaznih modela koji se koriste u obrazovanju.

1. ADITIVNE TEHNOLOGIJE

1.1. Podela aditivnih tehnologija

Tehnologije za aditivnu proizvodnju su komercijalno prvi put primenjene 1987. godine od strane proizvođača *3D Systems*. Kompanija je proizvela i komercijalizovala prvi stereolitografski uređaj u kome tečni polimer nanesen u tankom sloju očvršćava pomoću UV lasera. Nakon toga počeo je i razvoj ostalih postupaka; vezivna 3D štampa 1989. (*MIT*), deponovanje istopljenog filameta 1991. (*Stratasys*), laminacija folija 1991. (*Helisys*), selektivno lasersko sinterovanje 1992. (*DTM*), a nakon toga dolazi do razvoja i ostalih tehnologija i materijala.

Osim pomenutih tehnologija do danas je razvijen veliki broj postupaka koji se po određenim karakteristikama mogu svrstati u zajedničke grupe. Radi uvođenja sistematizacije, standardi ISO i ASTM su klasifikovali ove mnogobrojne procese u sedam osnovnih grupa:

- i.* Fotopolimerizacija u kadi (*Vat photopolymerization*),
- ii.* Fuzija praškastog supstrata (*Bed powder fusion*),
- iii.* Laminacija folija (*Sheet lamination*),
- iv.* Vezivna 3D štampa (*Binder jetting*),
- v.* Ekstrudiranje materijala (*Material extrusion*),
- vi.* Direktna 3D štampa (*Material jetting*) i
- vii.* Nanošenje materijala primenom usmerene energije (*Direct energy deposition*).

Detaljniji prikaz svake grupe postupaka sa načinom generisanja konture (sloja) i komercijalnim nazivima tehnologija prikazan je u tabeli 1.1.

Fundamentalna razlika, na osnovu koje je i izvršena podela između navedenih AM sistema jeste u načinu generisanja konture, odnosno sloja. Ova razlika je direktna posledica vrste osnovnog materijala koji se koristi u procesu. Pre uvođenja standardizacije u AM podela sistema je vršena na osnovu vrste osnovnog materijala, pa su shodno tome sistemi prema 1deljeni na sisteme kod kojih je osnovni materijal:

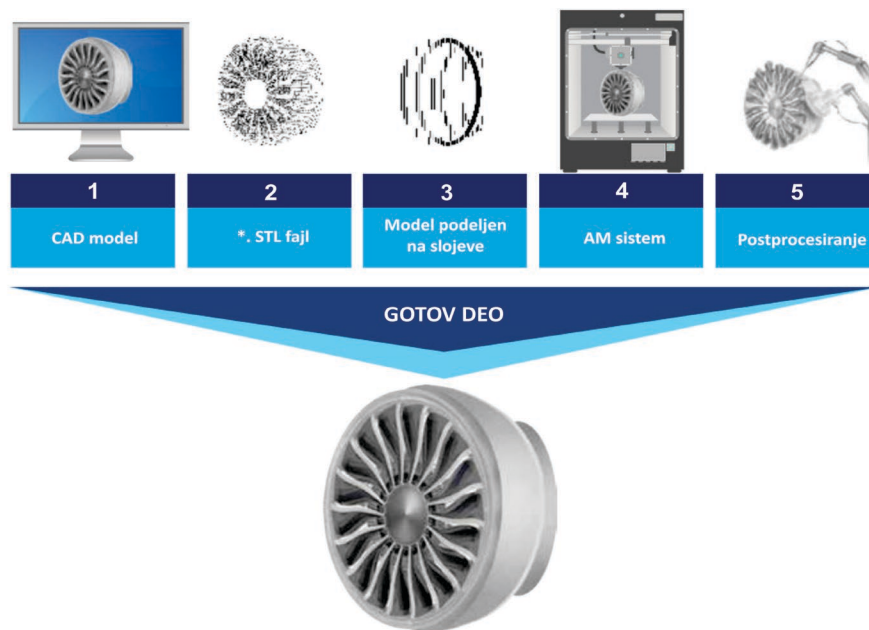
1. fluid u tečnom stanju (tečni fotopolimer),
2. u praškastom stanju,
3. čvrstom stanju (folije).

Tabela 1.1 Sistematizacija AT postupaka na osnovu ISO/ASTM standarda

Grupa	Način generisanja konture	Komercijalni naziv tehnologije	Skr.
Fotopolimerizacija u kadi	Laser, projektor, printerska glava	Stereolitografija	(SLA)
Fuzija praškastog supstrata	Laser, mlaz elektrona	Selektivno lasersko sinterovanje Selektivno lasersko topljenje Topljenje mlazom elektrona Direktno lasersko sinterovanje metala	(SLS) (SLM) (EBM) (DMLS)
Laminacija folija	Laser, nož	Proizvodnja laminiranih obj. Laminacija plastičnih folija	(LOM) (PSL)
Veživna 3D štampa	Printerska glava	Veživna 3D štampa	(3DP)
Ekstrudiranje materijala	Glava ekstrudera	Deponovanje istopljenog filameta	(FDM)
Direktna 3D štampa	Printerska glava i UV lampa	PolyJet, PolyJet Matrix	(PJ)
Nanošenje materijala primenom usmerene energije	Mlaz elektrona	3D lasersko oblaganje Direktno taloženje metala	(DED)

1.2. Princip, oblast primene i razvoj AM

Bez obzira kojoj grupi pripadaju, sve tehnologije za AM se mogu principijelno objasniti na isti način. Inicijalno se 3D računarski model (CAD model) izvozi u datoteku koja je čitljiva uređaju za AM, najčešće STL datoteka, ali u zavisnosti od potrebe uređaja i proizvođača postoji još čitav niz datoteka koje se mogu koristiti kao npr. *.WRL, *.WRML, *.3DS, *.OBJ itd. Nakon uvoza datoteke u upravljački softver vrši se njegova podela na slojeve po zadatim parametrima (generisanje putanja očvršćavanja) i podešavanje uređaja. Model se zatim izrađuje na uređaju, a nakon završenog procesa vrši se postprocesiranje odnosno finalna obrada dela (infiltracija, uklanjanje potpora, bušenje, farbanje itd., (slika 1.1)). Kod nekih sistema za AM poslednja faza postprocesiranja nije potrebna.

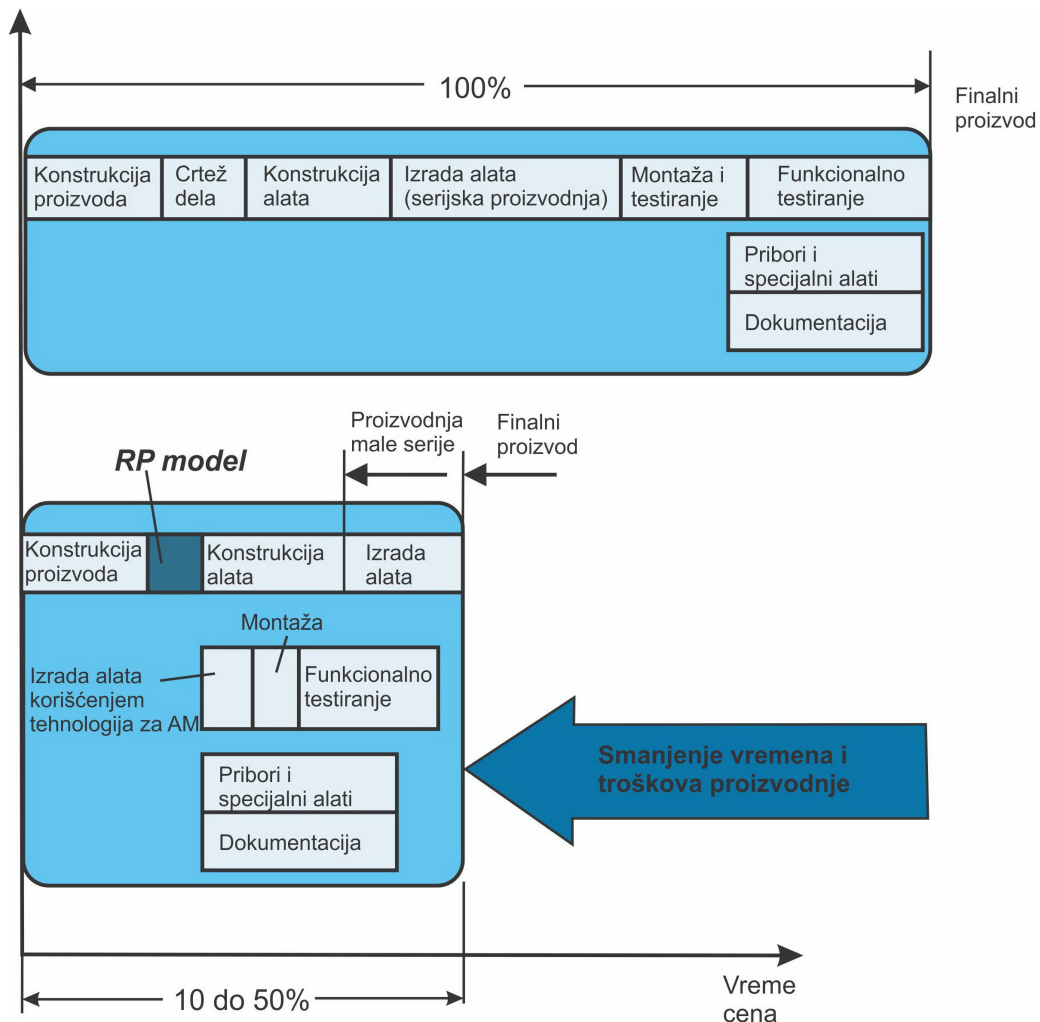


Slika 1.1 Osnovni princip tehnologija za AM

Bez obzira što su s početka tehnologije za AM korišćene samo za izradu prototipova, značajno su skraćivale vreme plasmana proizvoda na tržište, a samim tim smanjivale troškove razvoja proizvoda (slika 1.2). Kod konvencionalnog načina razvoja proizvoda nakon izrade konstrukcionog rešenja proizvoda i njegovog 3D računarskog modela vrši se konstrukcija alata, zatim izrada prve serije proizvoda, montaža i tek nakon toga funkcionalno testiranje. Ukoliko se uoče određene greške u konstrukciji vrše se korekcije, što direktno utiče na cenu, jer iziskuje i izradu novih, odnosno, u najboljem slučaju doradu postojećih alata. Tek nakon dobijanja prve serije koja ispunjava zahteve u pogledu kvaliteta započinje se serijska proizvodnja i plasman proizvoda na tržište. Pri primeni AM u procesu razvoja proizvoda, odmah nakon izrade računarskog 3D modela vrši se izrada prototipa ili serije prototipova na nekom od sistema za AM. U slučaju da postoje greške u konstrukciji, korekcije, odnosno promene u konstrukciji proizvoda se vrše pre izrade alata za serijsku odnosno masovnu proizvodnju. Nakon dobijanja prototipa koji ispunjava sve zahteve postavljene dokumentacijom vrši se izrada alata za proizvodnju. Takođe, vreme dobijanja prvog prototipa ili serije prototipova korišćenjem tehnologije za AM značajno je kraće od dobijanja prve serije proizvoda konvencionalnim načinom, jer nije potrebno vršiti nikakvu posebnu pripremu uređaja dok je za proizvodnju alata potrebno određeno vreme koje može biti značajno. Ovakvim pristupom razvoja proizvoda može se postići ušteda u vremenu i ukupnim troškovima razvoja proizvoda od 10 do 50% .

Sa razvojem novih tehnologija za AM, izrada gotovih, funkcionalnih delova i sklopova spremnih za ugradnju u složene sisteme postala je imperativ. Kako bi se obezbedile mehaničke karakteristike delova izrađenih tehnologijama za AM koje su identične ili vrlo bliske delovima izrađenim konvencionalnim metodama, poslednjih godina istraživanja u okviru univerziteta i proizvođača uređaja za AM bazirana su na razvoju novih i poboljšanju postojećih materijala. Najčešće korišćeni materijali u AM sistemima su materijali na bazi polimera (plastični materijali), ali se poslednjih godina sve veći akcenat stavlja na metalne materijale, keramike i kompozite. Kao

polimerni materijali najčešće se koriste fotoosetljive polimerne smole, zatim ABS, PLA, PMMA, PP, PVC, kao i polimeri ojačani staklom, keramikom itd. Od metalnih materijala koriste se kako čisti metalni prahovi tako i legure, a najčešće nerđajući čelici, legure aluminijuma, hroma, kobalta, nikla, itd. Osim pomenutih materijala mogu se upotrebljavati i razne vrste keramičkih prahova na bazi cinka ili aluminijuma, zatim prahovi na bazi gipsa, celuloze, razne vrste peščanih prahova, biokompatibilni prahovi itd.

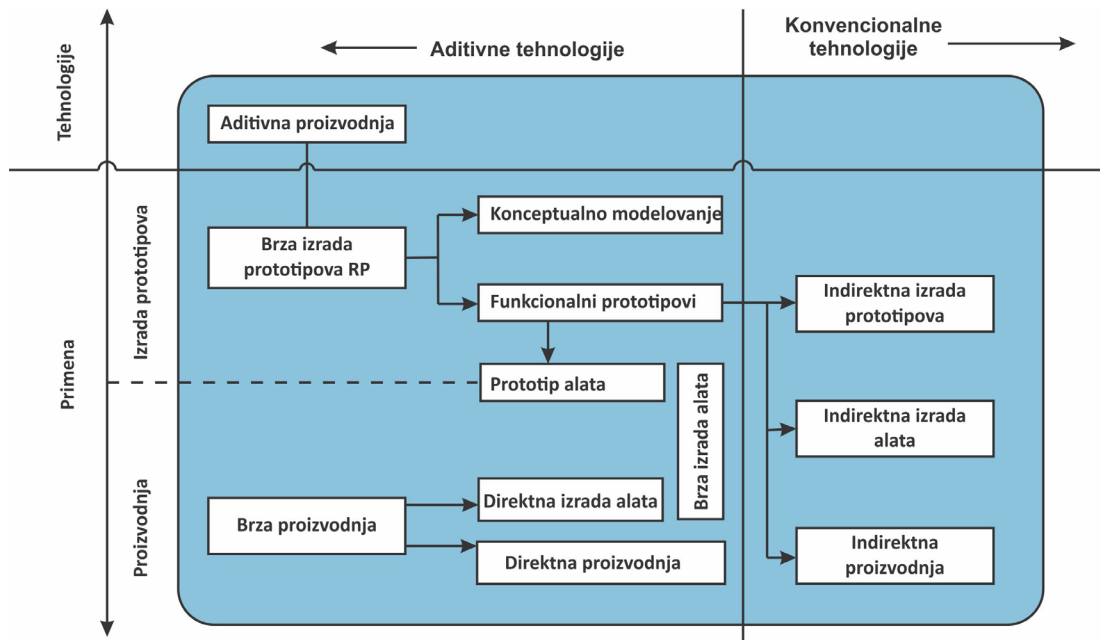


Slika 1.2 Smanjenje vremena i troškova proizvodnje delova korišćenjem tehnologija za AM

S obzirom na spomenuti, vrlo brzi razvoj materijala, tehnologije za AM se sve više koriste pri izradi pojedinačnih delova ili malih serija proizvoda. Na slici 1.3 šematski je prikazan način proizvodnje gotovih delova korišćenjem AM u sprezi sa konvencionalnom proizvodnjom ili samostalno kroz dva nivoa korišćenja:

- I Izradu prototipova koji se koriste u kombinaciji sa konvencionalnom proizvodnjom, gde se proizvode funkcionalni prototipovi na osnovu kojih se konvencionalnim tehnologijama proizvode alati;
- II Izradu gotovih proizvoda gde se tehnologije za AM koriste samostalno za njihovu izradu. U ovom slučaju moguća su dva stepena primene. U prvom se primenom tehnologija za

AM proizvode alati koji se koriste za izradu finalnog proizvoda u velikim serijama ili u drugom slučaju gde se tehnologije za AM koriste za proizvodnju finalnih proizvoda. Drugi slučaj se koristi samo pri pojedinačnoj proizvodnji ili izradi malih serija, što će u nastavku biti detaljnije objašnjeno.



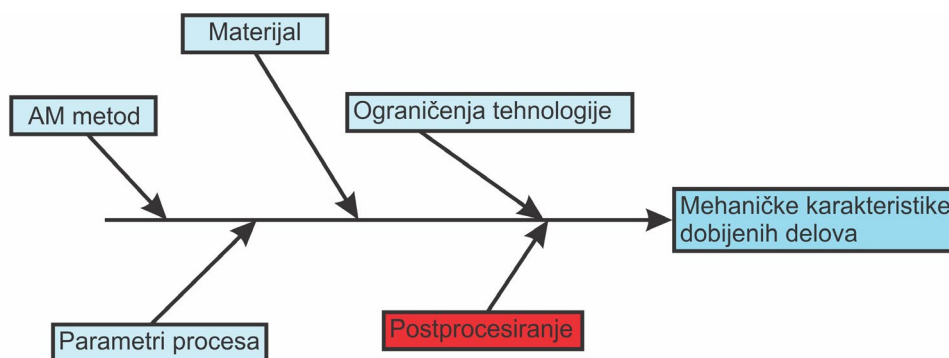
Slika 1.3 Nivoi korišćenja AM

S obzirom na stepen kompleksnosti koje su mašine za konvencionalnu obradu dostigle, logičan sledeći korak jeste kombinacija tehnologija za AM i konvencionalnih tehnologija u jednoj mašini. Kao jedan od primera na slici 1.4 prikazana je mašina proizvođača *DMG MORI*, koja predstavlja kombinaciju tehnologije nanošenja materijala primenom usmerene energije (laserom) i konvencionalne mašinske obrade glodanjem. Prednost ovog načina proizvodnje ogleda se u tome što se deo nakon završenog AM procesa ne premešta na drugu mašinu nego se obrada nastavlja na istoj, što za prednost ima uštedu vremena i povećanje tačnosti.



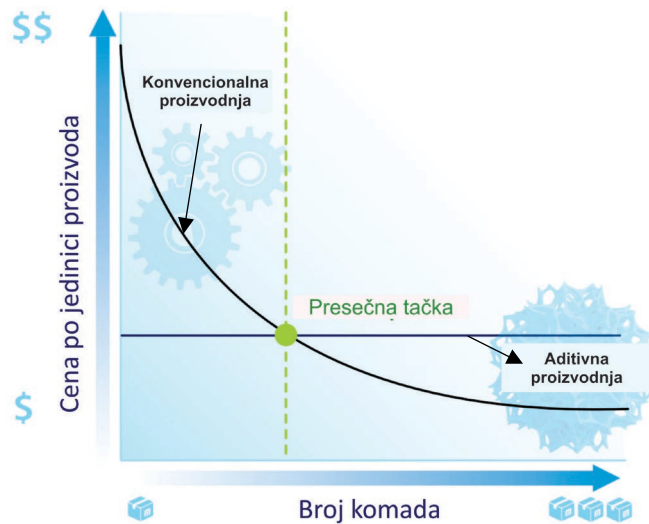
Slika 1.4 AM u kombinaciji sa konvencionalnom obradom

Delovi dobijeni tehnologijama za AM mogu imati različite mehaničke karakteristike u zavisnosti od namene. Kako bi se dobile odgovarajuće karakteristike potrebno je poznavati uticajne parametre, odnosno faktore. Svaki od faktora, kao i svaka promena unutar bilo faktora, utiče na mehaničke karakteristike gotovog dela što se može najsvetlije prikazati dijagramom uzrok – posledica (slika 1.5). Odgovarajućim izborom AM sistema, parametara procesa, materijala i parametara postprocesiranja, a pri tome vodeći računa o ograničenjima tehnologije za AM, mogu se projektovati željene mehaničke karakteristike delova.



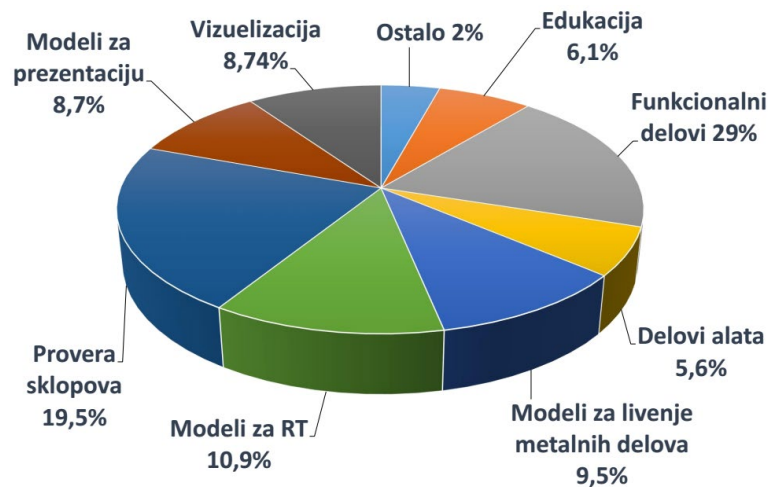
Slika 1.5 Uticajni faktori na mehaničke karakteristike delova dobijenih tehnologijama za AM

Bez obzira što ne zahteva posebnu pripremu uređaja i izradu posebnih alata, zbog cene potrošnog materijala, brzine izrade i utroška energije, tehnologije za AM su ograničene u pogledu veličine serije proizvedenih delova pri kojoj je rentabilno koristiti ovaj vid proizvodnje. Na slici 1.6 je prikazan odnos cene po jedinici proizvoda u zavisnosti od broja komada kod konvencionalne proizvodnje i proizvodnje korišćenjem tehnologija za AM. Primenom tehnologija za AM cena po jedinici proizvoda ostaje konstantna bez obzira na veličinu serije, odnosno ukupnu zapreminu delova, dok kod konvencionalne proizvodnje postoji značajan pad cene sa količinom proizvedenih jedinica proizvoda, naročito u slučaju velikoserijske i masovne proizvodnje. U cilju izbacivanja što jeftinijeg proizvoda na tržište bitno je poznavati presečnu tačku ove dve krive koja predstavlja broj komada nakon kojeg više nije rentabilno koristiti tehnologije za AM, već se prelazi na konvencionalnu proizvodnju.



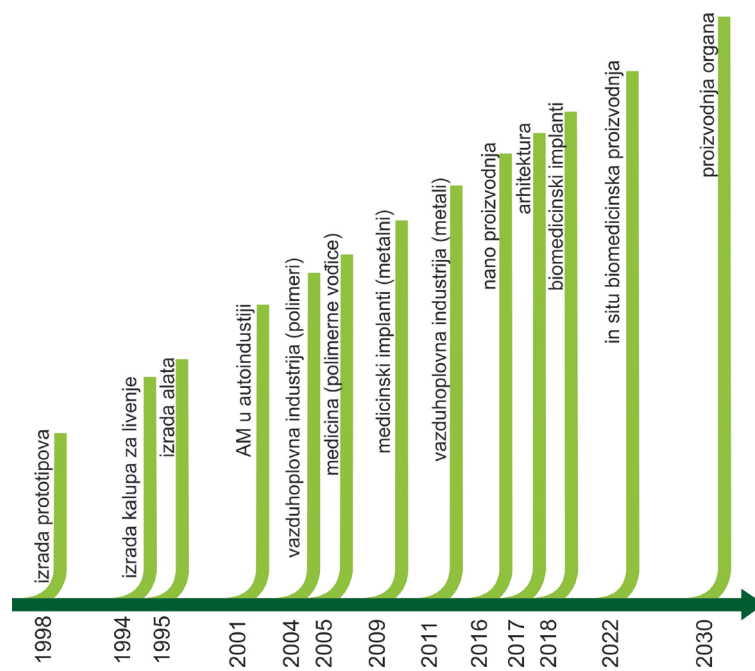
Slika 1.6 Isplativost aditivne u odnosu na konvencionalnu proizvodnju

S obzirom na brzi razvoj uređaja za AM, oblast primene značajno se proširivala od nastanka do danas. Prema godišnjem izveštaju Wholers raport tehnologije za AM se najviše koriste u oblasti robe široke potrošnje (elektronike), zatim u industriji motornih vozila, medicini/stomatologiji, mašingradnji, avio industriji, arhitekturi itd. Primena proizvedenih delova, prema istom izvoru, prikazana je na slici 1.7.



Slika 1.7 Primena delova dobijenih tehnologijama za AM

Tokom svog razvoja, tehnologije za AM su u vrlo kratkom period prešle put od izrade prototipova (1998. god.) do izrade gotovih delova spremnih za ugradnju u složene sklopove (2004. godine), što je prikazano na slici 1.8. Međutim, razvoj tehnologija za AM se nije zaustavio, već je sa razvojem materijala (metalni, biokompatibilni itd.) i gabarita uređaja proširena oblast primene na medicinu i nanotehnologije, a procena je da će ove tehnologijame do 2030. godine omogućiti proizvodnju organa čime bi bila zamenjena klasična donorska transplantacija.



Slika 1.8 Razvoj tehnologija za AM

Kao literatura za ovo poglavlje korišćena su poglavlja iz:

1. Doktorska disertacija: Optimizacija parametara postprocesiranja u tehnologiji vezivne 3D štampe, Dejan Movrin, Novi Sad, 2017.
2. Knjiga: Understanding Additive Manufacturing, Andreas Gebhardt, Munich, 2011.
3. Knjiga: Additive Manufacturing Technologies, I. Gibson | D. W. Rosen | B. Stucker, New York, 2010.

2. STL DATOTEKA ZA RAZMENU PODATAKA

STL format je kreiran 1987. godine, od strane firme *Albert Consulting Group*, za potrebe stereolitografskog sistema kompanije 3-D SYSTEMS (SAD). Danas ovaj format predstavlja *de-facto* standard za razmenu podataka o modelima u oblasti aditivne proizvodnje.

2.1 Uvodne napomene

Da bi model, aproksimiran mrežom ravanskih trouglova, bio čitljiv za sve tipove AM sistema (SLA, SLS, LOM, 3DP, itd.), mora biti zapisan u datoteku za razmenu, u skladu sa tačno definisanom strukturom i formatom.

STL datoteka može biti zapisana u dva formata:

- ASCII;
- Binarnom.

Kada je zapisana u ASCII formatu, STL datoteka je čitljiva, tj. razumljiva za korisnika. Binarni zapis je znatno kompaktniji u odnosu na ASCII format (datoteke su znatno manje), međutim, ovaj format nije razumljiv za samog korisnika.

2.1.1 Pravila o triangulaciji i orijentaciji temena trougla

Da bi STL datoteka, koja je generisana na osnovu CAD datoteke, bila pravilno interpretirana od strane AM sistema, neophodno je da zadovolji dva osnovna pravila:

Pravilo triangulacije (vertex-to-vertex rule);

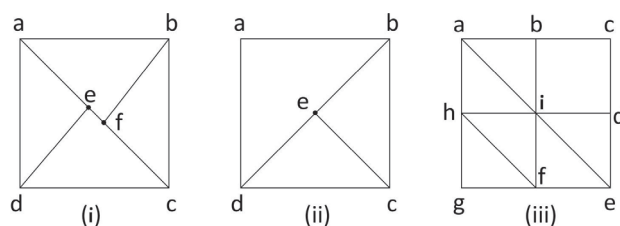
Pravilo o redosledu navođenja temena u trouglu.

Prema pravilu o triangulaciji, susedni trouglovi mogu imati samo jednu zajedničku stranicu. Drugim rečima, nije dozvoljeno da se teme jednog trougla nađe na stranici drugog trougla. Na slici 2.1 prikazano je pet karakterističnih situacija. U situaciji (i) figurišu četiri trougla: *abf*, *bcf*, *cde* i *dae*. Vidi se da stranice *ae*, *ef* i *fc* ne zadovoljavaju navedeno pravilo triangulacije,

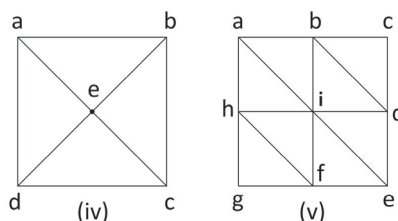
budući da se temena e i f nalaze na stranici trougla ac . Na slici (ii) se vidi da, suprotno pravilu triangulacije, stranicu bd dele tri trougla. Slika (iii) ilustruje situaciju u kojoj, kao rezultat greške u triangulaciji, stranice bc , cd , di i ib čine četvorougao.

Na slikama (iv) i (v) prikazana su dva slučaja ispravne triangulacije. U slučaju (iv), četiri trougla, abe , bce , cde i dae imaju po jednu zajedničku stranicu sa susednim trouglovima. Slika (v) zapravo predstavlja korigovanu situaciju (iii), pri čemu je sada svih osam trouglova u skladu sa pravilom triangulacije.

Prema pravilu o redosledu navođenja temena u trouglu, temena se navode u smeru **suprotnom od kazaljke na satu** (Sl. 2.2). Vidimo da su temena u trouglu, posmatrano sa **spoljašnje strane** trougla, navedena u smeru suprotnom od kazaljke na satu.

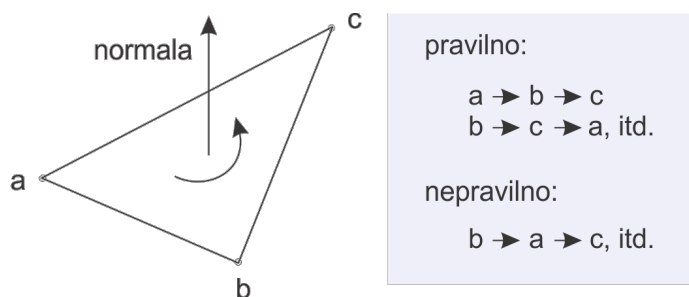


Neispravno



Ispravno

Slika 2.1 Primer nepravilne (a) i pravilne (b) triangulacije

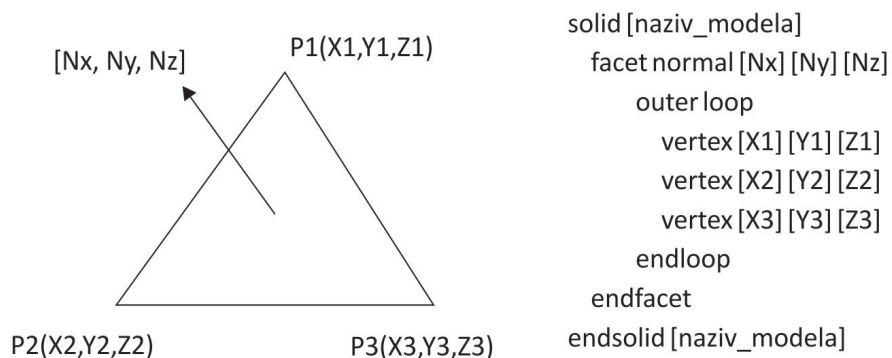


Slika 2.2 Pravilo o redosledu navođenja temena u trouglu

2.2 Struktura STL datoteke

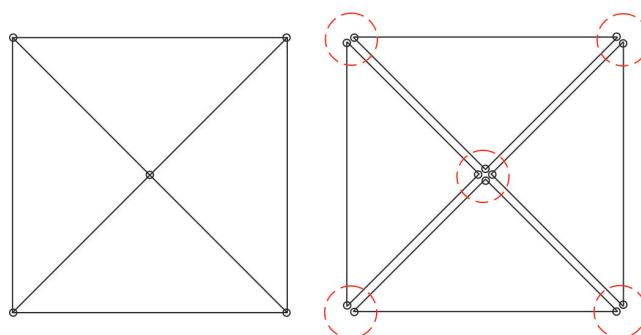
Bez obzira da li je zapisana u binarnom ili ASCII formatu, STL datoteka ima jedinstvenu strukturu. Datoteka mora započeti zaglavljem u kojem se nalazi službena reč „solid“, iza koje sledi naziv modela. Iza zaglavlja sledi lista trouglova koji ulaze u sastav površinske mreže modela.

Svaki trougao je opisan sa četiri skupa X, Y, Z koordinata, pri čemu je svaka koordinata zapisana u formatu pokretnog zareza (*floating point*), sa 8 značajnih cifara. Prvi skup koordinata predstavlja jedinični vektor normale na ravan trougla, dok preostala tri skupa koordinata opisuju položaj temena trougla. Koordinate temena trougla ugneždene su između službenih reči „outer loop“ i „endloop“ (sl. 2.3).



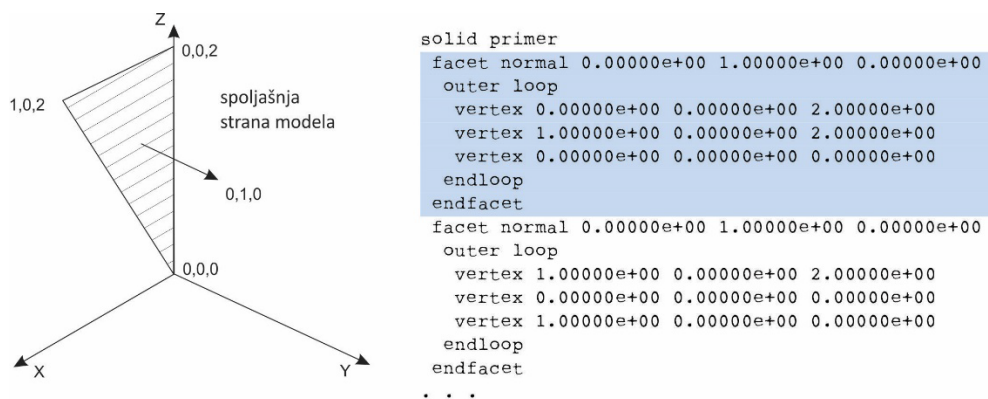
Slika 2.3 Opšti format STL datoteke

Jedan od važnijih nedostataka STL formata jeste **redundancija** (nepotrebno ponavljanje) podataka, koje se ogleda u činjenici da se jednom navedene koordinate temena trougla moraju ponavljati i u definiciji onih trouglova u čijem sastavu se takođe nalazi to teme. Na slici 2.4 je ilustrovan slučaj gde je, za slučaj četiri susedna trougla, potrebno po dva puta navesti koordinate spoljašnjih temena, dok centralno teme, koje je zajedničko za sva četiri trougla, mora biti navedeno četiri puta.



Slika 2.4 Redundantnost podataka, ilustrovana na primeru zajedničkih temena trouglova

Opšti format STL datoteke, prikazan na slici 2.3, dat je na konkretnom primeru jednog trougla, na slici 2.5. Osenčeni deo koda sadrži tačan opis prikazanog trougla – redosled navođenja koordinata temena trougla u skladu je sa orijentacijom jediničnog vektora normale, koji pada u pozitivni pravac Y ose.



Slika 2.5 Segment STL datoteke u ASCII formatu

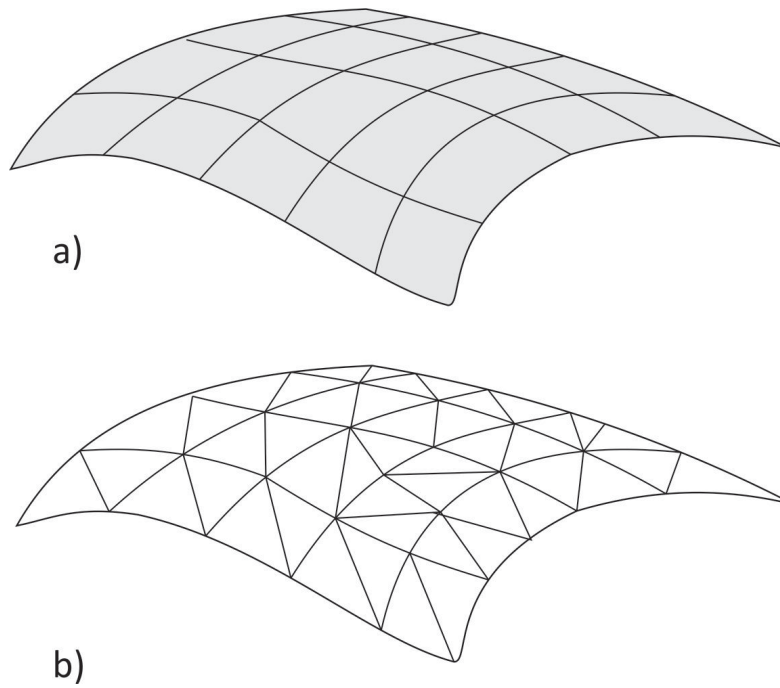
2.3 Ključne razlike između reprezentovanja 3D modela u STL i CAD formatu

Kao jedan od mogućih načina za reprezentovanje geometrijskih podataka o 3D modelu, STL se razlikuje od standardnog formata koji koriste savremeni CAD sistemi. Kao dve ključne razlike mogu se izdvojiti:

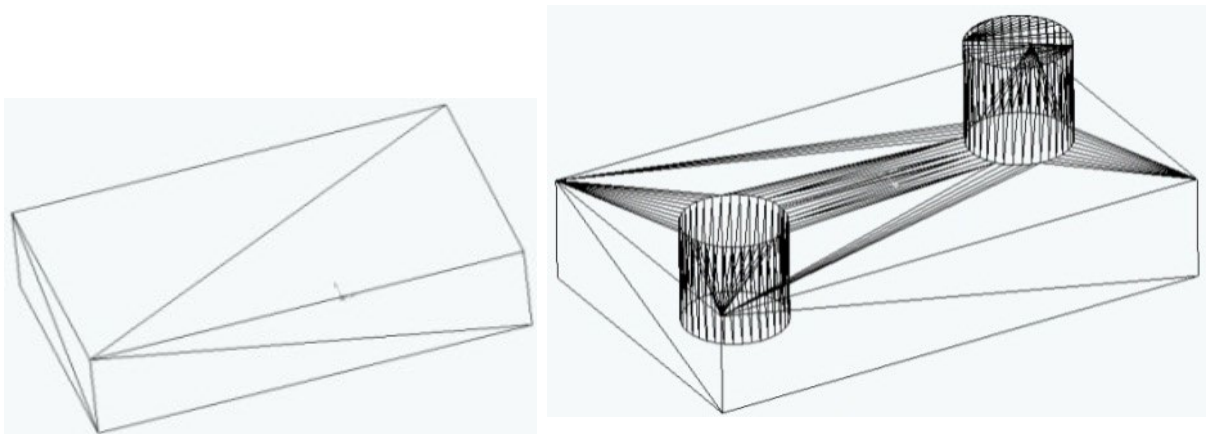
Za čuvanje informacija o solid modelima, najveći broj savremenih CAD sistema koristi neku od varijacija B-REP (Boundary Representation) struktura podataka. Međutim, STL može da čuva samo informacije o površinskim modelima; Savremeni CAD sistemi čuvaju informacije o tačnoj geometriji površi (npr. površ ne mora biti ravna, već može biti cilindrična, ili definisana B-splajnom). Sa druge strane, STL čuva samo informacije o ravanskim trouglovima (Sl. 2.6).

Prva navedena razlika nema velike posledice po korišćenje STL datoteke u domenu AM proizvodnje, budući da su informacije o površinskom modelu dovoljne da omoguće oslojenu izradu modela.

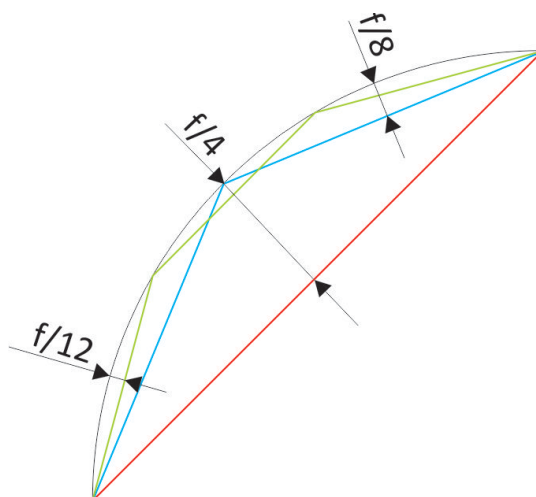
Druga navedena razlika, međutim, ima uticaj na tačnost opisa modela. Naime, svaka površ, bez obzira na kompleksnost, mora biti reprezentovana mrežom ravnih trouglova. Ukoliko je površ modela ravna, neće biti razlike između tačnosti CAD i STL zapisa (Sl. 2.7). Međutim, ako je površ zakrivljena, tada će ona u STL zapisu biti predstavljena kao aproksimacija, čija tačnost zavisi od veličine trouglova (Sl. 2.7). Većina CAD sistema omogućava korisniku da, prilikom eksportovanja originalnog CAD modela u STL format, utiče na tačnost ove aproksimacije tako što će podesiti veličinu odstupanja aproksimirane površi od tačne.



Slika 2.6 Tačna geometrija NURBS površi reprezentovana od strane CAD sistema (a) i aproksimirana STL mrežom ravanskih trouglova (b)

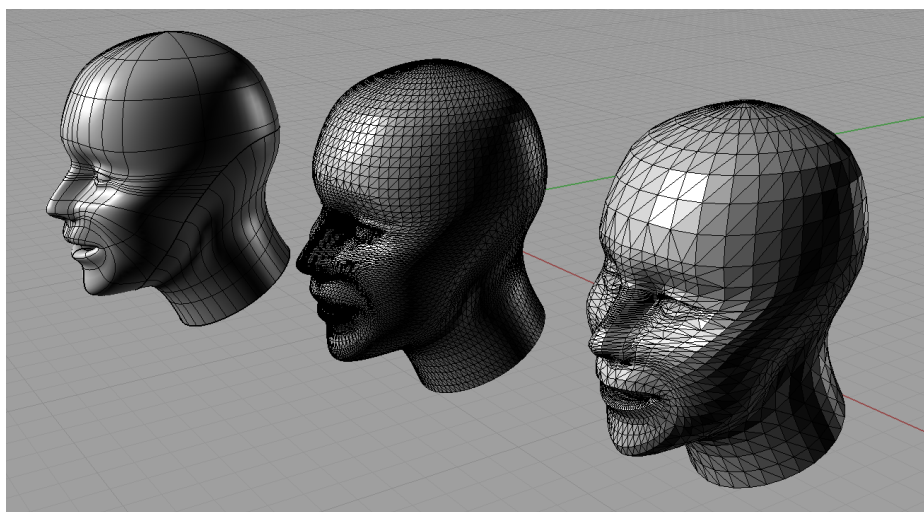


Slika 2.7 Solid u obliku kvadra (levo) i složeni solid (desno), aproksimirani mrežom ravanskih trouglova



Slika 2.8 Promena veličine odstupanja (visine tetive), kao posledica aproksimacije kružnice sa 4, 8 i 12 trouglova

U cilju smanjenja odstupanja, neophodno je smanjiti i veličinu trouglova, što podrazumeva povećanje njihovog ukupnog broja, tj. povećanje STL datoteke. Na slici 2.8 je prikazana promena veličine odstupanja aproksimirane površi (linijski segmenti crvene, plave i zelene boje) od tačne površi (kružni luk), u zavisnosti od ukupnog broja, tj. veličine trouglova. Slika 2.9 ilustruje smanjenje tačnosti aproksimacije CAD modela sa smanjenjem ukupnog broja trouglova.



Slika 2.9 CAD model glave konvertovan u STL format korišćenjem dva nivoa tačnosti, tj. veličine odstupanja trougla od tačne površi

2.4 Greške u STL datotekama

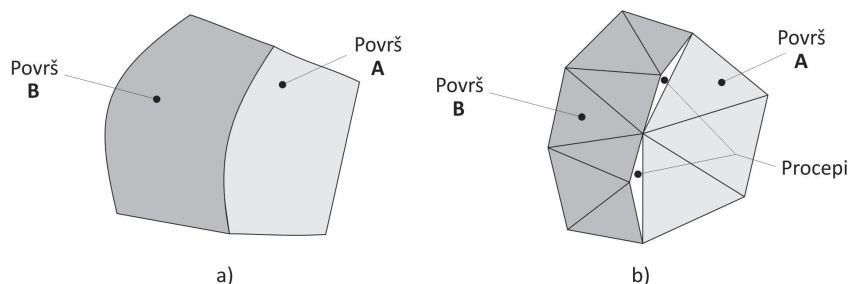
Postoje četiri tipa grešaka koje su karakteristične za STL datoteke, a posledica su nedostatka topoloških informacija. To su:

- Procepi, tj. nedostajući trouglovi;
- Degenerisani trouglovi;
- Preklapanje trouglova;
- Pojava topologije tipa „non-manifold”.

Upravo zbog mogućnosti pojave ovakvih grešaka, neophodna je provera validnosti STL datoteke pre nego što se ona prosledi AM mašini radi izrade modela. U nastavku sledi detaljniji opis navedenih tipova grešaka.

2.4.1 Procepi – nedostajući trouglovi

Prilikom teselacije¹ i spajanja površi koje imaju veći radijus zakrivljenosti, može doći do pojave procepa. Naime, postoje situacije u kojima se - zbog različite dužine stranica trouglova kojima su aproksimirane površi A i B (Sl.2.10a) - njihove granične krive ne podudaraju, što rezultuje pojavom procepa (Sl. 2.10b).



Slika 2.10 Pojava procepa na spoju dve površi, a) spoj „tačnih” NURBS površi u CAD modelu, b) spoj površi aproksimiranih ravanskim trouglovima

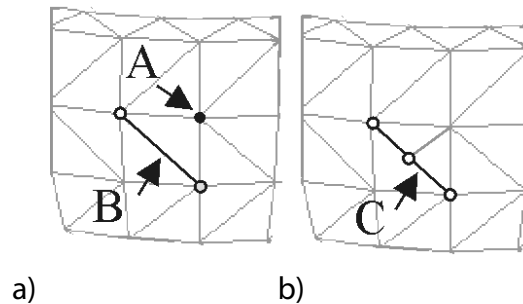
2.4.2 Degenerisani trouglovi

U principu, razlikuju se dva tipa degeneracije trougaonih poligona:

- Topološka degeneracija;
- Geometrijska degeneracija.

¹ Teselacija je podela površi na mrežu međusobno povezanih diskretnih elemenata. U zavisnosti od toga da li su diskretni elementi, koji čine mrežu, istog ili različitog oblika i veličine, razlikuju se regularna i neregularna teselacija.

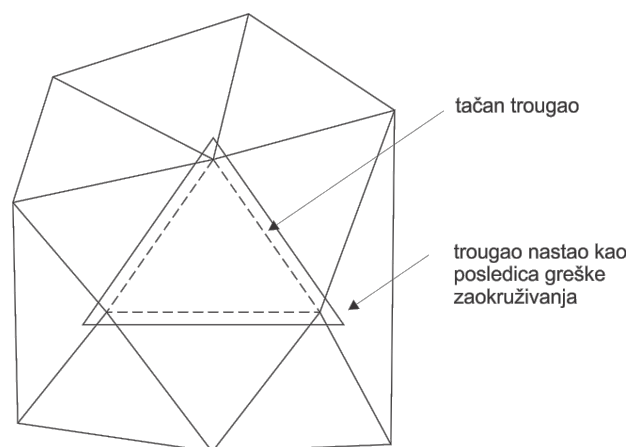
Do topološke degeneracije dolazi kada se dva ili više čvorova jednog poligona preklapaju. Na slici 2.11a vidi se slučaj koincidencije sva tri čvora u istoj tački (A) i slučaj kada se poklapaju samo dva čvora (B). Budući da ovakva degeneracija ne ostavlja posledice na geometriju ili spojeve preostalih poligona, **topološki degenerisan poligon se može odbaciti**. Kada je reč o geometrijskoj degeneraciji (Sl. 2.11b), do nje dolazi kada su svi čvorovi poligona jasno izdvojeni, a sve ivice poligona su kolinearne. Dakle, geometrijski degenerisan poligon nema normalu, ali sadrži implicitne topološke informacije o tome na koji način su spojeni susedni poligoni. Za razliku od slučaja topološke degeneracije, **geometrijski degenerisan poligon se ne može odbaciti**, već se uočena nepravilnost mora korigovati primenom specijalizovanog softvera.



Slika 2.11 Degeneracija poligona: a) topološka, b) geometrijska

2.4.3 Preklapanje trouglova

Kako je već rečeno, koordinate temena trouglova čuvaju se u formatu pokretnog zareza, a ne kao celi brojevi. Usled toga, u procesu teselacije može doći do greške zaokruživanja vrednosti koordinata temena trouglova, što dovodi do netačnih položaja temena pojedinih trouglova u prostoru, tj. do delimičnog preklapanja sa drugim trouglovima. Na slici 2.12 je prikazana jedna takva greška.



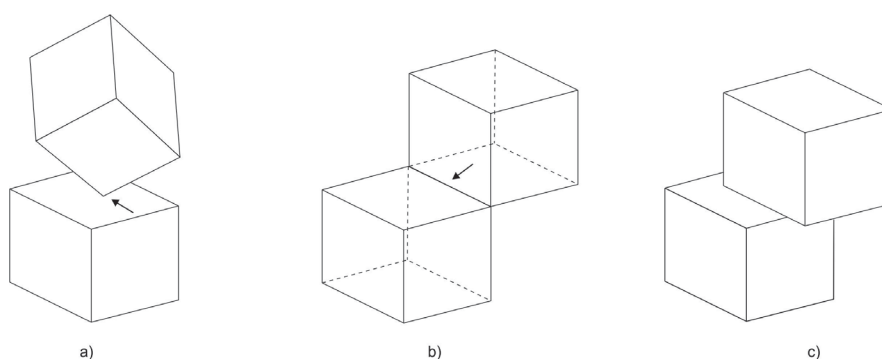
Slika 2.12 Greška u STL mreži kao posledica preklapanja trouglova

2.4.4 Pojava topologije tipa „non-manifold”

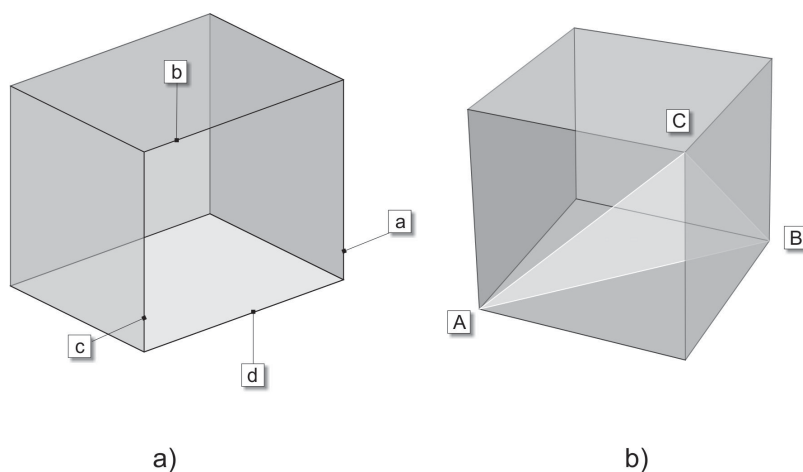
Uzrok pojave „non-manifold” topologije najčešće je greška zaokruživanja koja nastaje prilikom teselacije finih geometrijskih detalja. Postoje tri tipa „non-manifold” topologije:

- „Non-manifold” ivica;
- „Non-manifold” tačka;
- „Non-manifold” površ.

U regularnom solidu sa *manifold* topologijom, jedna ivica može da bude zajednička samo dvema stranicama. Na slici 2.13b prikazana je *non-manifold* ivica koja je zajednička za čak četiri stranice. Na slici 2.13a je prikazano oslanjanje solid tela u jednom, *non-manifold*, temenu, dok slika 2.13c ilustruje pojavu *non-manifold* stranice.



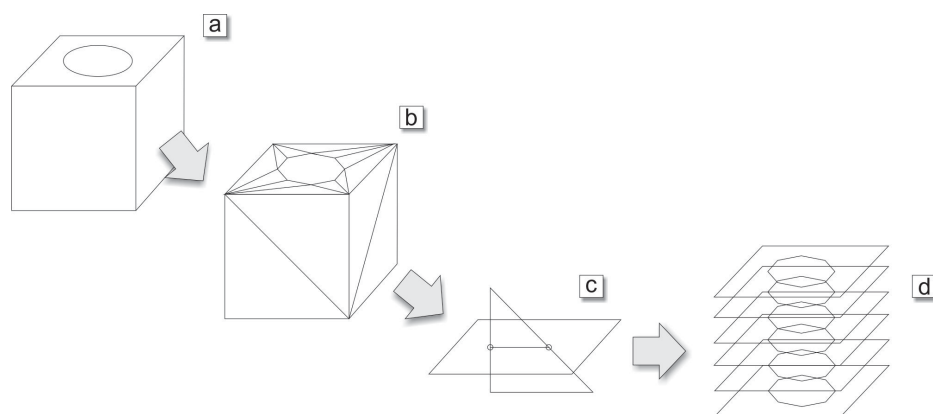
Slika 2.13 Karakteristične pojave non-manifold topologije: a) non-manifold teme, b) non-manifold ivica, c) non-manifold stranica



Slika 2.14 Ilustracija non-manifold topologije: a) non-manifold ivice kocke a, b, c i d pripadaju samo po jednoj stranici b) non-manifold stranica koju čini trougao sa temenima A, B i C

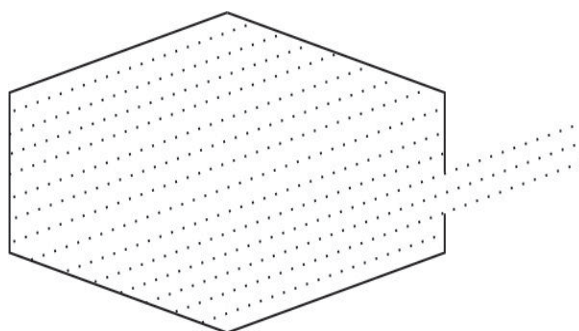
2.5 Uticaj grešaka u STL datoteci na generisanje putanja za očvršćavanje

Ono što je zajedničko za sve prethodno nabrojane tipove anomalija, jeste činjenica da **uzrokuju greške prilikom generisanja putanja za očvršćavanje**. Naime, kada se korektno generisan solid (Sl. 2.15a) teselacijom pretvori u mrežu ravanskih trouglova (Sl. 2.15b), na osnovu ukupne visine modela i rezolucije AM mašine u pravcu Z ose, izračunava se ukupan broj slojeva koje treba izraditi. Primenom posebnog algoritma generišu se putanje očvršćavanja - *scan lines* (Videti: *Generisanje putanja za očvršćavanje*) (Sl. 2.15c). Njima se, zavisno od konkretne AM tehnologije, definišu putanje za prolaz laserskog zraka ili inkdžet glave, što omogućava korektno generisanje svih poprečnih preseka koji ulaze u sastav modela (Sl. 2.15d).



Slika 2.15 Faze generisanja putanja očvršćavanja

U slučaju da mreža trouglova nije korektna, npr. zbog nedostajućeg trougla, prilikom generisanja putanje očvršćavanja doći će do greške. Na slici 2.16 vidimo da se putanja očvršćavanja ne zaustavlja na predviđenoj granici modela, već se produžava izvan nje. U realnoj situaciji, očvršćavanje bi se odvijalo sve dok se ne dosegnu fizička ograničenja AM mašine, a tako izrađen model bio bi odbačen kao škart.



Slika 2.16 Primer nekorektno generisane putanje očvršćavanja

Za korekciju STL datoteka koristi se specijalizovani softver: SolidView/Pro (Solid Concepts, Inc, SAD), 3D Verify (3D Systems Inc, SAD) i MagicsRP (Materialise, Belgija).

U Tabeli 2.1 date su najvažnije prednosti i nedostaci STL formata za razmenu podataka o AM modelima.

Tabela 2.1 Važnije prednosti i nedostaci STL formata za razmenu podataka

	<i>Opis</i>	<i>Komentar</i>
<i>Prednosti</i>	<i>Jednostavna konverzija 3D u STL</i>	<i>Konverzija 3D modela u STL format odvija se primenom standardnih, jednostavnih algoritama, uz mogućnost kontrole tačnosti aproksimacije.</i>
	<i>Univerzalnost</i>	<i>Svi tipovi 3D geometrije mogu se aproksimirati mrežom ravanskih trouglova.</i>
	<i>Jednostavno generisanje ravanskih preseka</i>	<i>Algoritmi za generisanje ravanskih preseka na STL modelu najčešće su jednostavni.</i>
	<i>Mogućnost segmentiranja STL datoteke</i>	<i>Za potrebe prilagođavanja radnom prostoru AM mašine, veći modeli mogu se podeliti na nekoliko STL datoteka.</i>
		<i>Opširnost i ponavljanje podataka</i>
<i>Nedostaci</i>	<i>Problemi svojstveni STL formatu</i>	<i>Veličina datoteke</i> <i>Pojava greške zaokruživanja</i>
	<i>Greške u procesu konverzije</i>	<i>Videti tačku: Greške u STL datoteci</i>
		<i>Skupo i vremenski zahtevno korigovanje STL datoteke</i>
	<i>Nekompletnost informacija</i>	<i>Nedostatak topoloških informacija</i> <i>Nedostatak tehnoloških parametara (3D štampa u boji zahteva korišćenje alternativnih formata za razmenu podataka - *.WRL² ili *.PLY³).</i>

² **WRL** je ekstenzija datoteke u **VRML** (Virtual Reality Modelling Language) formatu koji je namenjen za predstavljanje trodimenzionalne, interaktivne vektorske grafike na Web-u.

³ **PLY** – Polygon File Format, CAD modele predstavlja kao mrežu ravanskih poligona (trouglova) uz mogućnost čuvanja i dodatnih informacija o boji, providnosti, itd.

Kao literatura za ovo poglavlje korišćena su poglavlja iz:

1. Knjiga: 3D štampa, Ognjan Lužanin, Novi Sad, 2019.

3. Stereolitografija (SLA)

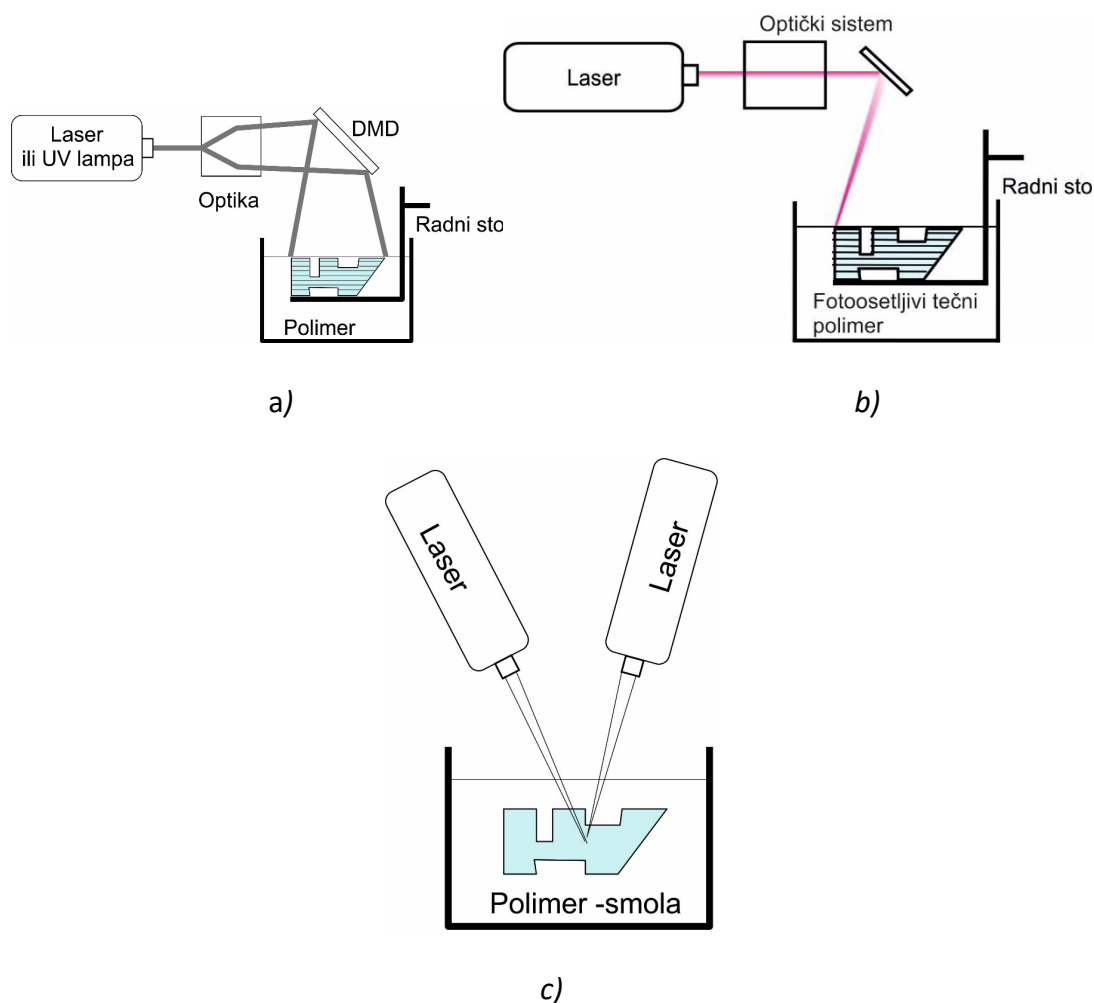
Stereolitografija (SLA) predstavlja prvi razvijeni postupak brze izrade prototipova. Bazira se na očvršćavanju tečnog fotoosetljivog polimera pod uticajem zračenja. Fotopolimerizacioni procesi koriste tečnost, polimerizujuće fotopolimere ili fotopolimere kao primarne materijale. Većina fotopolimera reaguje na zračenje u ultraljubičastom (UV) spektru talasnih dužina, ali se koriste i sistemi vidljive svetlosti. Nakon izlaganja zracima, ovi materijali prolaze hemijsku reakciju da bi postali čvrsti. Ova reakcija se naziva fotopolimerizacija.

Fotopolimeri su razvijeni krajem 1960-ih i ubrzo su postali široko primenjeni u nekoliko komercijalnih oblasti, naročito u štampi. Pored toga, u stomatologiji se koriste foto-očvršćeni fotopolimeri, kao što su tzv. kompozitne (bele) plombe. U ovim primenama, slojevi očvršćavaju zračenjem koje pokriva fotopolimer bez potrebe za putanjom očvršćavanja. Ovo se promenilo uvođenjem stereolitografije.

Sredinom 1980-ih, Charles (Chuck) Hull je eksperimentisao sa UV materijalima koje je izložio laserskom zračenju, slično sistemu koji se koristi u laserskim štampačima. Otkrio je da se mogu proizvesti uzorci čvrstog polimera. Stvaranjem jednog sloja iznad prethodnog sloja, on je mogao da napravi čvrsti 3D deo. To je bio početak tehnologije stereolitografije (SLA). Kompanija 3D Systems je ubrzo nakon toga stvorila prvu SL mašinu za brzu izradu prototipova i prodala industriji za razvoj proizvoda. Od tada je razvijen širok spektar procesa i tehnologija vezanih za SL. Za očvršćivanje komercijalnih fotopolimera mogu se koristiti različiti tipovi zračenja, uključujući gama zrake, rendgenske zrake, elektronske zrake, UV, a u nekim slučajevima i vidljiva svetlost. Kod SL sistema se najčešće koriste UV i vidljivo svetlosno zračenje.

Tokom vremena razvijene dve osnovne i jedna dodatna konfiguracija uređaja:

- vektorsko skeniranje (ili skeniranje putanjom tačke) – najviše se koristi u SLA uređajima (slika 3.1b)
- projekcija maske (slika 3.1a), u današnje vreme vrlo popularna (DLP)
- two foton – tačka po tačka skeniranje ali vrlo visoke rezolucije (slika 3.1c) za delove ispod 1mm.



Slika 3.1 Različite konfiguracije SLA uređaja

3.1. Materijali

Prvi fotopolimeri koji su se pojavili (1989 i 1990 USA) za osnovu su imali akrilate, a izrađeni delovi bili loših osobina i tačnosti zbog velikog skupljanja (5-20%). Takođe zbog načina generisanja sloja, gde laserski zrak prodire i do prethodnog sloja, dolazi do problema duplog osvetljavanja sloja koji izaziva dodatno skupljanje.

Epoksidni fotopolimeri daju proizvode preciznije, tvrđe i jače nego akrilatni. Dok polimerizacija akrilatnih fotopolimera dovodi do skupljanja od 5-20%, pri polimerizaciji epoksida dolazi otvaranja epoksidnih prstenova i dovodi vodi do skupljanja od samo 1-2%. Ovaj nizak stepen skupljanja koji je povezan sa hemijom epoksida doprinosi odličnoj adheziji i smanjenoj sklonosti deformacija tokom sušenja.

Međutim, epoksidni fotopolimeri imaju nedostatke sporog osvetljavanja i krтости izrađenih delova. Dodavanje nekih akrilata epoksidnim fotopolimerima je neophodno da bi se brzo izradio deo dovoljne čvrstoće koji ima dovoljne mehaničke karakteristike da se bezbedno i bez oštećenja može izneti van radnog prostora i posprocesirati. Akrilati su takođe korisni za smanjenje krтости

epoksidnih delova. Još jedan nedostatak epoksidnih fotopolimera je njihova osetljivost na vlagu, koja može sprečiti polimerizaciju.

Kao rezultat navedenog, komercijalno dostupnih većina SL fotopolimera danas su epoksidi sa određenim sadržajem akrilata. Neophodno je da oba materijala budu prisutna u istoj formulaciji da bi se kombinovale prednosti oba tipa zbog boljeg i kontrolisanijeg očvršćavanja. Poboljšanje u preciznosti izrade delova, a koje proizilazi iz upotrebe hibridnih fotopolimera, omogućilo je SLA ogroman napredak u AM.

U sastav formulacije fotopolimera ulaze tri ključne komponente:

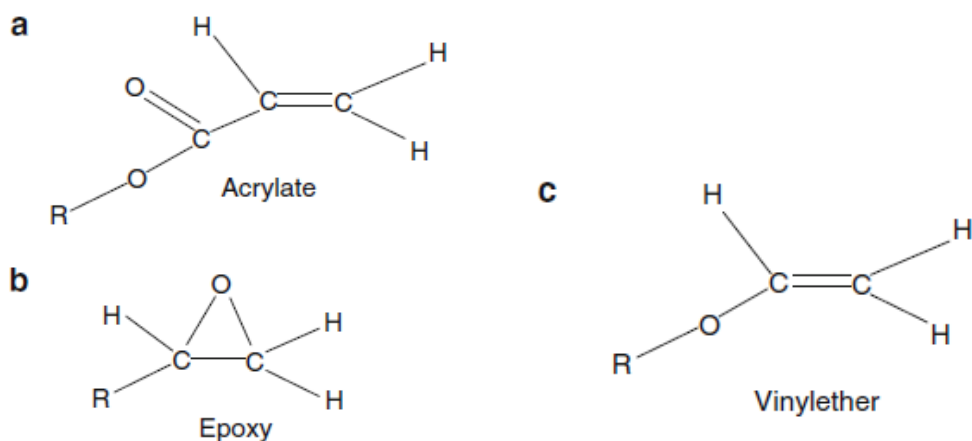
- Fotoinicijatori – molekuli koji, usled apsorpcije svetlosti određene talasne dužine, emituju reaktivne čestice koje ubrzavaju proces polimerizacije;
- Tečni monomeri i oligomeri – molekuli male molekulske mase koji su sposobni da stupaju u reakciju sa identičnim ili različitim molekulima male molekulske mase, radi formiranja polimera;
- Aditivi (stabilizatori, pigmenti, itd).

3.1.1. Mehanizmi fotopolimerizacije

SL fotopolimeri su sastavljeni od nekoliko sastojaka: fotoinicijatora, aditiva i tečnih monomeri i oligomera. Uopšteno govoreći, kada se fotopolimer izloži UV zračenju, fotoinicijatori prolaze hemijsku transformaciju i postaju "reaktivni" sa tečnim monomerima/oligomerima. Reaktivni fotoinicijator reaguje sa monomernim molekulom koji započinje stvaranje polimernog lanca, a zatim dolazi do poprečnog povezivanja - stvaranje jakih kovalentnih veza između polimernih lanaca. Polimerizacija je termin koji se koristi za opisivanje procesa povezivanja malih molekula (monomera) u veće molekule (polimere) sastavljene od mnogih monomernih jedinica. Dva glavna tipa fotopolimerne reakcije se odvijaju u komercijalnim fotopolimerima:

- Fotopolimerizacija preko slobodnih radikala – kod akrilati
- Katjonska fotopolimerizacija - kod epoksida i viniletra.

Molekularna struktura sva tri navedena polimera data je na slici 3.2. Simboli C i H označavaju atome ugljenika i vodonika, dok R označava molekularnu grupu koja se tipično sastoji od jedne ili više vinilnih grupa. Vinil grupa je molekularna struktura sa dvostrukom vezom ugljenik-ugljenik. Ove vinilne grupe u R strukturama omogućavaju fotopolimerima unakrsnu vezu.



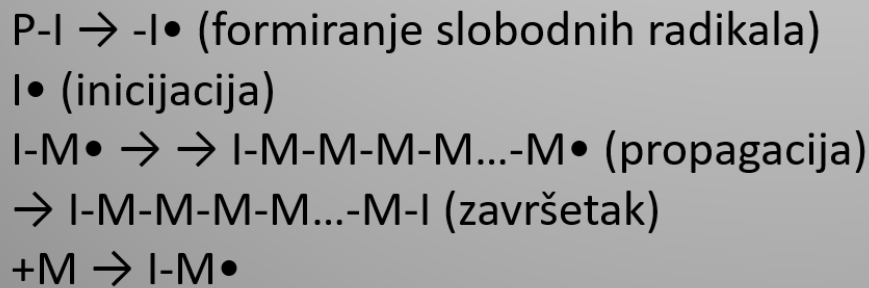
Slika 3.2 Molekularna struktura a) akrilata, b) epoksida i c) viniletra

Fotopolimerizacija preko slobodnih radikala bila je prvi tip fotopolimerizacije koji je komercijalno razvijen. Fotopolimeri koji se umrežavaju na ovaj način su u osnovi akrilati. Kada fotoinicijator pod dejstvom laserskog zraka (fotona) postane "reaktivan", akrilatni lanci linearnim dodavanjem segmenta monomera rastu u dugački polimerni lanac. Poprečne veze između lanaca akrilata se obično pojavljuju nakon što polimerni lanci narastu dovoljno tako da postanu blizu jedan drugom. Akrilatni fotopolimeri pokazuju visoku fotoosetljivost (reaguju brzo kada su izloženi UV zračenju), ali imaju i brojne nedostatke, uključujući značajno skupljanje i tendenciju deformacije nakon umrežavanja. Kao rezultat toga, oni se danas retko koriste bez epoksida ili drugih fotopolimernih elemenata.

Najčešći tip fotopolimera koji se koriste u SLA sistemima, a koji se umrežavaju katjonski su epoksidi, mada su vinileteri takođe komercijalno dostupni. Epoksidni monomeri imaju prstenove, kao što je prikazano na slici 3.2 (C-O-C grupa). Kada reaguju, ovi prstenovi se otvaraju, što dovodi do mesta za druge hemijske veze. Poznato je da otvaranje prstena daje minimalnu promenu zapremine, jer su broj i tipovi hemijskih veza u suštini identični pre i posle reakcije. Kao rezultat toga, epoksidni SLA fotopolimeri obično imaju mnogo manje skupljanje i deformacije savijanja i uvijanja delova nakon izrade su neuporedivo manje. Skoro svi SLA komercijalno dostupni fotopolimeri imaju značajne količine epoksida.

Polimerizacija SLA monomera je egzotermna reakcija, sa veličinom oslobođene toplote prilikom reakcije oko 85 kJ / mol za primer akrilatnog monomera. Uprkos visokim temperaturama reakcije, i dalje je potreban katalizator za iniciranje reakcije (fotoinicijator je ujedno i katalizator).

Šematski, proces polimerizacije inicirane slobodnim radikalima može se ilustrovati kao na slici 3.3. U proseku, za svaka dva fotona (dobijeni od lasera) proizvodi se jedan radikal. Taj radikal može dovesti do polimerizacije preko 1000 monomera, a to se naziva propagacija. Uopšteno, na kraju procesa poželjniji su duži polimerni molekuli, koji daju veće molekulske težine. Na slici 3.3, „P – I“ izraz označava fotoinicijator, simbol „-I•“ je slobodni radikal, a „M“ predstavlja monomer.

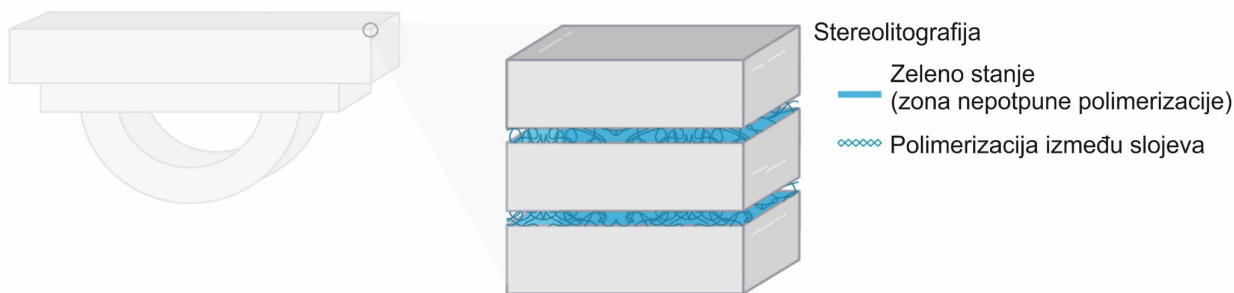


Slika 3.3 Proces polimerizacije iniciran slobodnim radikalima

Polimerizacija se mora kontrolisano završiti i to se postiže na jedan od tri načina (i) rekombinacijom, (ii) disproporcije ili (iii) okluzije. Rekombinacija se dešava kada se dva polimerna lanca spajaju preko spajanja dva radikala pa oni ne mogu dalje da vezuju monomere. Disproporcija u suštini uključuje poništenje jednog radikala od strane drugog, bez pridruživanja monomera. Okluzija se dešava kada slobodni radikali postanu "zarobljeni" unutar očvrnutog (već odreagovanog) polimera, što znači da reakciona mesta ostaju dostupna, ali se sprečavaju da reaguju sa drugim monomerima ili polimerima jer im je pokretljivost ograničena unutar polimerne mreže. Ova neodreagovana mesta će na kraju sigurno reagovati, ali ne sa drugim lancem polimera ili monomerom. Umesto toga, oni će reagovati sa kiseonikom ili drugom reaktivnom vrstom koja se difunduje u taj region. To može biti uzrok oksidacije ili drugih promena mehaničkih svojstava očvrstalih delova.

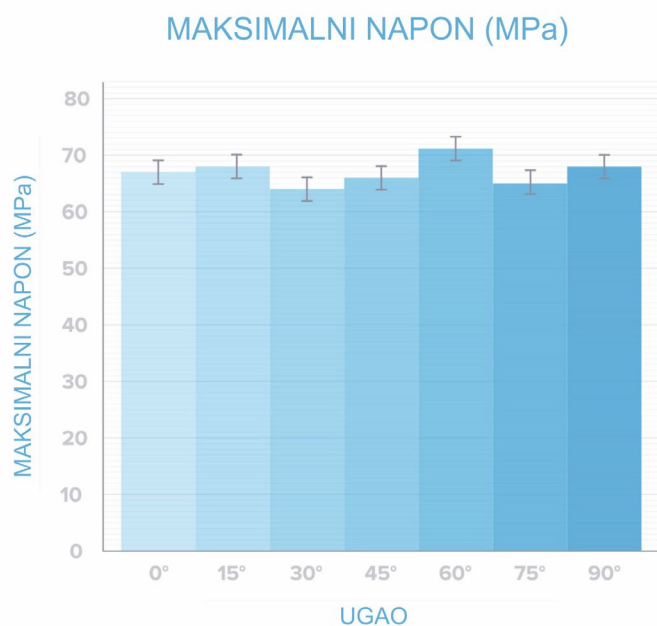
Kod katjonske fotopolimerizacije fotoinicijator generiše katjon pod dejstvom laserske energije koji reaguje sa monomerom, dolazi do propagacije i dobija se polimerni lanac. Tipičan katalizator za katjonsku polimerizaciju je Luisova kiselina (Lewis Acid), npr. BF_3 (bor fluorid). U početku, katjonska fotopolimerizacija je dobijala malo pažnje, ali se to promenilo tokom 1990-ih zbog napretka u industriji mikroelektronike, kao i interesovanja za SLA tehnologiju. Generalno u reakciji prstenovi u epoksidu se pod dejstvom inicijatora otvaraju i na taj način ostavljaju prostor za stvaranje novih veza. Ova reakcija poznata kao reakcija sa minimalnom promenom zapremine jer broj i tip veza ostaje identičan pre i nakon reakcije i zbog toga je promena dimezija izrađenih delova vrlo mala.

Generalno posmatrano, prilikom izrade delova SLA sistemom ne dolazi tokom skeniranja površine do potpune polimerizacije delova, već ostaje deo neodreagovanog monomera unutar dela, u zapreminama između dva sloja (slika 3.4). Kako bi polimerizacija bila završena do kraja delovi se naknadno postprocesiraju u UV komorama na povišenim temperaturama npr. za SLA fotopolimeri od proizvođača FormLabs to je $40-60^{\circ}C$. Ovakav postupak se sprovodi radi ubrzanja procesa kako bi se deo izradio što pre na mašini i kako bi se na njom mogli raditi novi delovi, tj. radi povećanja produktivnosti.



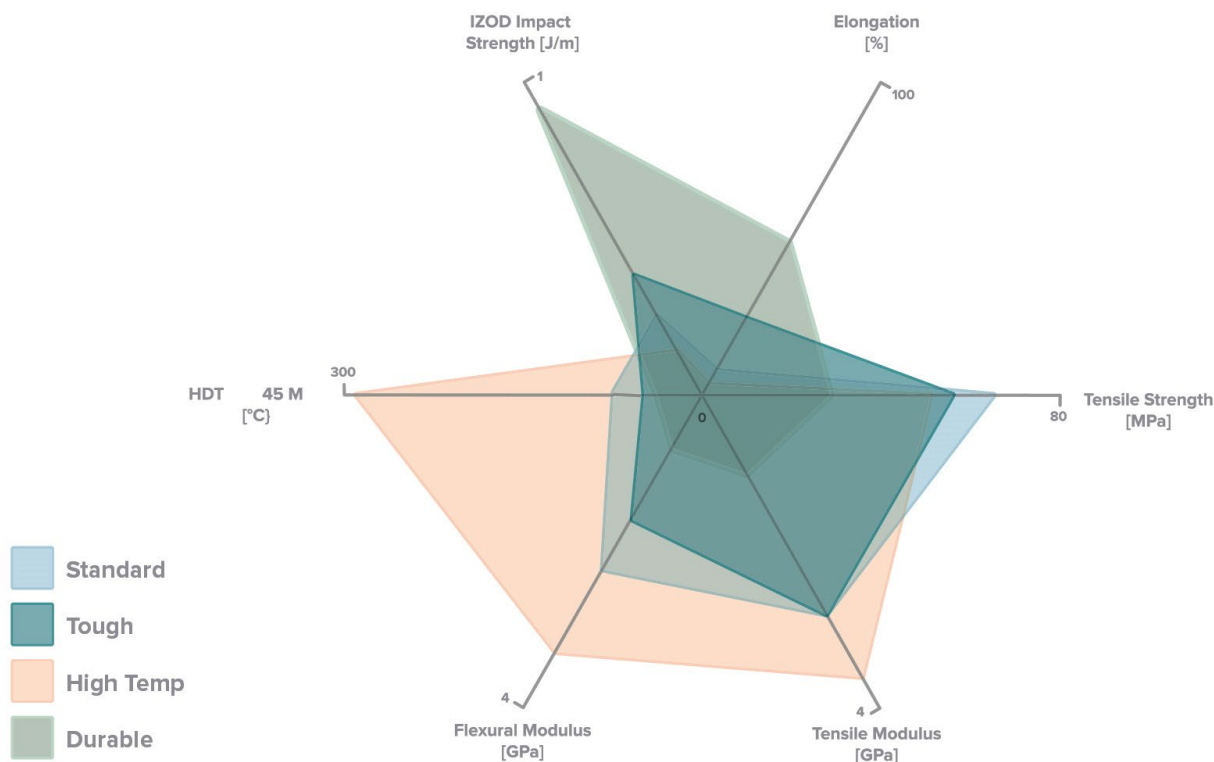
Slika 6.4 Prikaz preseka dela nakon SLA procesa pre postprocesiranja

S obzirom na samu prirodu procesa delovi dobijeni postupkom SLA pokazuju visok stepen homogenost, tj. uticaj orijentacije dela u radnom prostoru uređaja ne utiče na mehaničke karakteristike izrađenih delova što je prikazano na dijagramu na slici 3.5, pri određivanju zatezne čvrstoće. Ugao epruveta (delova) je za svaki uzorak pomerana u odnosu na horizontalu za 15°, i evidentno je da orijentacija utiče u vrlo maloj meri na vrednosti zatezne čvrstoće, dok to nije slučaj kod npr. FDM tehnologije.



Slika 3.5 Uticaj orijentacije epruveta na zateznu čvrstoću SLA delova

Danas se u ponudi može pronaći veliki broj fotopolimera, čak i od istog proizvođača, koje imaju različite mehaničke karakteristike kao npr. zateznu čvrstoću, izduženje, savojnu čvrstoću itd. Na slici 3.6 prikazane u karakteristike za četiri različita fotopolimera od istog proizvođača sa vrednostima šest različitih karakteristika. Na osnovu prikazanog dijagrama, lako je utvrditi koji će fotopolimer biti korišćena ako se poznaju eksploatacioni zahtevi dela koji se izrađuje (opterećenja, temperatura, potrebno izduženje itd).



Slika 3.6 Karakteristike različitih fotopolimera proizvođača Form Labs

6.1.2 Aditivi

Aditivi su supstance koje se dodaju polimerima u cilju poboljšanja njihovih mehaničkih, hemijskih i fizičkih svojstava. U tipične aditive spadaju:

- Punioci;
- Plastifikatori;
- Stabilizatori;
- Koloranti;
- Aditivi za smanjenje gorivosti.

Punioci se dodaju radi poboljšanja zatezne i pritisne čvrstoće polimera, otpornosti na habanje, toplotne stabilnosti, i dr. Dimenzije čestica punilaca kreću se od nanometarskih, do makroskopskih. U materijale koji se koriste za punioce spadaju drveno brašno (fino mlevena piljevina), pesak, staklo, glina i neki sintetički polimeri. S obzirom na nižu cenu, punioci se, u određenoj meri, mogu koristiti i kao zamena za polimer, čime se snižava cena finalnog proizvoda.

Dodavanjem **plastifikatora** poboljšava se fleksibilnost i žilavost polimera, dok se, sa druge strane, umanjuju tvrdoća i krutost. Plastifikatori su, u opštem slučaju, tečnosti koje se odlikuju niskim pritiskom isparavanja i nižim molekulskim masama. Mali molekuli plastifikatora povećavaju rastojanje između makromolekula, smeštajući se između njih, a sa povećanjem rastojanja slabe sekundarne međumolekulske sile.

Stabilizatori doprinose očuvanju mehaničkih svojstava polimera, koja bi, tokom vremena, bila narušena pod uticajem spoljašnje sredine. Primer takvog uticaja jeste izlaganje polimera svetlosti, posebno iz ultraljubičastog spektra, pri čemu dolazi do raskidanja nekih kovalentnih veza na celokupnoj dužini polimernog lanca. Negativno dejstvo okoline na proizvode od polimera ima i oksidacija, posledica hemijske reakcije između molekula polimera i kiseonika, dvoatomnog, O_2 , ili troatomnog, O_3 (ozon).

Koloranti se mogu dodavati kao boje ili kao pigmenti. Molekuli boje se rastvaraju u polimeru, dok se pigmenti ne rastvaraju, već predstavljaju posebnu fazu. Karakteriše ih mala veličina čestica i indeks prelamanja svetlosti koji je blizak matičnom polimeru. Pored boje, koloranti mogu doprineti i transparentnosti proizvoda od polimera.

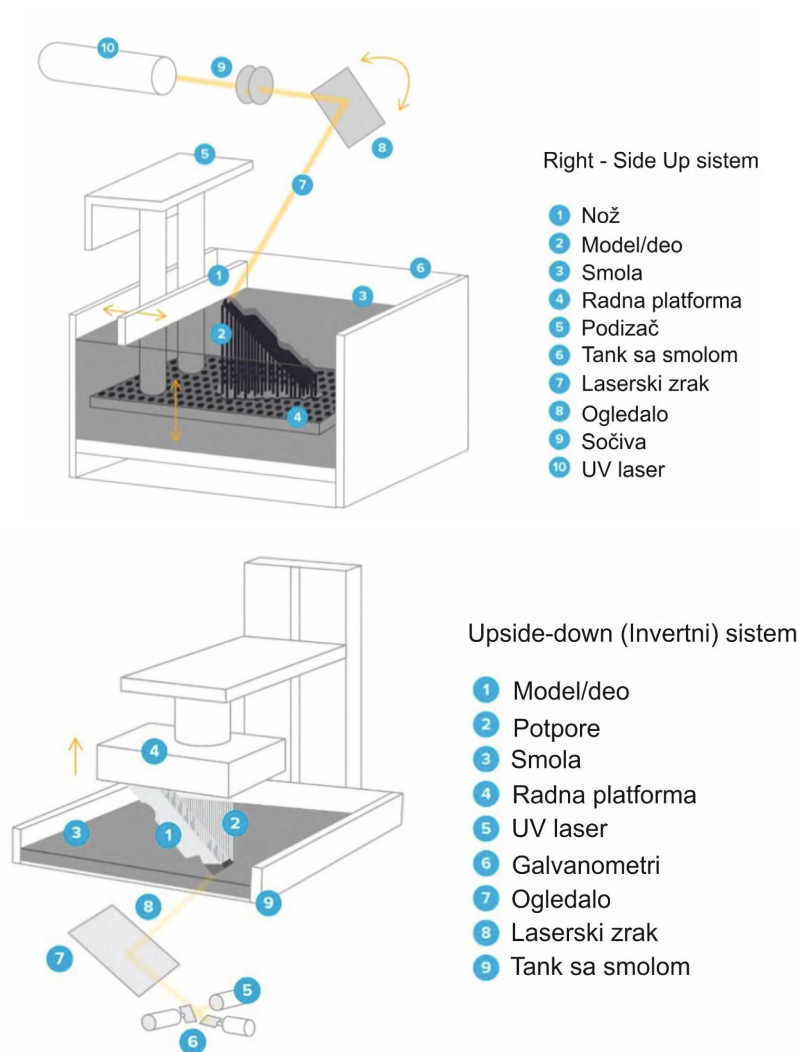
Sposobnost gorenja polimernih materijala predstavlja važnu osobinu, posebno u domenu tekstilnih proizvoda i dečijih igračaka. Većina polimera je zapaljiva, pri čemu izuzetak predstavljaju polimeri sa visokim sadržajem hlora ili fluora, npr. polivinil-hlorid i politetrafluoroetilen. **Aditivi za smanjenje gorivosti** funkcionišu na sledeće načine: (i) ometaju proces sagorevanja prisustvom svoje gasne faze i (ii) modifikuju reakciju sagorevanja, snižavajući temperaturu, te na taj način usporavaju ili zaustavljaju gorenje.

3.3 Vektorsko skeniranje

Proces izrade delova SLA tehnikom vektorskog skeniranja se može podeliti u dve grupe; izrada (štampanje dela) i postprocesiranje, a svaka grupa ima više karakterističnih koraka:

- Kreiranje (štampanje) modela/dela:
 - Ulazna datoteka (stl)
 - Priprema modela (potpore, oslona struktura...)
 - Priprema svakog sloja
 - Skeniranje površine fotopolimera laserom oblika dvodimenzionalnih preseka
- Postprocesiranje
 - Čišćenje
 - Očvršćavanje
 - Finalna obrada

Kod vektorskog skeniranja razlikuju se dva tipa uređaja u zavisnosti od površine skeniranja sloja i to: (i) uređaj sa skeniranjem sa gornje strane (right-side up system), slika 3.13a i (ii) i uređaj sa skeniranjem sa donje strane ili inverzni sistem (upside-down system), slika 3.13b. Oba sistema sa prikazanim osnovnim delovima uređaja dati su na slici 3.13.



Slika 3.13 Tipovi uređaja u zavisnosti od površine skeniranja

Svaki od ovih sistema ima niz prednosti i nedostataka u odnosu na drugi. Uređaji sa gornjim skeniranjem vrše direktno skeniranje površine fotopolimera i ne postoje nikakve prepreke između zraka i fotopolimera. Ovo smanjuje mogućnost prljanja optičkih delova sistema koje može da dovede do disperzije laserskog zraka i netačne izrade delova. Takođe ovaj sistem je pogodan za izradu delova velikih dimenzija i težine, tzv. mamut uređaji, jer je deo oslonjen na radnu ploču i ne može da spadne sa nje. Nedostaci ovog sistema su: obavezno mora da postoji sistem za nanošenje fotopolimera na očvrstnute slojeve (nož za nanošenje), radna komora mora da bude ispunjena fotopolimerom, postoji problem zarobljene tečnosti zbog čega mora da postoji niz konstrukcionih otvora radi isticanja fotopolimera, potrebno je generisati više potpora, jer su one opterećene na pritisak i trpe težinu dela (slika 3.14a). Potporne strukture se kod oba sistema uklanjaju mehanički nakon procesa štampe ili nakon postprocesiranja.

Kod sistema sa donjim skeniranjem potrebno je daleko manje fotopolimera za izradu dela, jer deo izlazi iz tanka (kade) sa fotopolimerom, samo par desetina milimetra dela je uronjeno u fotopolimer, a tank se automatski dopunjava. S obzirom da delovi „vise“ sa radne ploče mašine, broj potpora koje se generišu kroz softver, je daleko manji nego kod prvog sistema (slika 3.14b).

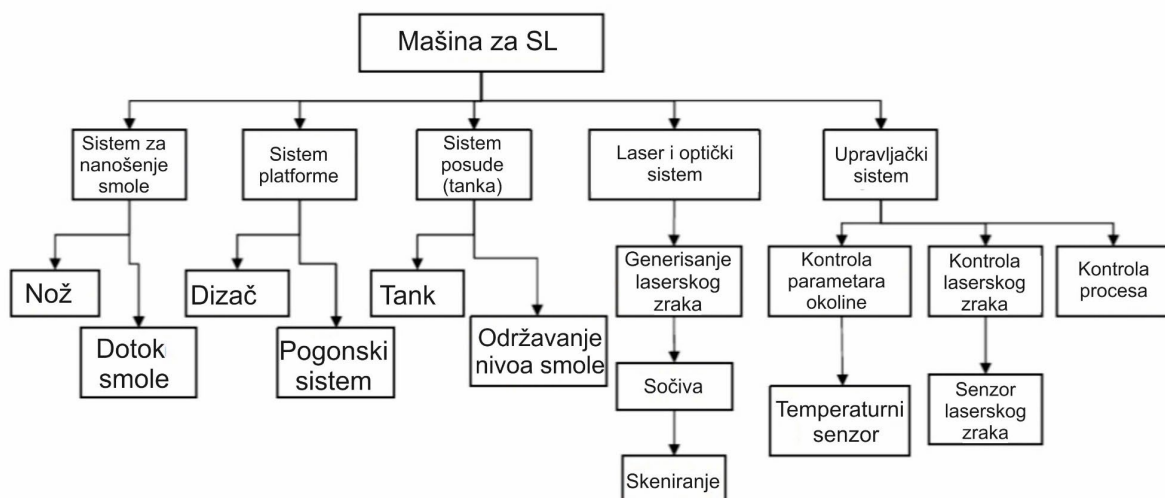
Međutim sistem ima i svojih nedostataka. Kao prvi se može navesti da laserski zrak prolazi kroz dve transparentne čvrste površine (staklo na dnu uređaja i dno tanka-rezervoara sa fotoplimerom), koje se mogu zaprljati i dovesti do disperzije laserskog zraka. Ako se izrađuju veći i teški delovi, s obzirom da na njih deluje gravitacija, a „vise“ sa radne ploče, može doći do njihovog odvajanja usled loše athezije na ploču, sudara sa radnim delovima uređaja i oštećenja istog.



Slika 3.14 Potporne strukture kod a) sistema sa gornjim i b) sa donjim skeniranjem

3.3.1 Podsystemi SLA

Šema tipičnog SL uređaja prikazana je na slici 3.8, gde su prikazani glavni podsystemi, uključujući laser i optiku, platformu i podizač, itd. Hijerarhija mašinskog podsystema data je na slici 3.15. Uočava se da mašina ima pet glavnih podsystema: sistem nanošenja fotoplimerom, sistem platforme, sistem tanka (posude), laserski i optički sistem i upravljački sistem.



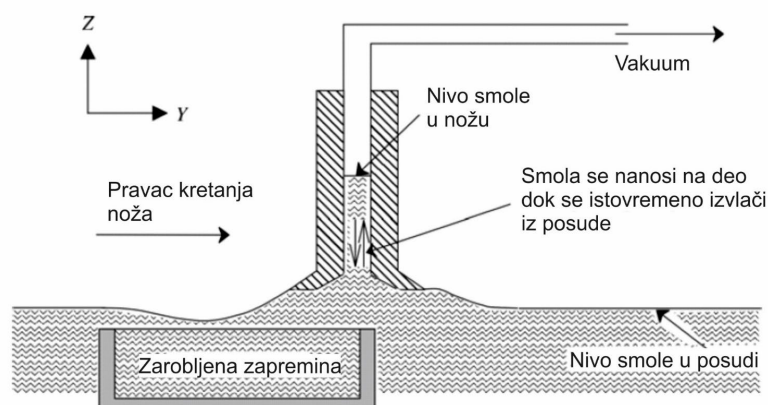
Slika 3.15 Hijerarhija mašinskog podsystema

Obično se nanošenje vrši pomoću posebnog mehanizma sa oštricom. Proces SLA se može opisati na sledeći način:

Nakon što je sloj očvrstnut, platforma se spušta za debljinu sloja.

Nož za nanošenje prelazi preko čitave površine i nanosi novi sloj fotopolimer i izravnava površinu fotopolimera u tanku.

Uobičajen nož za nanošenje fotopolimera predstavlja šuplju oštricu koja je ispunjena fotopolimerom (slika 3.16). Vakuumski sistem uvlači fotopolimer u oštricu iz posude i zadržava je u šupljini noža. Kako se sečivo prenosi preko posude da bi se izvršilo ponovno nanošenje, fotopolimer se nanosi u oblastima gde je očvrstnuti prethodni presek dela. Kada oštrica naiđe na oblast u posudi bez fotopolimera (najčešće očvrstnuta površina, jer fotopolimer nije dovoljno viskozna da bez spoljašnjih uticaja prekrije celu površinu), fotopolimer pada po toj oblasti, pošto je njena težina jača od sile vakuuma. Nož mora biti precizno poravnat i učvršćen kako bi se sprečila njegova kolizija sa prethodno očvrstnutim slojevima. Razmak noža (rastojanje između dna noža i površine fotopolimera) i brzina su važne varijable koje je potrebno kontrolisati.



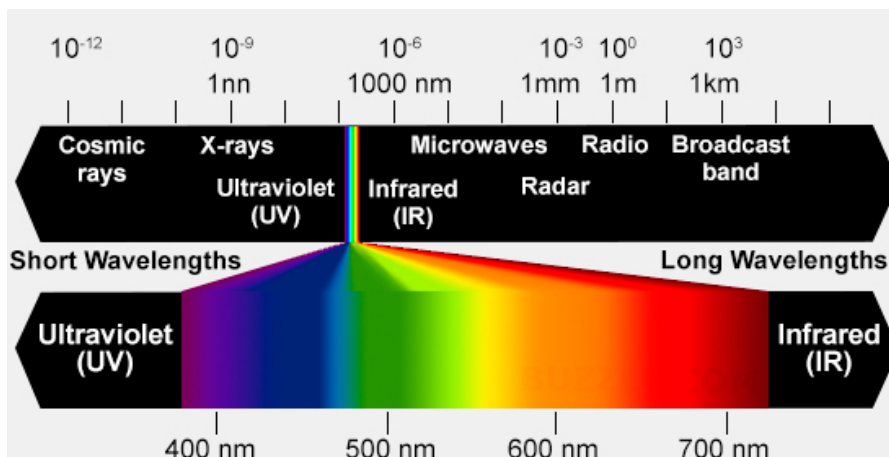
Slika 3.16 Nož za nanošenje fotopolimera sa vakuumskim sistemom

Sistem platforme se sastoji od radne platforme na kojoj se izrađuje deo i koja podržava deo i podizač koji spušta i podiže platformu. Podizač pokreće platformu pomoću navojnog vretena.

Sistem posude (tanka) za fotopolimer drži fotopolimer i u kombinaciji sa uređajem za podešavanje nivoa održava nivo fotopolimera konstantnim tako što tokom procesa vrši dopunu fotopolimera u tank. Ovaj sistem je izuzetno važan kod sistema sa donjim skeniranjem. Neki jeftiniji i jednostavniji uređaji nemaju ovaj sistem, već korisnik sam dosipa fotopolimer tokom procesa.

Glavni deo optičkog sistema predstavlja laser koji proizvodi zrak talasne dužine koja je u UV spektru. Na slici 3.17 prikazan je spektar elektromagnetnog zračenja u opsegu od 10^{-12} m do 1km, i označena je oblast vidljivog spektra (od 380nm do 750nm) kao i UV zračenja kom pripadaju talasne dužine od 100nm do 400nm. Osim lasera odnosno izvora UV svetla, optički sistem uključuje optiku za fokusiranje laserskog zraka i dva galvanometra koji omogućavaju brzo skeniranje površine fotopolimera laserskim zrakom. Moderni SLA uređaji imaju lasere sa čvrstim jezgrom koji imaju stabilnije karakteristike od svojih prethodnika, gasnih lasera. SLA mašine iz 3D sistema imaju Nd-YO₄ lasere koji emituju zračenje na oko 1,062 nm talasne dužine (blizu

infracrvene). Dodatni optički uređaji tri puta smanjuje frekvenciju na 354 nm, u UV opsegu. Ovi laseri imaju relativno malu snagu, u opsegu od 0,1–1 W, u poređenju sa laserima koji se koriste u drugim aditivnim tehnologijama.



Slika 3.17 Spektar elektromagnetnog zračenja

Upravljački sistem se sastoji od tri glavna podsistema. Prvi, elektronska upravljačka jedinica kontroliše redosled operacija mašine. Ovo uključuje izvršavanje niza operacija koje su opisane u datoteci koja je pripremljena za određeni deo ili skup delova. Komande se šalju raznim podsistemima da bi se aktivirao nož za nanošenje, kao bi se podesio nivo fotopolimera ili promenila pozicija posude po z osi (debljina sloja), i aktivirao kontroler snopa. Senzori se koriste za detektovanje količine fotopolimera u tanku i za detektovanje sila na nožu za otkrivanje grešaka. Drugo, kontroler laserskog zraka pretvara opise operacija u radnje koje podešavaju prečnik tačke snopa, dubinu fokusa i brzinu skeniranja, i ima povratnu spregu sa sensorima koji daju povratne informacije. Treće, kontrolor okoline podešava temperaturu posude za fotopolimer i radne zapremine uređaja.

3.3.2. Tehnike laserskog skeniranja

Vrlo rano je uočeno da se neočvršli fotopolimer, prilikom naknadnog očvršćavanja u UV pećima, skuplja i za sobom povlači već očvrsnute delove, izazivajući pojavu unutrašnjih napona, kao i geometrijskih izobličenja u radnom predmetu. S obzirom da je vrlo važno da što veća zapremina fotopolimera bude očvrsnuta u toku procesiranja, razvijen je niz različitih tehnika za lasersko skeniranje. Svaka naredna tehnika je bila pokušaj da se isprave nedostaci koji su uočeni kod prethodnih.

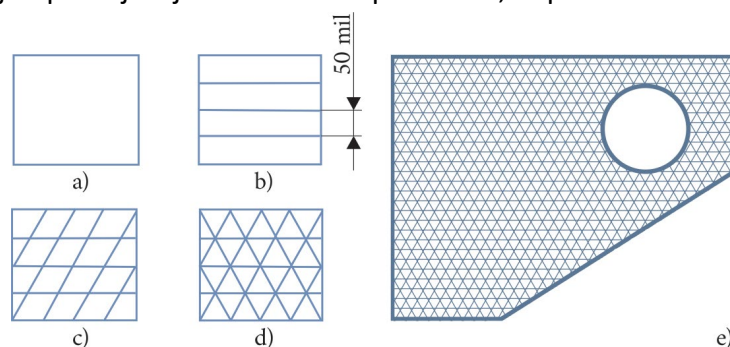
U nastavku su predstavljene sledeće tehnike za lasersko skeniranje:

- TriHatch;
- Weave;
- STAR-Weave;
- ACES;

Važno je zapaziti da su metode TriHatch, Weave i STAR-Weave korišćene za skeniranje starijih, akrilatnih formulacija fotopolimera, dok su ACES i QuickCast metode prilagođene novijim, epoksidnim formulacijama, koje imaju znatno manje skupljanje prilikom očvršćavanja.

3.3.2.1 TriHatch

TriHatch metoda za skeniranje zasnivala se na šrafiranju poprečnog preseka radnog predmeta (sl. 3.18a) laserskim zrakom, povlačenjem vektora horizontalno (sl. 3.18b) i pod uglom od 60° (sl. 3.18c) i 120° (sl. 3.18d) u odnosu na X osu. Rastojanje između vektora iznosilo je 50 mil (1.25 mm) i na taj način je očvrsnuta površina skeniranog poprečnog preseka izgledala kao mreža minijaturnih jednakokraničnih trouglova (sl. 3.18d,e). Delovi očvrnuti primenom ove tehnologije sadržali su oko 50% očvrstlog polimera, a ostatak je očvršćavao naknadno, u UV pećima. Ovo je rezultovalo pojavom unutrašnjih napona, vitoperenjem radnog predmeta i nedovoljnim kvalitetom vertikalnih površina. Uprkos svojim nedostacima, TriHatch tehnika je predstavljala značajno poboljšanje u odnosu na prvobitne, improvizovane tehnike skeniranja.



Slika 3.18 Šema TriHatch tehnike za lasersko skeniranje: (a) bordura, (b) skeniranje pod uglom 0° , (c) skeniranje pod uglom 60° , (d) skeniranje pod uglom 120° , (e) geometrija sa kompletnom šrafurom.

3.3.2.2 Weave

Dalji razvoj laserskog skeniranja doveo je do pojave Weave tehnike. Ova tehnika je prvenstveno imala za cilj da smanji procenat neočvrstnog polimera, a time i naknadnu pojavu unutrašnjih napona. Weave je nastao kao posledica uočavanja dve značajne pojave:

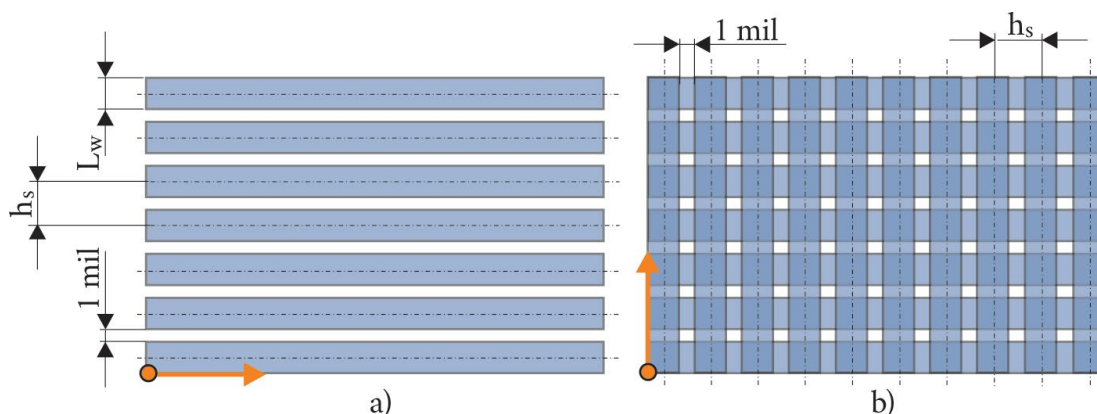
Zaostali naponi su direktno proporcionalni zapremini neočvrstlog fotopolimera zaostalog po završetku izrade radnog predmeta na mašini;

Skupljanje očvrstlog fotopolimera fazno kasni za laserskom ekspozicijom i to vreme kašnjenja treba uzeti u obzir prilikom skeniranja. Iz navedenih razloga, osnovna ideja Weave tehnike skeniranja polazi od sledećeg:

Potrebno je međusobno razdvojiti linije skeniranja u horizontalnoj ravni (tj. u tekućem sloju), kako prilikom očvršćavanja ne bi došlo do međusobnog povlačenja slojeva i do pojave unutrašnjih napona;

Iz istog razloga je, u vertikalnom pravcu, potrebno odvojiti sloj koji očvršćava, od već očvrstlog sloja koji se nalazi ispod njega.

Prema tome, Weave metoda se zasniva na laserskom skeniranju mreže međusobno ortogonalnih vektora, najpre u pravcu X ose, sleva - nadesno (sl. 3.19a), a potom u pravcu Y ose (od dole - nagore) (sl. 3.19b), pri čemu se svaki pravac skenira u dva prolaza. U prvom prolazu skeniranje se izvodi najpre u pravcu X, a zatim i u pravcu Y ose. Pri tom je obezbeđen razmak od 1 mil (0.025 mm) između susednih tragova skeniranja. Kada je u pitanju razdvajanje u vertikalnom pravcu, u prvom prolazu, dubina očvršćavanja je manja od potrebne, približno za 1 mil. Na taj način se smanjuje pojava unutrašnjih napona, jer u toku očvršćavanja, naredni sloj ne povlači prethodno očvrstnuti sloj usled skraćivanja, budući da ih razdvaja sloj tečnog fotopolimera.



Slika 3.19 Šema Weave metode skeniranja u XY ravni; (a) horizontalno skeniranje kreće iz donjeg levog ugla, udesno; (b) po završetku hor. skeniranja, vertikalno skeniranje takođe kreće iz donjeg levog ugla, nagore; L_w - širina staze očvrstnute u jednom prolazu; h_s – korak šrafure.

Weave tehnika skeniranja je omogućila znatno bolje očvršćavanje – oko 99% očvrstlog polimera na površini poprečnog preseka i oko 96% po zapremini. Ovim su smanjene netačnosti i povišena je produktivnost postupka. Smanjivši distorziju radnog predmeta usled unutrašnjih napona, *Weave* je omogućio kvalitetniji postupak. Međutim, unutrašnji naponi su još uvek bili prisutni, uz pojavu mikro i makrofisura na random predmetu i izobličenja koje nije zavisilo od polimera, snage lasera ili debljine sloja.

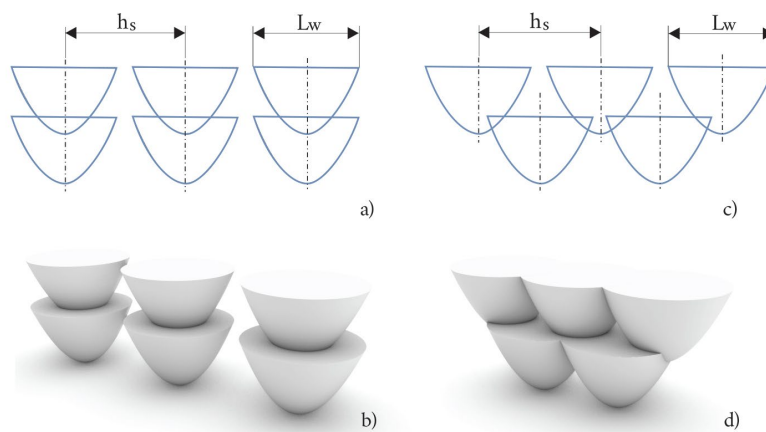
3.3.2.3. STAR-Weave

STAR-Weave je nastao kao odgovor na probleme koji su uočeni kod primene Weave tehnologije. STAR je akronim od početnih slova triju tehnika koje su doprinele poboljšanju u odnosu na klasičan Weave:

STaggered hatch + Alternate sequencing + Retracted hatch.

Smaknuto šrafiranje (Staggered hatch) – za razliku od Weave tehnologije koja je slojeve očvršćavala kao što je prikazano na slikama 3.20a,b, smaknuto šrafiranje (sl. 3.20c,d) je omogućilo

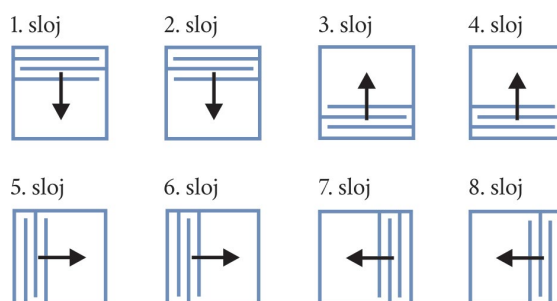
bolje međusobno vezivanje očvrsljih slojeva, čime je efektivno smanjena vertikalna zapremina neočvrstlog polimera i eliminisana je pojava mikrofisura.



Slika 3.20 Šematski prikaz očvršćavanja, u vertikalnoj presečnoj ravni, dobijen primenom: WEAVE (a, b) i STAR-WEAVE (c, d) tehnikom laserskog skeniranja.

Naizmenično smenjivanje (Alternate sequencing) – pojava unutrašnjih napona dodatno je umanjena primenom naizmeničnog smenjivanja redosleda i smera ispisivanja vektora po poprečnom preseku radnog predmeta. Tehnika podrazumeva da se, od sloja do sloja, naizmenično smenjuju redosled povlačenja vektora u pravcu X i Y osa, kao i njihovi smerovi. Na slici 3.21 se vidi da na taj način nastaje osam različitih šema za skeniranje, tj. ista šema se ponavlja u svakom devetom sloju. Ove varijacije uravnotežuju unutrašnje napone koji su karakteristični za Weave tehniku skeniranja.

Poslednja novina STAR-Weave tehnike za skeniranje, jeste skraćeno šrafiranje (Retracted hatch) (sl. 3.21). Najpre se očvršćavaju bordure, a zatim se skenira unutrašnjost. Vitoperenje radnog predmeta zbog unutrašnjih napona, znatno je umanjeno, jer vektori koji se povlače u horizontalnom ili vertikalnom pravcu, kreću od jedne ivice bordure, ali se na drugoj strani završavaju 1 mil pre nego što se spoje sa bordurom.



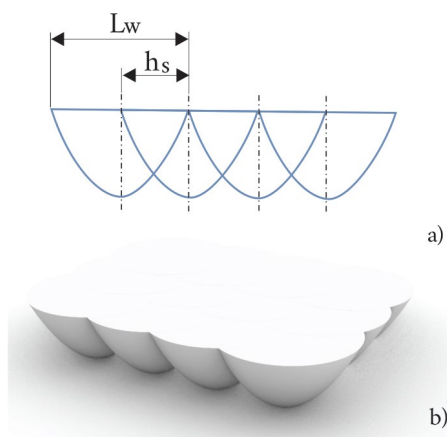
Slika 3.21 Osam karakterističnih šema skeniranja koje se koriste u okviru STAR-Weave tehnike skeniranja

Ukoliko bi horizontalni vektori išli od ivice do ivice, tada bi usled hlađenja i skupljanja očvrstlog materijala došlo do povlačenja paralelnih ivica bordura prema unutrašnjosti preseka.

Naizmenično skraćeni šrafiranjem vrši se delimično poništavanje unutrašnjih napona i značajno se smanjuje deformisanje dela usled ove pojave.

3.3.2.4 ACES (Accurate Clear Epoxy Solid)

ACES je nastao početkom devedesetih godina prošlog veka, sa namerom da omogući efikasno očvršćavanje fotopolimera na bazi epoksida. ACES omogućava zapreminsko očvršćavanje od 98%, što još više smanjuje skupljanje u fazi naknadnog očvršćavanja, u toku postprocesiranja, a time i pojavu unutrašnjih napona i vitoperenje radnog predmeta. U odnosu na Weave i STAR-Weave tehnike, ACES omogućava znatno veću kontrolu parametara koji su kritični za proces očvršćavanja fotopolimera. Za razliku od Weave/STAR-Weave tehnika, kod kojih je rastojanje između dva susedna vektora skeniranja fiksno i iznosi 1 mil, ACES omogućava korisniku da podesi delimično preklapanje očvrslih putanja, čak do 50% (sl. 3.22). Ovo je moguće zato što epoksidne formulacije karakteriše manje skupljanje od akrilatnih formulacija, pa preklapanje vektora skeniranja ne dovodi do izražene pojave unutrašnjih napona. Na ovaj način se povećava procenat očvrstlog fotopolimera. Kao i Weave/STAR-Weave tehnike, ACES takođe izvodi očvršćavanje u dva prolaza, u pravcu Z ose.

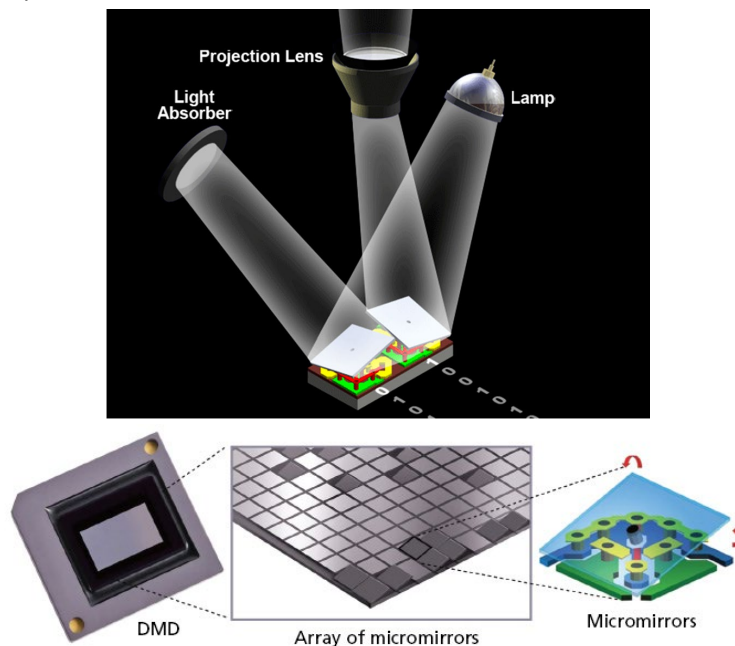


Slika 3.22 ACES tehnika laserskog skeniranja omogućava preklapanje vektora (h_s) skeniranja i do 50%.

3.5. Osvetljavanje primenom DLP projektor

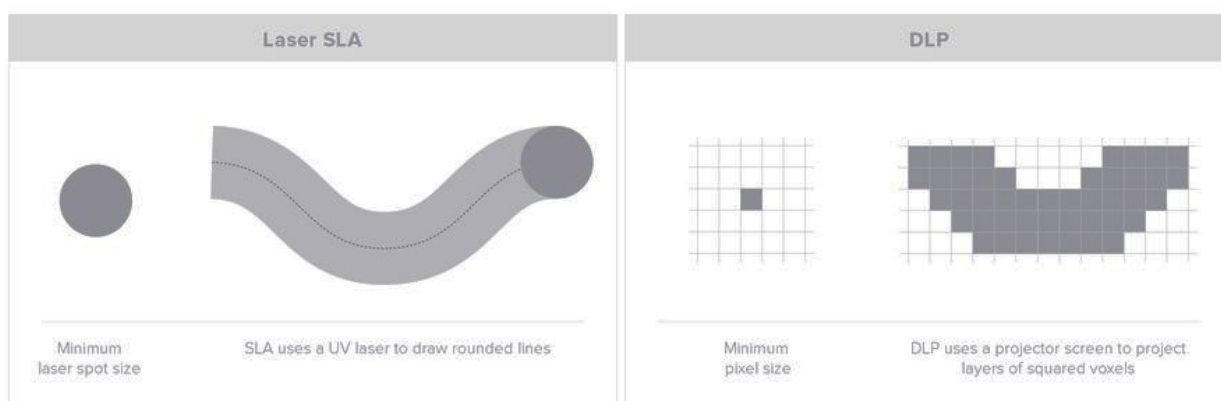
Tehnologije za projektovanje slike na površinu fotopolimera, kako bi sloj očvrstnuo odjednom, prvi put je razvijena početkom devedesetih godina prošlog veka od strane istraživača koji su želeli da razviju specijalne SLA mašine za izradu delova mikroskopa. Glavna prednost metoda projektovanja maski je brzina, budući da ceo poprečni presek dela može očvrstnuti odjednom. Generalno posmatrano on je brži od vektorskog skeniranja laserskim snopom. Projekcija UV svetlosti se može realizovati putem LCD ekrana, prostornim modulatorima svetlosti ili DMD-ovima (Digital Micromirror Devices)- Najčešće korišćeni DMD sistemi se sastoje od panela određene rezolucije (npr 1024x768), koji se sastoji od mikroogledala raspoređenih u zadatoj rezoluciji. Mikroogledala su od aluminijumskih prevlaka i generalno imaju dva uglovna položaja, najčešće $\pm 10^\circ$ ili $\pm 12^\circ$. U jednom položaju (npr. $+10^\circ$) ogledalo odbija svetlo ka fotopolimeru dok u

drugom položaju (npr. -10^0) odbija svetlo ka absorberu. Na taj način se projektuje tačno zadata putanja očvršćavanja za dati sloj. Absorber je napravljen od materijala koji ne vrši odbijanje zraka, kako slučajno odbijeni zrak ka fotopolimeru ne bi izazvao grešku u modelu, nego ih u potpunosti apsorbuje (slika 3.25).



Slika 3.25 DMD sistem

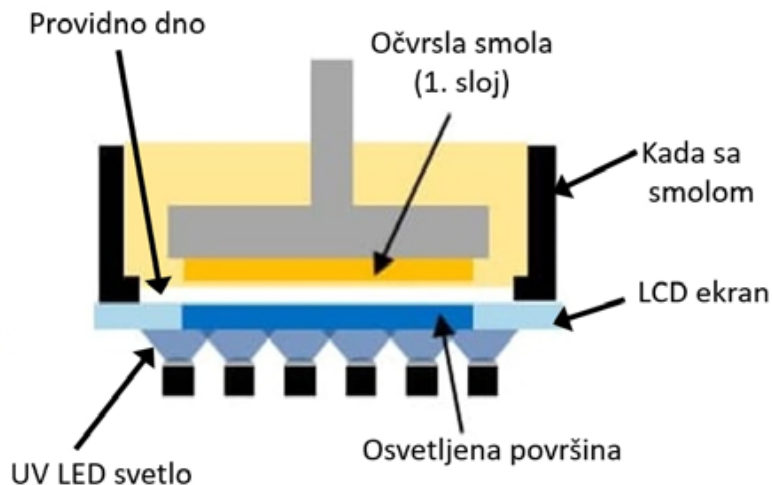
Iako je kod ovog sistema brzina izrade delova veća nego kod lasera, zbog rezolucije slike svaka kriva površina je aproksimirana nizom piksela, dok kod laserskog sistema je kriva površina skenirana bez aproksimacije po tačnoj krivoj (slika 3.26)



Slika 3.26 Razlika u izradi krivih linija kod lasera i DLP

3.6 LCD fotomaskiranje - MSLA

U odnosu na prethodna dva postupka ovi uređaji ne koriste laser, ogledala i projektor već se štampanje izvodi pomoću LCD ekrana (maske) koji se nalazi iznad izvora UV svetla (slika 3.27).

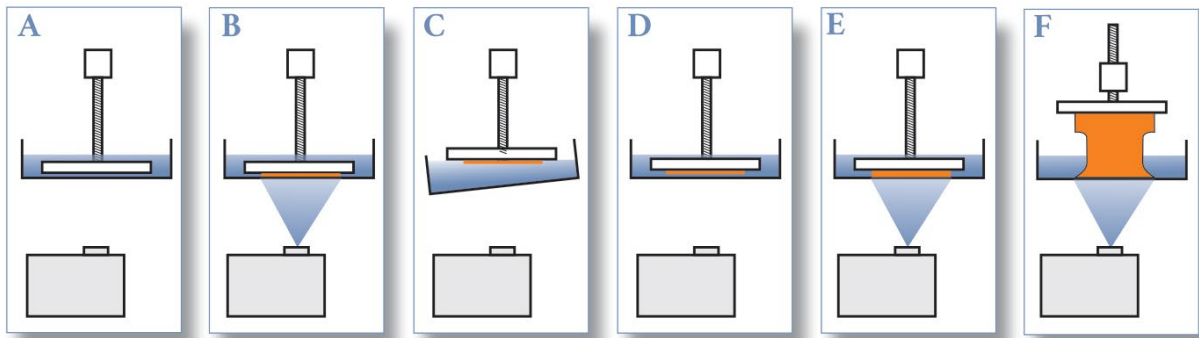


Slika 3.27 Principijelna šema MSLA tehnologije [11]

Iznad LCD ekrana nalazi se kada sa fotopolimerom. LCD ekran formira željeni oblik konture isključivanjem pojedinačnih piksela na kojima je potrebno očvršnuti fotopolimer, dok ostali pikseli ostaju osvetljeni. Uređaj obično poseduje matricno raspoređene LED sijalice koje se nalaze ispod LCD ekrana, a njihovo svetlost može prolaziti samo kroz piksele koji su deaktivirani. Svetlost koja prolazi kroz deaktivirane piksele vrši očvršćavanje fotopolimera. Radna ploča, na kojoj se izvodi štampanje, se nakon očvršćavanja podiže za debljinu jednog sloja očvršćavanja do kompletne izrade dela.

Kao i kod DLP postupka i ovde je najveća prednost brzina štampanja u odnosu na SLA postupak. Međutim, nedostaci ovog postupka su manja tačnost izrade u odnosu na SLA postupak zbog korišćenja LCD ekrana, koji se sastoji od pojedinačnih piksela, i nemogućnosti dobijanja krivih glatkih površina (*slika 3.27*), takođe svetlost koja potiče od LED sijalice vremenom oštećuje LCD ekran tako da on praktično postaje potrošna roba. Sa druge strane Za razliku od DLP SLA, ovde je horizontalna rezolucija 3Dštampefiksna i zavisi od rezolucije LCD ekrana, a ne od oštine zumiranja na pojedine delove radne ploče, što je slučaj kod primene DLP projektora.

Ključni koraci u procesu stereolitografije osvetljavanjem kompletnog sloja, prikazani su na slici 3.27. U prvom koraku (A), radna platforma se spušta u plitku kadu sa tečnim fotopolimerom, tako da između nje i staklene ploče na dnu, ostane debljina jednog sloja, što može iznositi od 0.025 mm do 0.1 mm. Zatim DLP projektor osvjetljava i očvršćava sloj (B), a u narednom koraku kada pravi vertikalni otklon (C). Na ovaj način se obezbeđuje sigurno odvajanje očvršnutog sloja od staklene ploče na dnu kade. Platforma se spušta inkrementalno, ponovo ostavljajući debljinu jednog sloja između površine očvršlog fotopolimera i staklene ploče na dnu kade (D). Nakon toga sledi osvetljavanje i očvršćavanje narednog sloja (E). Postupak se ponavlja sve do završetka izrade radnog predmeta (F). Prosečno vreme izrade jednog sloja iznosi 8 do 10 sekundi, a vertikalna brzina gradnje iznosi približno 19 mm/h.



Slika 3.27 Faze DLP SLA postupka koji koristi osvetljavanje kompletnog sloja.

3.5 Prednosti i nedostaci SLA

Prednosti:

- Brzina
- Preciznost
- Visok kvalitet površine
- Širok spektar materijala
- Mogućnosti izrade tankih slojeva (0,05-0,15mm)
- Visoka proizvodnost
- Velike dimenzije radnog prostora (mamut SLA)

Nedostaci:

- Visoka cena materijala
- Postprocesiranje - naknadno umrežavanje fotopolimera
- Potrebna potporna struktura
- Problem skladištenja materijala
- Zarobljena tečnost kod skeniranja sa gornje strane

Kao literatura za ovo poglavlje korišćena su poglavlja iz:

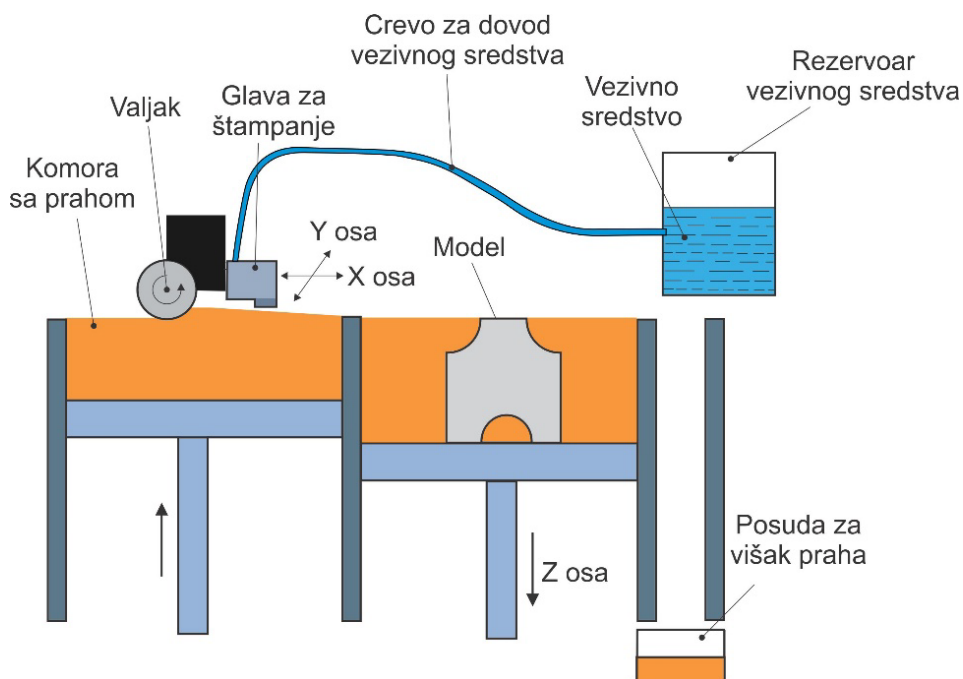
1. Knjiga: 3D štampa, Ognjan Lužanin, Novi Sad, 2019.
2. Knjiga: Additive Manufacturing Technologies, I. Gibson | D. W. Rosen | B. Stucker, New York, 2010.

4. VEZIVNA 3D ŠTAMPA

4.1 Osnove procesa

Vezivna 3D štampa je postupak koji je razvijen na Massachusetts Institute of Technology (MIT) 1989. i predstavlja jedan od prvih procesa brze izrade prototipova koji je razvijen. Zbog sličnosti sa ink-jet štampom vrlo često se u literaturi može pronaći i naziv ink-jet 3D štampa. Razlika u odnosu na klasičnu ink-jet štampu je ta što se umesto mastila kroz glavu štampača izbacuje vezivno sredstvo (en. binder) koje se deponuje na praškastu osnovu. Na slici 5.1 šematski je prikazan uređaj za vezivnu 3D štampu sa osnovnim elementima.

U početku svog razvoja postupak se koristio samo za tzv. „proof of concept“, međutim, sa daljim razvojem materijala i tehnika, koji traje i danas, delovi dobijeni na ovaj način se koriste do nivoa finalnog proizvoda.



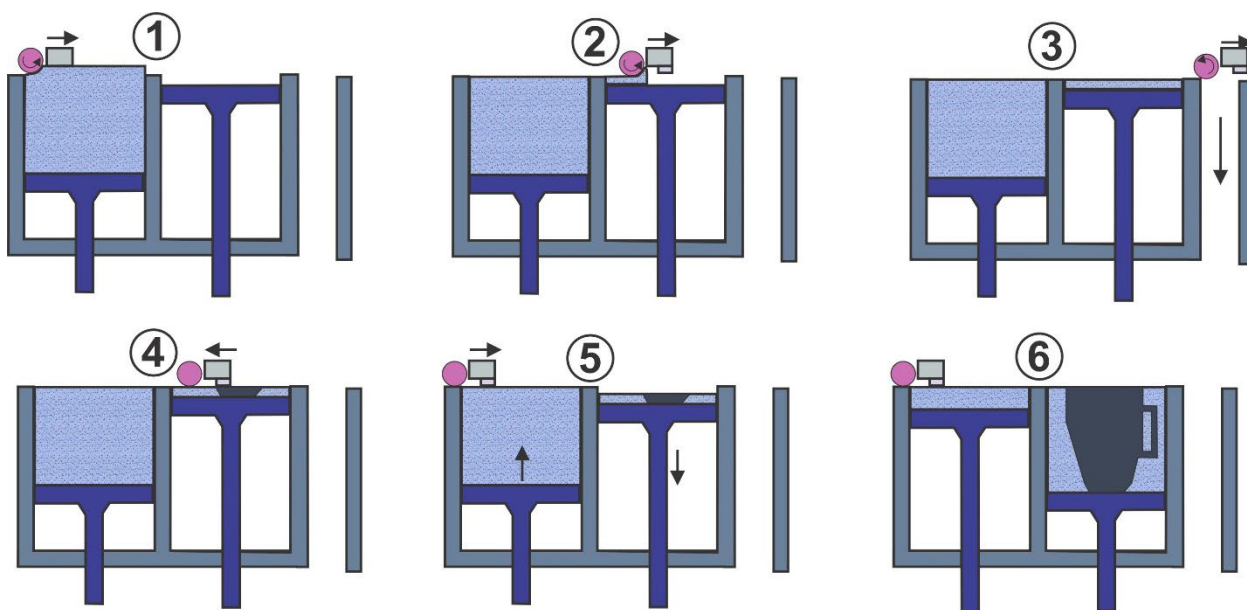
Slika 4.1 Osnovni delovi uređaja za vezivnu 3D štampu

Princip funkcionisanja uređaja prikazan je na slici 4.2. Valjak za nanošenje i raspoređivanje praha zajedno sa glavom za štampanje se kreće od komore sa prahom, koja je podignuta u odnosu na njega po z osi (slika 4.2-1), dok je komora modela spušta za debljinu sloja (slika 4.2-2). Radi što ravnomernijeg raspoređivanja i što bolje kompaksije praha u komori za izradu modela, komora sa prahom se podiže za 30% više u odnosu na zadatu debljinu sloja. Višak praha se rasipa u manjoj meri s strane komore dok veći deo pada u posudu za višak praha koja se nalazi u krajnjem položaju valjka (slika 4.2-3). Prah iz posude za višak se kasnije ponovo vraća u proces.

Nakon nanošenja sloja valjak sa glavom se vraća ka početnoj poziciji pri čemu glava vrši štampanje tekućeg sloja (slika 4.2-4). Upravljanjem glave se vrši preko upravljačkog programa izrađenog na osnovu 3D računarskog modela (CAD modela). Vezivno sredstvo omogućava spajanje čestica praha kako u tekućem sloju tako i spajanje dva susedna sloja. Kako bi prodiranje vezivnog sredstva do prethodno odštampanog sloja bilo potpuno, odnosno da bi bilo omogućeno spajanje susednih slojeva, bitno je obezbediti tačnost debljine sloja, a to se postiže rotacijom valjka za raspoređivanje praha u suprotnom smeru od pravolinijskog smera kretanja.

Vraćanjem valjka sa glavom u početni položaj, komora sa modelom se spušta za zadatu debljinu sloja, koja zavisi od vrste praha i odabira operatera i obično je 0,1 ili 0,0875 mm. Istovremeno se komora sa prahom podiže (slika 4.2-5) i proces se ponavlja sve dok kompletan deo ne bude izrađen (slika 4.2-6).

Nakon završenog procesa deo se ostavlja u prahu minimalno sat vremena (ako je model suviše tanak ili velikih dimenzija i duže) radi sušenja vezivnog sredstva i postizanja dovoljne čvrstoće radi bezbednog uklanjanja iz radne komore.



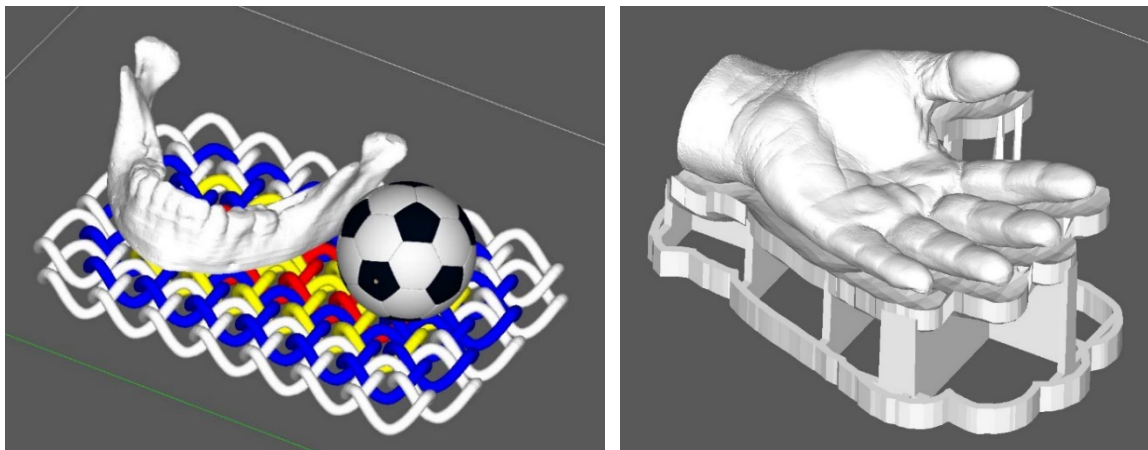
Slika 4.2 Proces vezivne 3D štampe

Model se vadi iz radne komore štampača korišćenjem različitih dodataka za usisivač, kompresora, četke i drugog pomoćnog pribora, a zatim se prebacuje u reciklator, koji predstavlja zatvorenu

komoru u kojoj se višak praha uklanja uz pomoć struje vazduha. Uklonjeni prah se usisava i nakon prosejavanja kroz sita određene granulacije ponovo vraća u proces.

S obzirom da je tokom štampe ceo model okružen prahom u slučaju konzolnih elemenata (prepusta) nisu potrebne potpore (oslonci) jer je neočvršli prah dovoljno kompaktno (sabijen) i vrši ulogu oslonaca tokom procesa. Ova osobina omogućava izradu velikog broja delova istovremeno koji se nalaze jedan iznad drugog u radnom prostoru mašine (slika 4.3a). U slučaju prepusta veće zapremine ili mase moguće je koristiti dodatne oslonce koji se automatski generišu u softveru za preprocesiranje (slika 4.3b) i koji sprečavaju eventualno naginjanje modela usled sopstvene težine.

Modeli su neposredno nakon štampe kruti, loših mehaničkih osobina, vrlo porozni i osetljivi na vlagu i nazivaju se zeleni delovi (eng *Green Parts*). Za postizanje željenih mehaničkih karakteristika modela vrši se infiltracija.

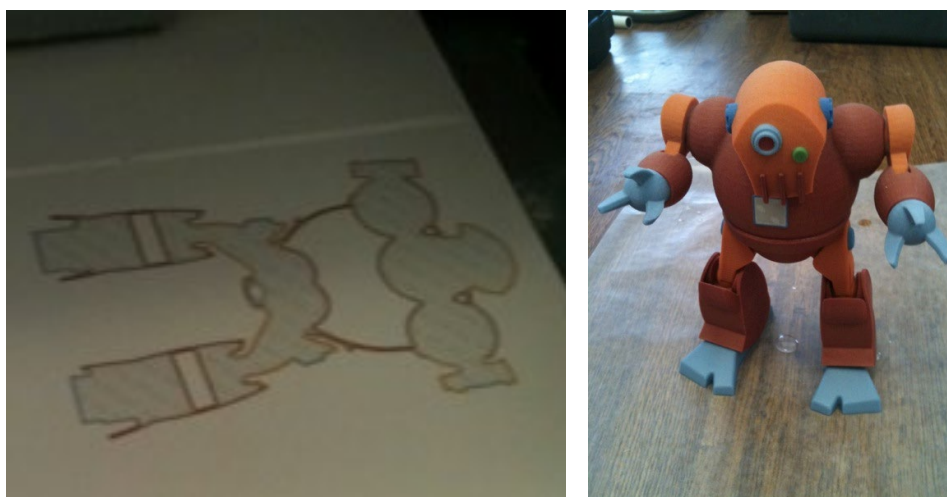


a)

b)

Slika 4.3 Priprema modela a) generisanje oslonaca, b) štampanje više modela istovremeno

Osnovna prednost procesa vezivne 3D štampe u odnosu na ostale tehnologije za AM jeste mogućnost štampanja u boji koristeći principe klasične ink-jet štampe. Kao i kod ink-jet štampača uređaj za vezivnu 3D štampu u boji poseduje više glava (CMYK metod: *cyan, magenta, yellow, black*) čijom kombinacijom može da se dobije preko 1 000 000 boja (slika 4.4a). Boja se radi uštede nanosi samo u spoljašnji sloj (borduru) modela dok se za unutrašnjost modela koristi čisto vezivno sredstvo (slika 4.4b).



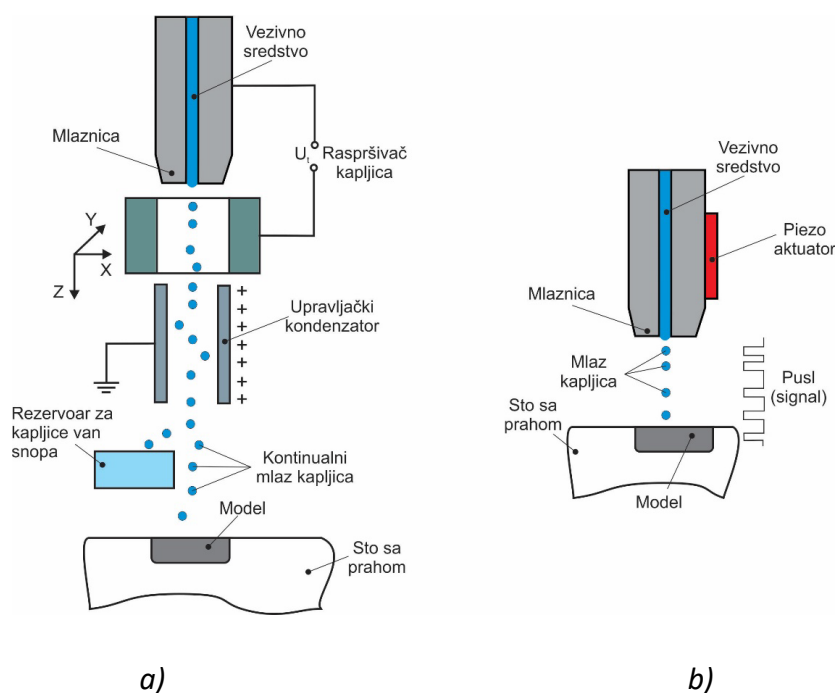
a)

b)

Slika 4.4 Vezivna 3D štampa u boji a) prikaz jednog sloja i b) izrađen deo

4.2 Inkžet sistemi u vezivnoj 3D štampi

Postoje dve vrste ink-jet glava za štampače koje se razlikuju po načinu dobijanja struje mastila, odnosno veziva. Prvi princip je takozvani kontinualni metod (en *Continous Method*) gde se za stvaranje kapljica mastila koristi pritisak (najčešće stvoren ultrazvukom) koji mastilo dovodi do mlaznica iz kojih izlazi u obliku kapljica (slika 4.5 a). Ovaj princip ima određenih ograničenja zbog problema sa rasipanjem mastila ili veziva (stvaraju se i kapljice van snopa koje se hvataju u poseban rezervoar) i problemom da tečnost koja prolazi kroz glavu mora biti naelektrisana, jer se za usmeravanje mlaza koriste visokonaponske ploče (elektrode).



a)

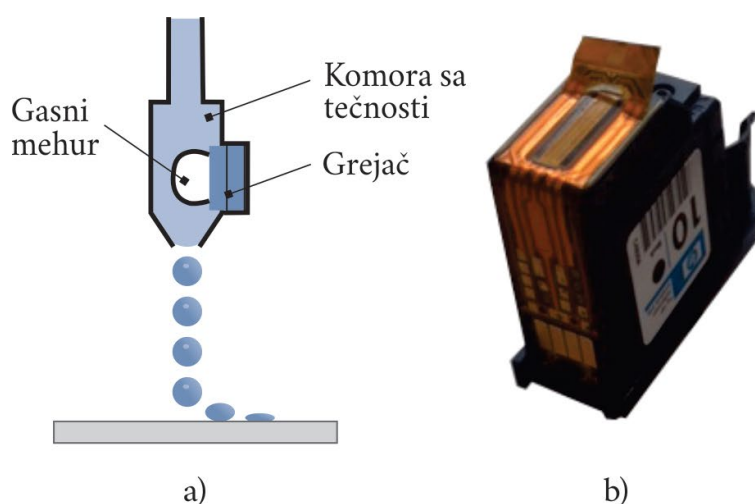
b)

Slika 4.5 Princip rada ink-jet glave a) kontinualni metod b) DOD

Drugi princip koji se koristi je tzv. kapljica na zahtev (en **Drop-on-Demand Mode DOD**). DOD varijanta glave za ink-jet štampanje funkcioniše na principu individualnih kapi proizvedenih direktno u mlaznici. Pojedinačne kapljice mastila (veziva) stvaraju se pomoću impulsa dobijenih pomoću piezoelektričnih, termalnih, akustičnih ili drugih aktuatora . Na slici 4.5 b prikazan je šematski princip rada ove vrste glave za štampanje. Veličina kapljica stvorena ovim metodom kreće se od 25 do 120 μm , a broj kapljica kreće se od 0-2000 u sekundi. U današnje vreme najviše se primenjuju termalni i piezoelektrični aktuatori za stvaranje impulsa. Termalni aktuatori funkcionišu na principu otpornika koji greje rezervoar sa mastilom koje se širi i izbacuje kapljice kroz mlaznicu. Piezoelektrični aktuatori koriste deformaciju piezo elementa koji se skuplja i širi. Prilikom skupljanja elementa dolazi do smanjenja dimenzija rezervoara i na taj način se kapljice izbacuju kroz mlaznicu. U odnosu na kontinualni način pri DOD principu se mogu stvoriti kapljice manjeg prečnika koje se preciznije deponuju na površinu praha. Kod DOD načina kao pogodniji izdvaja se piezo električni princip, jer kod termalnog načina stvaranja kapljica dolazi do grejanja koje može oštetiti osetljivije materijale.

3.2.1 Inkđzet sistemi sa termalnim aktuatorima

Mehanizmi sa termalnim (bubble-jet) aktuatorima (Thermal Ink-Jet - TIJ) raspolažu minijaturnim otpornicima, prečnika 50 μm na koje se dovodi električna struja (sl. 4.6a). Pošto su u neposrednom kontaktu sa tečnošću u rezervoaru, otpornici im predaju toplotu, dovodeći tečni interfejs na temperaturu od oko 300 $^{\circ}\text{C}$. Na osnovu toga dolazi do stvaranja i ekspanzije gasnog mehura, koji obezbeđuje energiju neophodnu za istiskivanje tečnosti kroz mlaznicu. Za odvijanje opisanog procesa potrebne su oko dve mikrosekunde, a kada kapljica napusti rezervoar, kroz otvor za dovod tečnosti stiže odgovarajuća zapremina nove tečnosti i proces može da bude ponovljen. Ispitivanja su pokazala da se tanak sloj tečnosti koji je u kontaktu sa grejačem, vraća na početnu temperaturu već nakon desetak mikrosekundi, dok se ukupnoj masi tečnosti u rezervoaru podiže temperatura za svega 4-10 $^{\circ}\text{C}$.

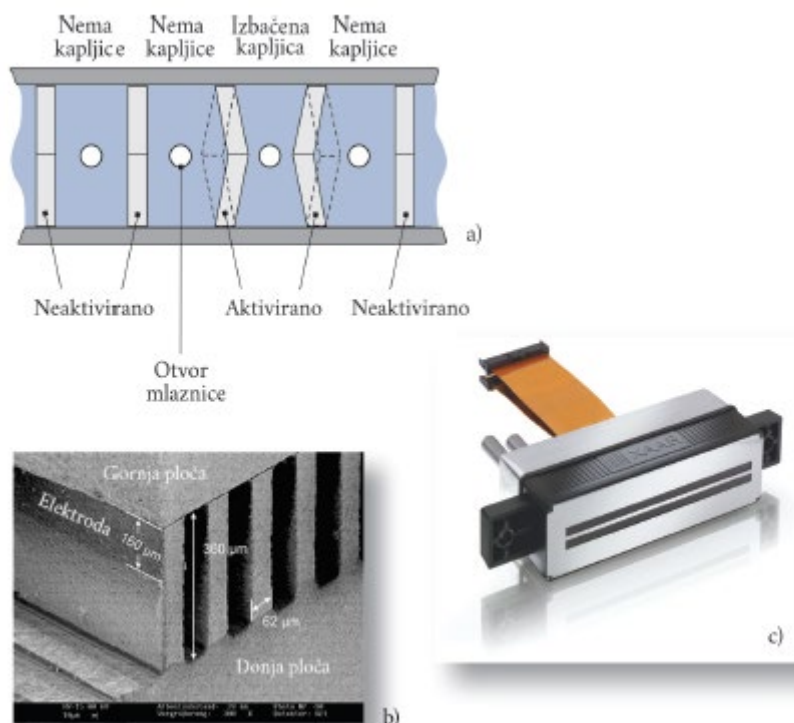


Slika 4.6 sistem sa termalnom aktivacijom, (b) inkđzet glava HP10 koja koristi termalnu aktivaciju

3.2.2 Inkdžet sistemi sa pijezelektričnim aktuatorima

Kod inkdžet glava sa pijezelektričnim aktuatorom¹, aktuatoru se dovodi pulsna pobuda, kako bi promenom oblika izazvao smanjenje zapremine u rezervoaru i istiskivanje tečnosti kroz mlaznicu (sl. 4.5b). Pretvarači napravljeni od olovo-cirkonattitanata (PZT) imaju izražena pijezelektrična svojstva i koriste se kao aktivna komponenta u velikom broju savremenih pijezelektričnih inkdžet glava. U makroskopskoj kristalnoj strukturi, dipoli su prirodno haotično orijentisani. Zato je, za pravilno funkcionisanje PZT pretvarača, bitno da se materijal fabrički dovede u stanje, u kojem dipoli imaju približno istu orijentaciju.

To se postiže tzv. polingom, procesom u kojem se PZT izlaže dejstvu jakog električnog polja, koje omogućava približno uniformnu orijentaciju dipola. Nakon polinga, PZT će imati izražen, anizotropan pijezelektrični efekat. Drugim rečima, trpeće istezanje ili smicanje, u zavisnosti od orijentacije električnog polja čijem je dejstvu izložen. S tim u vezi, na slici 4.7a šematski je prikazan princip funkcionisanja sistema kod kojeg se pobuda odvija na principu deljenja smičućih zidova (shared-wall shearmode actuation). Mlaznice se nalaze u komorama koje međusobno dele po jedan zid. Svaki zid komore je snabdeven po jednom elektrodom (slika 4.7b), kojoj se dovodi napon prema potrebi, kako bi izazvala smicanje zida. Do opaljivanja mlaznice doći će samo ako su oba zida pripadajuće komore aktivirana istovremeno (slika 4.7a), što znači da u toku aktivnosti jedne mlaznice, ostale miruju. Na slici 4.7c je prikazana savremena inkdžet glava koja koristi ovaj metod aktivacije.



Slika 4.7 Šematski prikaz DOD sistema sa aktivacijom na principu deljenja smičućih zidova

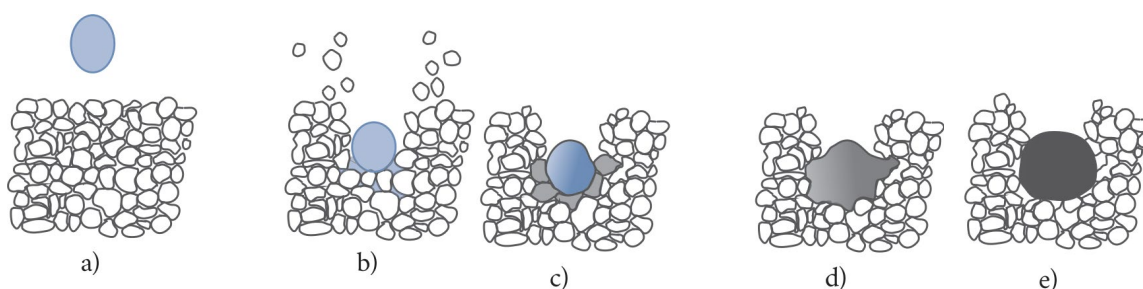
Sistemi sa pijezelektričnim aktuatorom imaju sledeće prednosti u odnosu na sisteme sa termalnim aktuatorom:

- Duži životni vek (otporniji su na rastvarače i kiselu sredinu);
- Niže brzine izbacivanja kapljica;
- Veća mogućnost kontrole prečnika i brzine kapljice.

S obzirom na navedene prednosti, u najsavremenijoj tehnologiji vezivne 3D štampe preovlađuju sistemi sa pijezelektričnom aktivacijom.

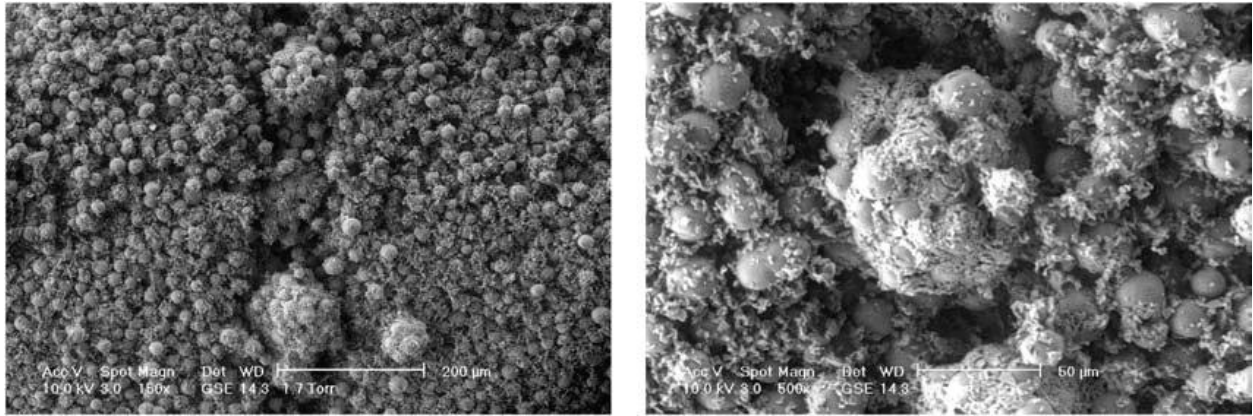
4.5 Mehanizam očvršćavanja praška - formiranje 3DP primitiva

Inkđet glava se kreće iznad praškastog supstrata brzinom od približno 1.5 m/sec. Vezivno sredstvo se deponuje u kapljicama čiji prosečan prečnik iznosi približno 80 μm , dok njihova vertikalna brzina kretanja iznosi 8-10 m/sec. Kapljice provode oko 2 ms u slobodnom padu (sl. 4.11a), pre nego što ostvare sudar sa površinom praškastog supstrata. Prilikom sudara kapljice vezivnog sredstva i praškastog supstrata dolazi do rasipanja kinetičke energije kapljice. Tom prilikom, usled balističkog efekta, dolazi do izbacivanja čestica praška i formiranja levkastog udubljenja (sl. 4.11b).



Slika 4.11 Faze formiranja 3DP primitiva: (a) kapljica vezivnog sredstva u slobodnom padu, (b) balistički udar, (c) migracija i rearanžiranje čestica, usled dejstva kapilarnog efekta, (d) ukupnjavanje aglomerata, (e) finalni oblik aglomerata koji približno odgovara sferi

Eksperimenti sa visokobrzinskom fotografijom pokazali su da približno 1 ms nakon sudara sa površinom supstrata, kapljica vezivnog sredstva prelazi iz približno sfernog, u približno cilindrični oblik. Nastupa početno srastanje čestica praška, a dobro kvašenje pogoduje pojavi jakih kapilarnih sila. Na taj način kapilarni efekat postaje primarni mehanizam za dalje kretanje - migraciju čestica i njihovo rearanžiranje, usled čega dolazi do smanjenja poroznosti (sl. 4.11c). Sve dok traje dejstvo kapilarnih sila, odvija se migracija čestica praška i dolazi do uvećavanja aglomerata₁ (sl. 4.11d). Radi postizanja minimuma površinske energije, nastali kapljično-čestični aglomerat poprima približno sferni oblik (sl. 4.11e). Ovako očvršli element, nastao u sudaru jedne kapljice sa površinom praškaste podloge, naziva se 3DP primitiv i predstavlja najjednostavniji očvršli element koji može nastati u procesu 3D štampe. Na slici 4.12 prikazano je formiranje aglomerata, približno sfernog oblika, usled interakcije pojedinačnih kapljica vezivnog sredstva koje deponuje DOD inkđet glava, i praškaste podloge. Kako je već rečeno, sferni oblik aglomerata nastaje usled težnje sistema za minimiziranjem površinske energije



Slika 4.12 SEM snimci na kojima se vide dva međusobno nepovezana 3DP primitiva (levo) i uvećani detalj 3DP primitiva (desno)

4.7 Prednosti i nedostaci postupka

Prednosti vezivne 3D štampe su:

- brzina rada,
- jednostavnost korišćenja uređaja,
- mali utrošak energije s obzirom da se proces odvija bez zagrevanja radne komore ili sa malim predgrevanjem na 38°C,
- materijali koji se koriste nisu štetni po zdravlje i okolinu,
- dobra tačnost modela,
- mogućnost štampanja modela u boji,
- recikliranje neupotrebljenog materijala,
- mogućnost štampanja velikih modela iz više delova i naknadno spajanje,
- mogućnost naknadne metalizacije izrađenih modela.

Kao nedostaci postupka mogu se navesti:

- ograničena funkcionalnost delova u odnosu na druge tehnologije za AM,
- ograničen izbor materijala,
- povišena hrapavost površine,
- potrebno vreme za čišćenje modela i infiltraciju.

4.8 Materijali

Bez obzira što je kao nedostatak naveden problem ograničene vrste dostupnih materijala postoji određeni broj komercijalno dostupnih prahova i odgovarajućih vezivnih sredstava. U tabeli 4.1 su dati komercijalni nazivi i vrste potrošnih materijala (prahova) najpoznatijeg proizvođača 3D štampanja firme 3D Systems (do 2011. Z Corporation).

Osim komercijalnih materijala prikazanih u tabeli 4.1 poslednjih godina razvijen je i veliki broj kako osnovnih materijala tako i vezivnih sredstava kao što su: kremički materijali, kompoziti sa metalnom matricom, biokompatibilni materijali itd.

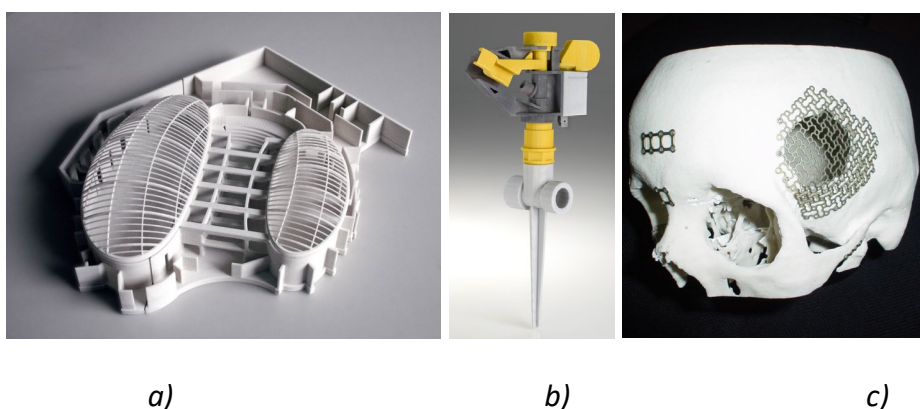
Tabela 4.1 Komercijalni materijali za vezivnu 3D štampu

Vrsta praha	Komercijalna oznaka
Kompozitni prah	zp 130, zp 131, zp140, VisiJet® PXL™
Prah za izradu kalupa za livenje	ZCast
Prah za izradu modela za precizno livenje	zp 14
Elastomerni materijal	zp 15e

4.9 Primena vezivne 3D štampe

Vezivna 3D štampa je s obzirom na jednostavnost uređaja, mogućnost izrade uređaja sa velikom dimenzijom radnog prostora i otvorenost sistema koji omogućava korišćenje raznih kako komercijalnih tako i nedeklarisanih materijala (kreiranih po sopstvenoj formulaciji) vrlo rasprostranjen postupak. Oblasti primene su praktično neograničene i isključivo zavise od vrste korišćenih materijala u procesu.

Vezivna 3D štampa svoju najveću primenu nalazi u oblasti izrade prototipova i delova u oblasti robe široke potrošnje, arhitekture, obrazovanja ali i medicine i industrije. Neki od primera primene vezivne 3D štampe dati su na slici 4.13.



Slika 4.13 Primeri primene vezivne 3D štampe u oblasti a) arhitekture, b) dizajna proizvoda široke potrošnje i c) medicine

Osim za izradu modela (funkcionalnih i konceptualnih) u poslednje vreme je vezivna 3D štampa svoju aplikaciju našla i u industriji. Tako je npr. američka firma ExOne™ razvila više tipova industrijskih uređaja visoke produktivnosti i gabarita (slika 4.14), koji pored mogućnosti izrade pešanih kalupa za livenje imaju i mogućnost izrade gotovih metalnih delova od keramike, nerđajućih čelika i drugih prahova sa metalnom osnovom. Kalupi za livenje su spremni za

korišćenje neposredno nakon izrade dok metalni delovi nakon štampe moraju proći fazu postprocesiranja (infiltraciju metalom) kako bi bili spremni za korišćenje.



a)

b)

Slika 4.14 Primena vezivne 3D štampe u industriji; a) industrijski uređaj i b) primer izrađenog metalnog dela

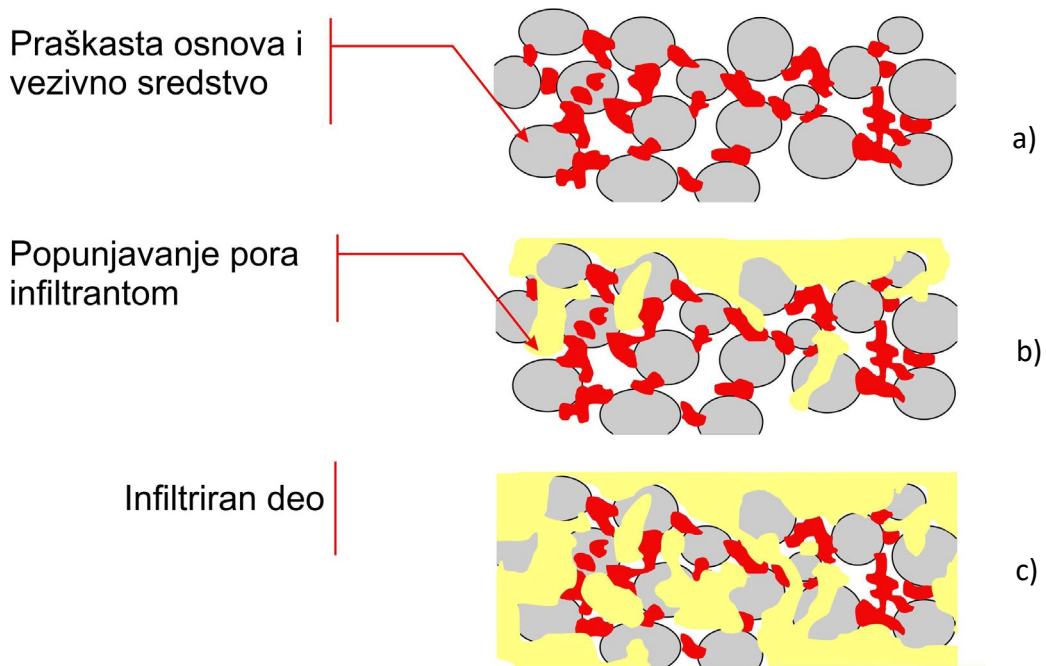
4.10 Proces infiltracije i načini infiltracije

Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, deo nakon 3D štampe predstavlja porozni deo vrlo slabih mehaničkih karakteristika i naziva se zeleni deo. Kako bi deo bio upotrebljiv za dalju primenu mora se pristupiti postprocesiranju.

Pod postprocesiranjem smatra se obrada delova nakon procesa vezivne 3D štampe radi postizanja njihovih finalnih mehaničkih karakteristika i postizanja verodostojnosti boja, ako je u pitanju štampa u boji. Ponekad se faza postprocesiranja izostavlja, npr. u slučajevima kada deo neće biti podvrgnut opterećenju.

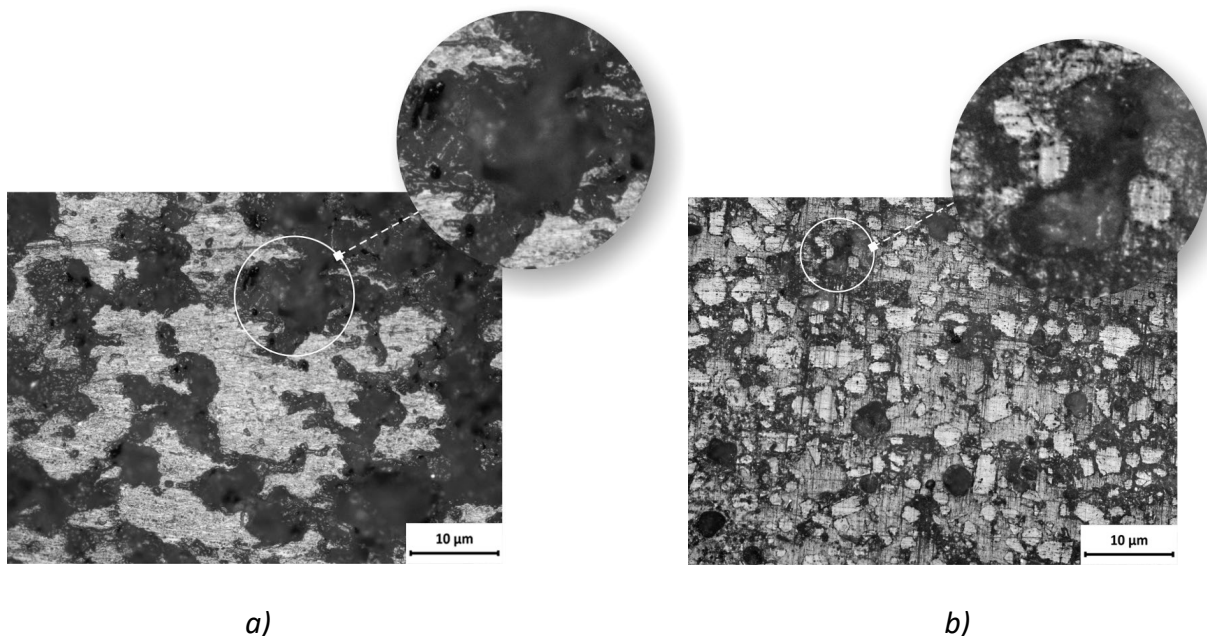
U procesu infiltracije cilj je omogućiti što većoj količini tečnog infiltranta da prodre u dubinu dela kako bi se dobile što bolje karakteristike, a to se najbolje postiže niskim koeficijentom viskoznosti infiltranta. Nizak koeficijent viskoznosti neki infiltranti poseduju na sobnoj temperaturi, dok kod nekih tipova infiltranata, npr. epoksidnih infiltranata i voskova, postizanje niskog koeficijenta viskoznosti se postiže zagrevanjem na određenu temperaturu.

Na slici 4.15 šematski je prikazan postupak infiltracije. Slika 4.15a prikazuje čestice praškaste osnove povezane vezivnim sredstvom gde je primetna velika poroznost. Prodiranje infiltranta u dubinu modela, tj. zamena vazdušnih pora infiltrantom prikazana je na slici 4.15b, dok je finalno prodiranje infiltranta do određene dubine prikazano je na slici 4.15c. Dubina infiltracije zavisi od vrste infiltranta, načina i parametara infiltracije (npr. temperature, vremena trajanja infiltracije, načina nanošenja infiltranta itd.)



Slika 4.15 Šema infiltracije

Razlika između infiltriranog i zelenog dela se može uočiti vizuelno ali je najuočljivija mikroskopskim pregledom. Na slici 4.16 prikazan je mikroskopski snimak zelenog dela i infiltriranog dela pri uvećanju 100X. Kod neinfiltriranog dela 4.16a se može uočiti vrlo velika poroznost koju prikazuju crna polja na slici dok je kod infiltriranog dela 4.16b infiltrant zamenio praznine i prisutan je značajno manji broj pora.



Slika 4.16 Mikroskopska slika a) neinfiltriranog i b) infiltriranog dela

Postoji više različitih tehnika nanošenja infiltranta na zelene delove, a najrasprostranjeniji načini infiltracije su:

- uranjanje,
- premazivanje četkom,
- prelivanje,
- korišćenjem spreja,
- korišćenjem specijalnih uređaja za infiltraciju.

Koji način nanošenja infiltranta će biti korišćen zavisi od vrste infiltranta, gabarita dela i raspoložive opreme.

4.10.1 Vrste infiltranata

Paralelno sa razvojem tehnologije vezivne 3D štampe i osnovnih (praškastih) materijala koji se koriste, razvijane su i različite formulacije infiltranata. Sve veći zahtevi za visokim mehaničkim karakteristikama izrađenih delova iziskivali su i primenu različitih formulacija infiltranata kako bi se ostvarile željene karakteristike.

Danas najčešće korišćena jedinjenja za infiltraciju su:

- cijanoakrilati,
- epoksidne smole,
- voskovi,
- elastomerni uretani,
- vodeni rastvori sa dodatkom Epsom soli.

Koji od navedenih infiltranata će biti korišćen zavisi od zahtevanih karakteristika, odnosno od vrste dela koji se izrađuje. Ako su u pitanju funkcionalni delovi koji se koriste za testiranja prototipa, njegovih sklopova ili moraju da poseduju određena upotrebna svojstva, za infiltraciju se najčešće koriste epoksidni infiltranti ili infiltranti na bazi elastomernih uretana. Za konceptualne delove koji imaju izložbenu upotrebu, eventualno se koriste za ispitivanje ergonomskih svojstava i što verodostojniji prikaz boja modela, koriste se cijanoakrilati, voskovi i vodeni učvršćivači.

Komercijalno dostupni infiltranti proizvođača AM opreme 3D Systems i njihove karakteristike prikazani su u tabeli 4.2.

Od svih infiltranata navedenih u tabeli najviše su u upotrebi cijanoakrilati i epoksidne smole.

Tabela 4.2 Komercialni infiltranti 3D Systems

Komercialni naziv	Opis	Aplikacija	Dubina infiltracije	Vreme sušenja (21°C)	Vreme sušenja (71°C)
Infiltranti za funkcionalne delove					
Z-Max 90 Epoksdni infiltrant	Visoka čvrstoća, otpornost na vlagu, mogućnost mašinske obrade	Sprej, četka, uranjanje	5-10 mm	24h	2h
Infiltranti za konceptualne delove					
Z-Bond 90 Cijanoakrilat	Srednja čvrstoća, verodostojnost boja	Prelivanje, uranjanje	0,5-3 mm	15min	-
Paraplast X-TRA™ Vosak	Niska čvrstoća, poboljšava kvalitet površine, verodostojnost boja	Uranjanje, ZW4 uređaj za infiltraciju voskom	Do 100%	15-30 min	
Vodeni učvršćivač sa dodatkom Epsom soli	Bez hemikalija Loša čvrstoća	Sprej, uranjanje	Do 100%	Promenljivo	Promenljivo

Kao literatura za ovo poglavlje korišćena su poglavlja iz:

1. Doktorska disertacija: Optimizacija parametara postprocesiranja u tehnologiji vezivne 3D štampe, Dejan Movrin, Novi Sad, 2017.
2. Knjiga: 3D štampa, Ognjan Lužanin, Novi Sad, 2019.
3. Knjiga: Additive Manufacturing Technologies, I. Gibson | D. W. Rosen | B. Stucker, New York, 2010.

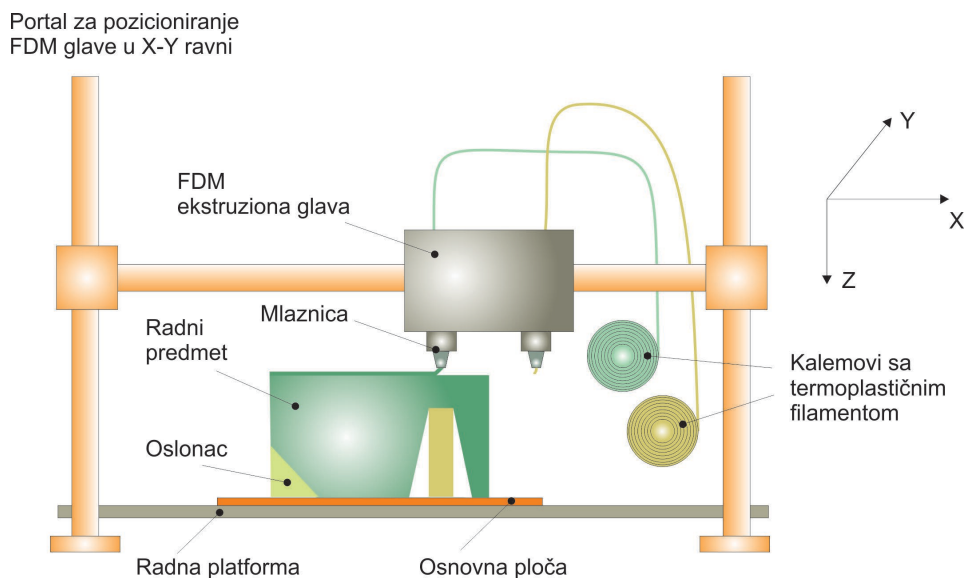
5. DEPONOVANJE ISTOPLJENOG FILAMENTA (FDM)

5.1. Osnove FDM procesa

Tehnologija modelovanja deponovanjem istopljenog filameta (u daljem tekstu FDM) koristi ekstruzionu glavu za topljenje i deponovanje polimernog filameta na radnu ploču, pri čemu model nastaje u slojevima. Ekstruzionu glavu je pokretna u više pravaca, u zavisnosti od tipa uređaja, i na sebi ima mlaznicu kroz koju se ekstrudira istopljeni filament, a čiji se prečnik može kretati između 0.1 i 1 mm. Materijal filameta se zagreva na temperaturu vrlo blisku temperaturi topljenja i očvršava vrlo brzo (približno 0.1s) nakon deponovanja. Deponovane staze istopljenog polimera vezuju se međusobno, u horizontalnom i vertikalnom pravcu, stvarajući kompaktnu očvrslu celinu. Neke FDM mašine raspolažu sa dve mlaznice, od kojih jedna deponuje osnovni, gradivni materijal, dok druga deponuje materijal za oslonce. Pri tom je materijal koji služi za gradnju oslonaca, slabijih mehaničkih karakteristika i u većini slučajeva topljiv u određenim rastvaračima (voda, limonen, deterdženti, itd.), što omogućava njegovo lakše uklanjanje u fazi postprocesiranja.

Šema procesa i glavne pozicije FDM sistema dati su na slici 5.1.

- Radna platforma, pomerljiva po Z-osi;
- Osnovna ploča, koja nosi radni predmet;
- Ekstruzionu glavu;
- Izmenljive mlaznice;
- Portal za pozicioniranje ekstruzione glave u X-Y ravni;
- Kalemovi sa termoplastičnim filamentom.



Slika 5.1 Šema FDM procesa

5.2. Princip funkcionisanja FDM procesa

- Termoplastični filament se odmotava sa kalema i uvlači se u FDM ekstruzionu glavu;
- U električno zagrevanoj komori sa kontrolisanom temperaturom koja zavisi od tipa polimera, filament se delimično otapa;
- Poluotopljeni materijal se ekstrudira i deponuje u zadatom sloju na radnu platformu;
- Po završetku tekućeg sloja, radna platforma se inkrementalno spušta za debljinu jednog sloja i proces deponovanja materijala se nastavlja, sloj po sloj, sve dok se ne završi izrada radnog predmeta.

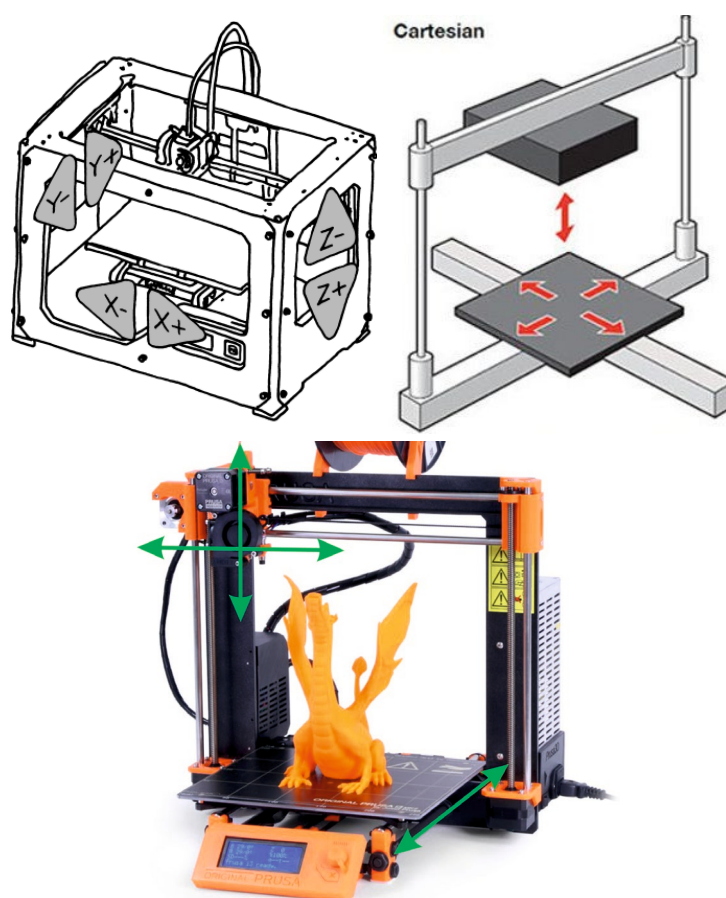
5.3. Upravljanje kretanjem FDM ekstruzione glave

Slično ostalim tehnologijama, FDM sistem u toku rada inkrementalno spušta radnu platformu u pravcu Z ose kako bi bilo omogućena izrada svakog narednog sloja. Ekstruziona glava vrši potrebna kretanja u X-Y ravni zahvaljujući portalu na koji je oslonjena. Kretanje u X-Y ravni mora biti usaglašeno sa tekućom brzinom ekstrudiranja radi ujednačenog deponovanja materijala. Pogon u X-Y ravni realizovan je u vidu dva linearna pogona koji su postavljeni međusobno ortogonalno, u pravcu X i Y ose (slika 5.2). U zavisnosti od klase FDM sistema, ovi pogoni mogu biti realizovani na dva načina. Sistemi niže klase koriste remeni prenosnik, gonjen koračnim motorom. Kod sistema više klase, za prenosnik se koristi vodeće vreteno sa servo motorom. Kretanja ne moraju biti realizovana na navedeni način, već u zavisnosti od konstrukcije uređaja mogu biti drugačija čak i kružna. Kretanja su objašnjena detaljnije u nastavku.

5.4. Konstrukciona rešenja uređaja

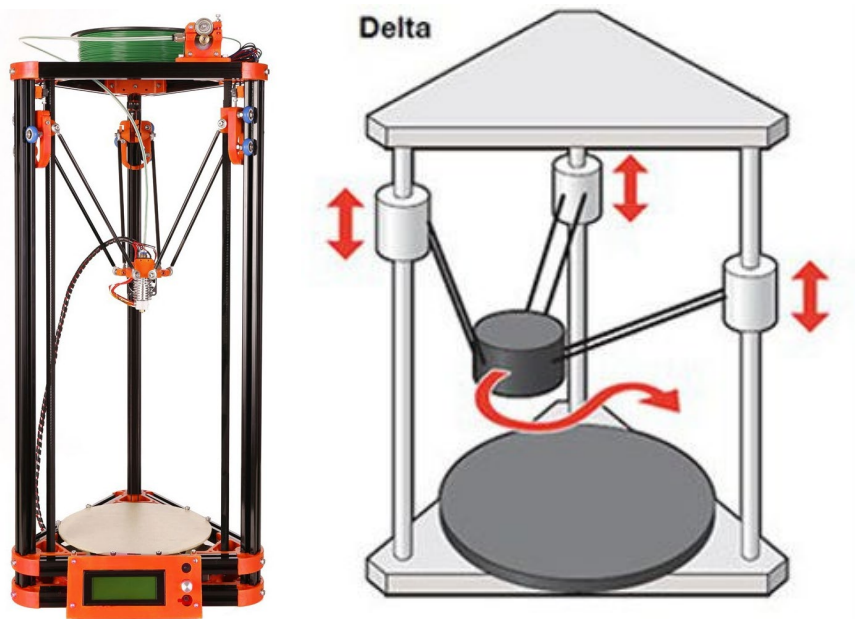
U zavisnosti od načina kretanja ekstruzione glave i radne platforme, uređaji za FDM se mogu podeliti u 4 grupe.

1. Dekartov, gde se sva kretanja izvode pravolinijski. U zavisnosti od konstrukcije mogu se pronaći dva tipa uređaja. Prvi gde ekstruziona glava kretanja po X-Y osi dok se radna platforma kreće po z osi (slika 5.2a). Kod drugog konstrukcionog rešenja, radna platforma se kreće po Y osi dok glava izvodi dva kretanja po X i Z pravcu (slika 5.2b). Treće konstrukciono rešenje omogućava pokretanje radnog stola po X i Y pravcu dok se ekstruziona glava kreće po Z osi (slika 5.2c). Ovi tipovi uređaja su najviše u primeni zbog jednostavnosti mahanizama, jednostavnog upravljanja i visoke tačnosti pozicioniranja.



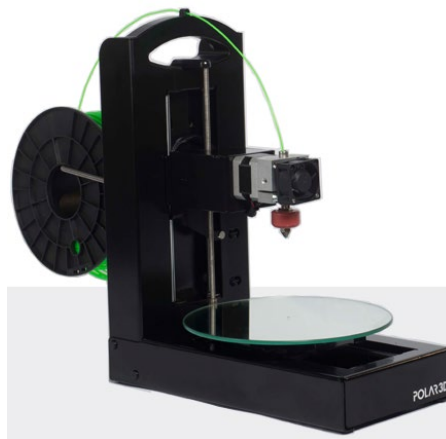
Slika 5.2 Tipovi uređaja sa pravolinijskim kretanjima (Dekartovi)

2. Delta mehanizmi, kao i kod drugih uređaja (koordinatnih mernih mašina, CNC uređaja), delta sistem omogućava kretanje ekstruzione glave po krivolinijskoj putanji (slika 5 3) velikom brzinom. Ovo kretanje se postiže korišćenjem tri poluge spojene u jednoj tački. U zavisnosti od položaja svake poluge po Z osi postižu se veoma složena kretanja. Kod ovih tipova uređaja radna ploča ne vrši nikakva kretanja. Njihova prednost je mogućnost izrade vrlo visokih delova.



Slika 5.3 Uređaj sa delta mehanizmom

- Uređaji sa polarnim kretanjem (slika 5.4), su uređaji kod kojih radni sto vrši pravolinijsko kretanje po Y osi, kao i rotaciono kretanje (obrtanje) oko sopstvenog centra (radna ploča je kružnog oblika). Ekstruziona glava kod ovih sistema se kreće po Z osi. Kombinacijom rotacionog i pravolinijskog kretanja radnog stola moguće je pozicioniranje glave na bilo koju tačku stola. Ovaj sistem se obično koristi kod uređaja sa manjim radnim prostorom, zbog problema prisustva velikih inercijalnih sila prilikom rotacije i zaustavljanja radnog stola.



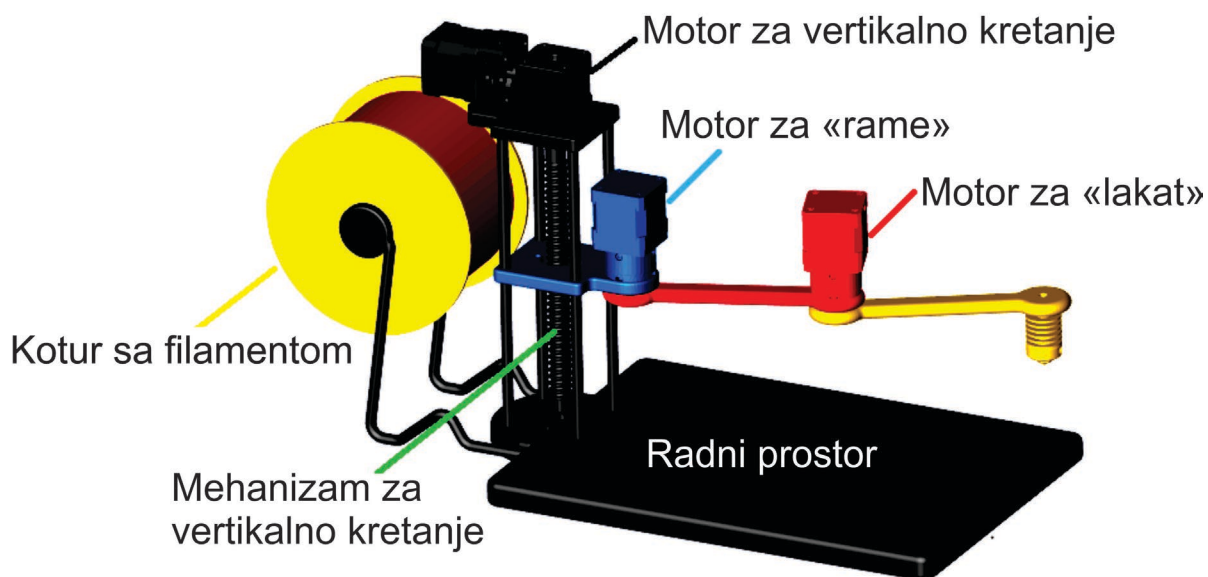
Slika 5.4 Uređaj sa polarnim mehanizmom

- Uređaji upravljani robotskom rukom (slika 5.5) u konkretnom smislu predstavljaju robotsku ruku koja umesto hvataljki (gripera) ima pričvršćenu ekstruzionu glavu. Prednost ovog sistema je što robotska ruka može imati puno stepeni slobode i izvoditi kretanja glave pod uglom u odnosu na ravnu ploču. Međutim zbog cene robotske ruke i kompleksnog programiranja ovi sistemi se retko primenjuju i pretežno se koriste u umetnosti.



Slika 5.5 Robotska ruka sa ekstruzionom glavom

5. SCARA sistem; SCARA je engleski akronim za selektivno popustljivu artikulisanu robotsku ruku (Selective Compliance Articulated Robot Arm) (sl. 5.6). Ovaj tip štampača raspolaže sa dve mehaničke ruke koje se savijaju u zglobovima, omogućavajući glavi ekstrudera da obavlja potrebna kretanja iznad radne ploče. Mehaničke ruke koje poseduju dva članka i zglob, omogućavaju dobru artikulaciju pokreta, što je odlika i originalnih SCARA robota koji su konstruisani u Japanu, 1981. godine, za obavljanje zadataka industrijske montaže. SCARA 3D štampači se još uvek nalaze u ranoj fazi razvoja.

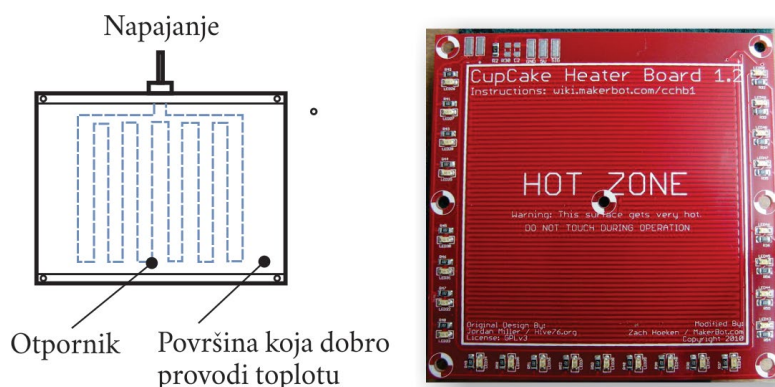


Slika 5.6 SCARA sistem kod 3D štampača

5.5. Radna ploča

U zavisnosti od toga za koje materijale su predviđeni, FDM uređaji mogu imati radnu ploču sa ili bez mogućnosti zagrevanja. Radna ploča može biti izrađena od različitih materijala, pa tako postoje ploče od pleksiglasa, stakla, aluminijuma, itd. Materijali kao što su ABS ili najlon, zahtevaju zagrevanje radne ploče, kako bi bilo obezbeđeno dobro prijanjanje prvog sloja deponovanog materijala. Radna ploča sa zagrevanjem, u sebi ima ugrađenu seriju otpornika koji

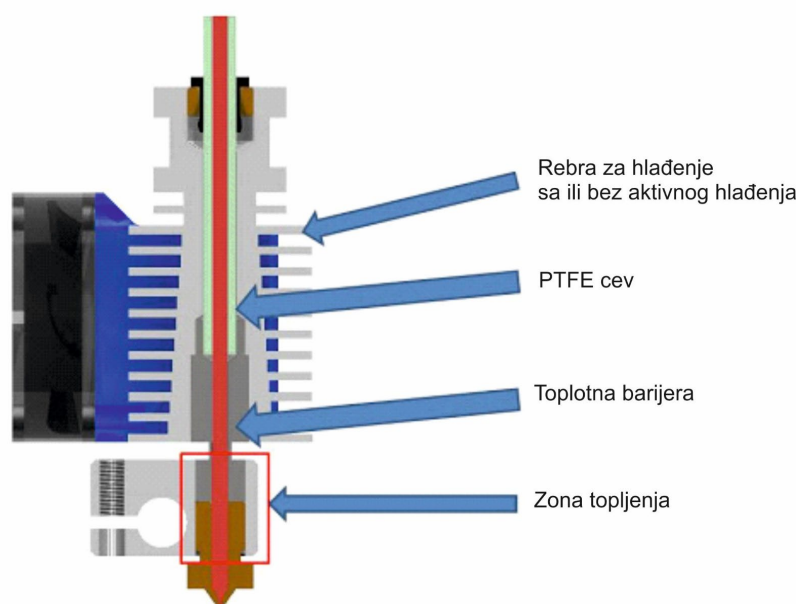
su u kontaktu sa donjom stranom toplotno provodljive ploče, načinjene najčešće od aluminijuma (sl. 5.7). Temperatura ploče je regulisana uz pomoć mikrokontrolera i toplotnog senzora. Zagrevanje radne ploče takođe pogoduje i štampanju ravnih ploča velike površine, jer ublažava problem vitoperenja usled pojave unutrašnjih napona. Sa druge strane, PLA je materijal koji ne zahteva zagrejanu radnu ploču, a prijanjanje prvog sloja pospešuje samolepiva *kapton* traka koja se aplicira na površinu radne ploče.



Slika 5.7 Radna ploča sa zagrevanjem - šema i fotografija

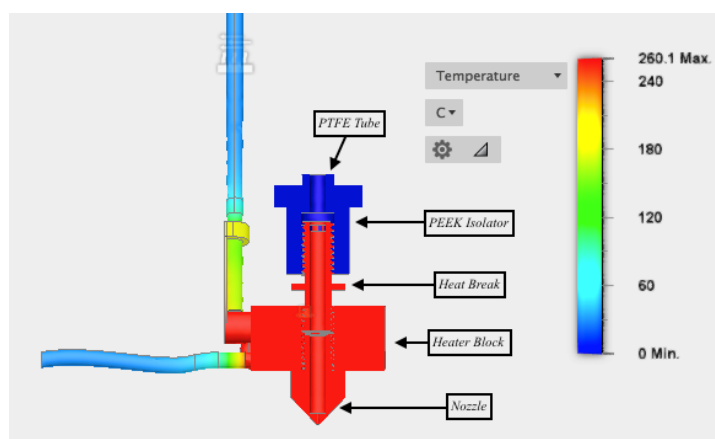
5.6. Glava za ekstrudiranje

Za pravilno deponovanje istopljenog filameta potrebno je obezbediti preciznu količinu istopljenog filameta određenog prečnika. Ovo se postiže preko glave za ekstrudiranje koja je prikazana na slici 5.8.



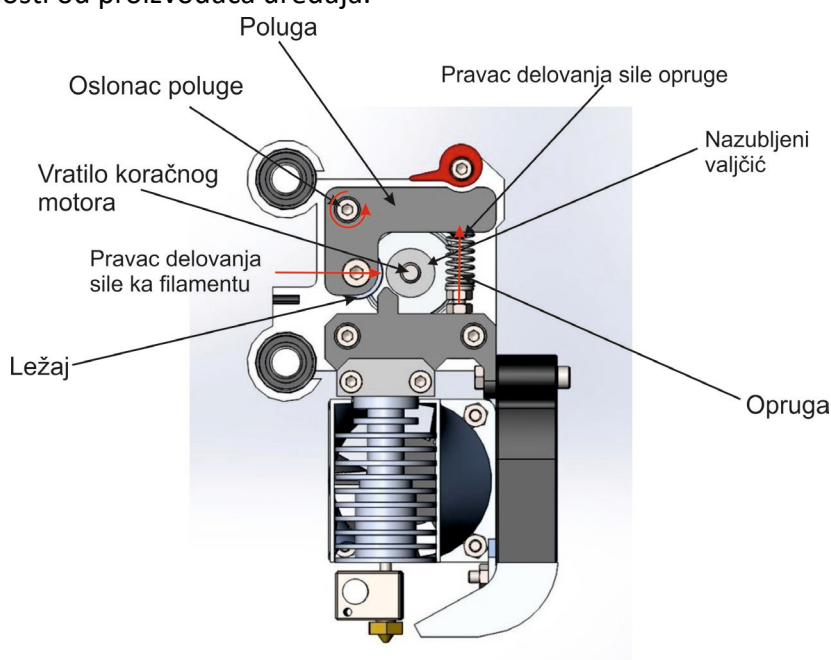
Slika 5.8 Glava za ekstrudiranje

Žica koja ulazi u glavu uvodi se kroz cev izrađenu od teflona (PTFE Poli tetra fluoro etilen) radi smanjenja trenja. Teflonska cev se nalazi unutar rebara za hlađenje, koja obezbeđuju hlađenje gornjeg dela kako se toplota od grejača ne bi raširila i do ostalih klomponenti uređaja i na taj način oštetila uređaj. Na donjem kraju teflonske cevi se nalazi toplotna barijera izrađena od izolatora otpornog na visoke temperature, najčešće izrađenog od PEEK (polietereterketon). Izolator predstavlja svojevrsnu toplotnu barijeru i sprečava provođenje toplote od toplog bloka ka uređaju. Ispod izolatora se nalazi topli blok u kom se nalaze grejač, mlaznica i termopar, koji služi za očitavanje temperature i održavanje toplog bloka na zadatoj temperaturi slanjem podataka upravljačkoj jedinici. Značaj toplotne barijere može se videti na slici 5.9 na kojoj je prikazano tempertaurno polje glave. Sa slike se može uočiti nagli pad temperature na granici toplog bloka i izolatora.



Slika 5.9 Tempertaurno polje glave

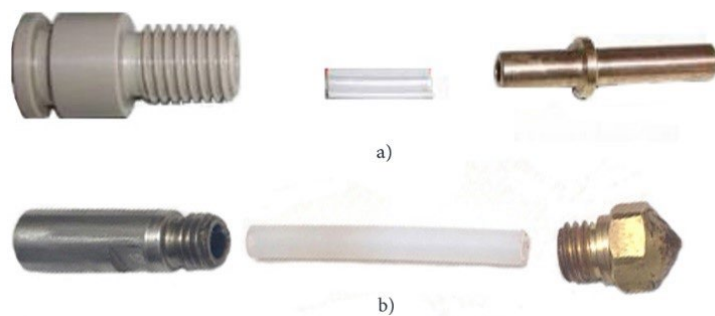
Za dovod žice do toplog bloka koristi se mehanizam prikazan na slici 5.11. Sastoji se od koračnog motora (stepera) i poluge sa oprugom i ležajem, koji obezbeđuje dobro prijanjanje filameta na nazubljeni valjčić zakačen na vratilo koračnog motora. Postoji više konstrukcionih rešenja u zavisnosti od proizvođača uređaja.



Slika 5.11 Mehanizam za dovod filameta

Toplotna barijera je napravljena od materijala koji omogućavaju dobru toplotnu izolaciju i sniženo trenje na unutrašnjim zidovima, kako bi gumasti čep što lakše prolazio na putu do ulaza u komoru ekstrudera. Dakle, izolator mora da bude dovoljno krut i tačno pozicioniran kako bi omogućio pouzdan prolazak filameta sa jednog na drugi kraj, a da pri tom u najvećoj mogućoj meri spreči prenos toplote na hladni kraj ekstrudera. Toplotne barijere mogu biti od PEEK plastike ili od nerđajućeg čelika, sa cevastim umetkom od PTFE plastike koja smanjuje trenje (sl. 5.12 a,b).

U vezi sa tim postoje i tehnička ograničenja ova dva rešenja. Toplotna barijera od PEEK plastike može se koristiti samo do temperature od 240°C, pri čemu se ne zahteva primena posebnog ventilatora. S druge strane, metalna toplotna barijera ima veću toplotnu provodljivost i može da podnese temperature do 300°C, što omogućava štampanje zahtevnijih materijala (npr. *poliamida*), ali zato zahteva upotrebu posebnog ventilatora za hlađenje. Dakle, materijal od kojeg je izrađena toplotna barijera ograničava maksimalnu radnu temperaturu FDM štampača, a time i izbor materijala od kojeg se mogu izrađivati predmeti.



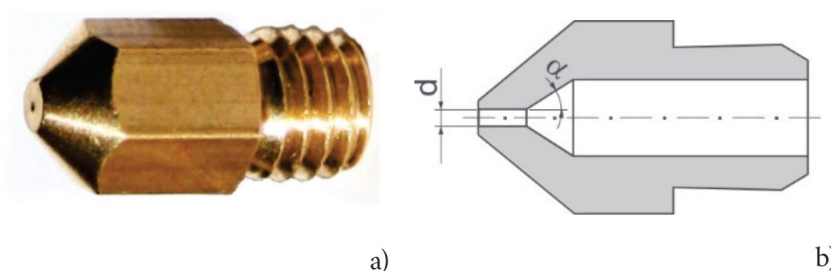
Slika 5.12 Dve varijante toplotne barijere – od PEEK materijala (a) i nerđajućeg čelika (b); U obe varijante, cevasti umeci od PTFE plastike su u sredini, a mlaznice su sa desne strane.

Kao završni element vrućeg kraja ekstrudera, mlaznica (sl. 5.13a) takođe značajno utiče na kvalitet procesa ekstrudiranja. Geometrija mlaznice mora da zadovolji dva međusobno suprotstavljena zahteva:

- Sa stanovišta rezolucije, tj. finoće detalja koje je moguće odštampati, prečnik izlaznog otvora mlaznice trebalo bi da bude što manji;
- S druge strane, proizvoljno smanjivanje prečnika izlaznog otvora mlaznice utiče na povećanje pada pritiska na otvoru mlaznice, do kojeg dolazi usled isticanja (oslobađanja) tečnog rastopa.

Kao što je već napomenuto, pad izlaznog pritiska mora biti održavan u određenim granicama, jer iziskuje povećanje potisne sile koju mehanizam za dopremanje filament mora da primeni kako bi bilo omogućeno inkrementalno kretanje filameta ka komori za topljenje, zdatom brzinom i bez proklizavanja. Još jedan geometrijski faktor, ugao konusa mlaznice, u kombinaciji sa prečnikom izlaznog otvora mlaznice (sl. 5.13b), utiče na veličinu pada pritiska na

izlazu iz mlaznice. Generalno posmatrano, ugao konusa mlaznice od 120° danas je opšteprihvaćen i primenjen je u najvećem broju praktičnih izvedbi, dok se prečnik izlaznog otvora izmenljive mlaznice u praksi kreće od 0.3 do 0.5 mm.



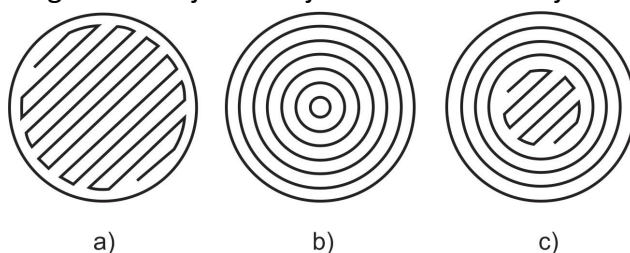
Slika 5.13 Fotografija (a) i skica poprečnog preseka mlaznice FDM ekstrudera (b) sa ključnim geometrijskim parametrima - prečnikom izlaznog otvora (d) i uglom (α)

5.7. Tehnike za deponovanje materijala

Kako je već napomenuto, ujednačeno deponovanje materijala, koje je neophodno za postizanje ravnomerne debljine sloja, zahteva usaglašenost između brzine ekstrudiranja, tj. brzine kojom materijal napušta mlaznicu, i brzine kretanja ekstruzione glave. U tom smislu je neophodno izbeći nagle promene pravca kretanja ekstruzione glave, pa se kod izrade spoljašnje konture profila tekućeg sloja ekstruziona glava kreće sporije. Na taj način, upravljački sistem lakše održava konstantnu količinu deponovanog materijala.

Kada je spoljašnja kontura definisana, ispunavanje profila može se obaviti većim brzinama. Za ispunavanje profila koriste se tri osnovne tehnike (Sl. 5.15):

- rasterska ispunavanje (Sl. 5.15a) – unutar prethodno definisane konture, ekstruziona glava obavlja pravolinijska kretanja, napred-nazad, sve dok ne ispunjava raspoloživu površinu,
- konturna ispunavanje (Sl. 5.15b) - unutar prethodno definisane konture, ekstruziona glava obavlja seriju kretanja po konturi, sve dok ne ispunjava raspoloživu površinu,
- kombinovana ispunavanje (Sl. 5.15c)- unutar prethodno definisane konture, ekstruziona glava obavlja kretanja u vidu kombinacije rasterske i konturne ispunavanja.



Slika 5.15 Tehnike za deponovanje materijala unutar definisane konture – a) rasterska, b) konturna i c) kombinovana tehnika

Od navedenih tehnika najčešće se primenjuje rasterska, zbog toga što omogućava najveću brzinu kretanja, kao i naizmeničnu promenu pravca deponovanja staza iz sloja u sloj, u

kombinaciji $0^\circ/90^\circ$ ili $-45^\circ/+45^\circ$. Na slici 5.16 se vidi da su očvrslje staze u susjednim slojevima deponovane u kombinaciji $0^\circ/90^\circ$, tj. međusobno su orijentisane pod uglom od 90° . Ovim se omogućava najbolje pakovanje materijala, tj. minimizira se pojava praznih džepova (šupljina) između susjednih očvrsljih staza u jednom sloju, kao i između susjednih slojeva.



Slika 5.16 Mikroskopski snimak poprečnog preseka modela izrađenog FDM tehnologijom - materijal je deponovan naizmjenično, pod uglom od 0° i 90°

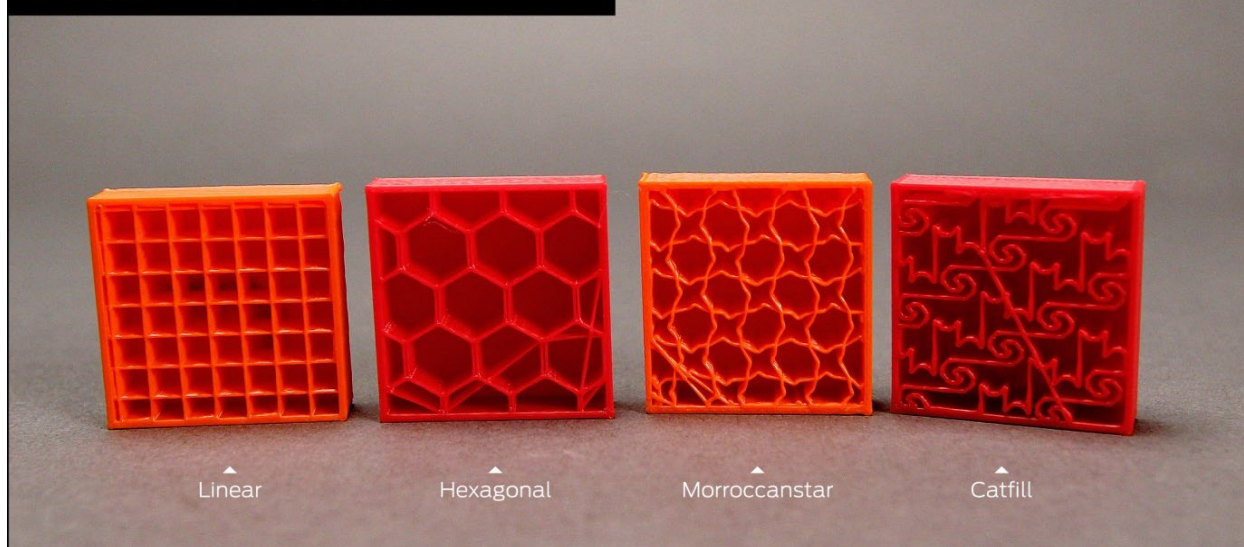
5.8. Procenat ispune

Iako je moguće raditi modele sa 100% ispune modela, to se u najvećem broju slučajeva izbegava, budući da značajno produžava vreme izrade i povećava potrošnju materijala. Maksimalna gustina najčešće nije neophodna, budući da, u zavisnosti od namene modela, dovoljna čvrstoća može da se postigne i sa znatno manjom ispunom. Na slici 5.17 su prikazani modeli štampani sa ispunama od 2, 25 i 50%.



Slika 5.17 Modeli izrađeni sa različitim procentima ispune

Takođe osim procenta ispune moguće su i varijacije oblika ispune u zavisnosti od podešavanja parametra procesa. Neki primeri različitih oblika ispuna koje je omogućio proizvođač uređaja MakerBot, prikazani su na slici 5.18.

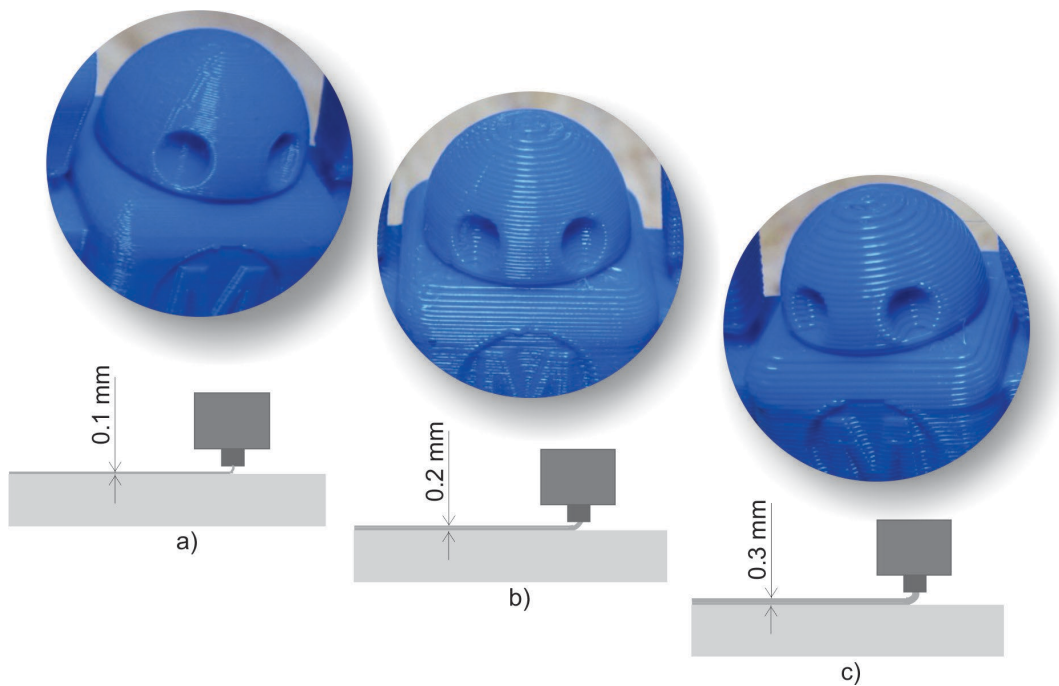


Slika 5.18 Različiti oblici ispune

5.9. Debljina sloja

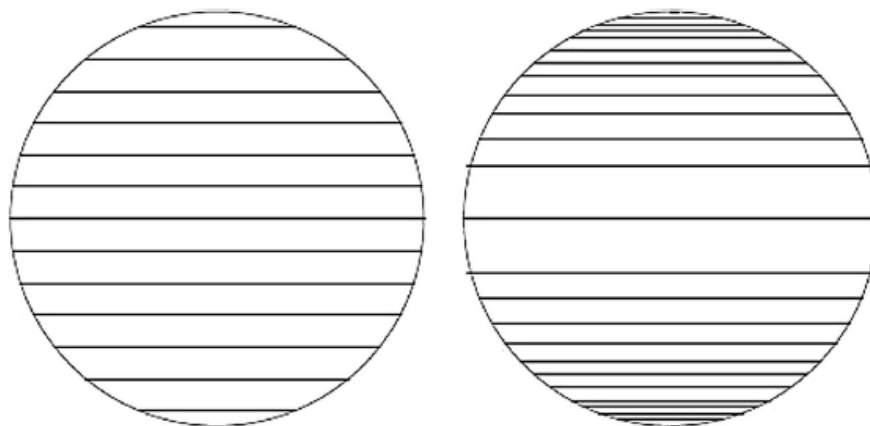
Debljina sloja je takođe jedan od tehnoloških parametara koji imaju direktan uticaj na kvalitet površine izrađenog modela. U pogledu debljine soja, najveće ograničenje predstavlja prečnik mlaznice ekstrudera, koji može da iznosi od 0.1 do 1mm. Najbolji odnos kvaliteta i brzine štampe postiže se sa prečnikom mlaznice od 0.4 mm, koji se najčešće i pronalazi u današnjim uređajima.

Debljina sloja se može programski podešavati, a najčešće su u upotrebi tri standardne debljine: 0.1, 0.2 i 0.3 mm. Na slici 5.19 je ilustrovan uticaj koji primena različitih debljina slojeva ima na stepenasti efekat površine. Osim na završni kvalitet površine, debljina sloja direktno utiče i na vreme štampe, pa je potrebno pronaći kompromis između ova dva parametra. Takođe, debljina sloja ima veliki uticaj i na mehaničke karakteristike izrađenih delova; što je manja debljina sloja veća je zatezna čvrstoća i obrnuto.



Sika 5.19 Efekti variranja debljine deponovanog sloja

Neki softveri za pripremu modela omogućavaju varijabilnu debljinu sloja tokom procesa, pa se na površinama koje su vertikalno postavljane u odnosu na Z osu mogu koristiti veće debljine, dok se na površinama koje su pod uglom nagnute u odnosu na osu koriste manje debljine sloja (slika 5.20).



Sika 5.20 Varijabilna debljina sloja

5.10. Materijali za FDM

5.10.1. Podela polimera na osnovu toplotnog ponašanja

Sintetički polimeri koji se koriste u tehnici mogu, na osnovu toplotnog ponašanja, biti razvrstani u:

- Termoplastične polimere;
- Termoreaktivne polimere;
- Elastomere.

Na sobnoj temperaturi, termoplastični polimeri su čvrsti, a na povišenim temperaturama od svega nekoliko stotina stepeni, postaju viskozni rastopi. Zbog ove osobine mogu se jednostavno i ekonomično oblikovati u razne tehničke svrhe. Ono što je takođe značajna karakteristika termoplasta, jeste činjenica da mogu više puta da prolaze kroz cikluse topljenja i hlađenja, a da pri tom ne dođe do drastične degradacije njihovih ključnih osobina. Tipični predstavnici termoplasta jesu *polietilen, polivinil-hlorid, ABS, polistiren i poliamid*.

Za razliku od termoplasta, termoreaktivni polimeri ne mogu da trpe ponovljene cikluse topljenja i hlađenja. Kada se jednom zagreju iznad temperature topljenja i oblikuju, a potom ohlade, ponovno zagrevanje na temperaturu topljenja dovodi do degradacije osobina i umesto omekšavanja, dolazi do nagorevanja i ugljenisanja. U tipične predstavnike termoreaktivnih polimera spadaju fenoli i epoksidi. Elastomeri su materijali sa izraženom elastičnošću. Najrašireniji sintetički elastomer je sintetička guma. Od tri navedena tipa polimera, termoplasti su najzastupljeniji u proizvodnji plastike i čine preko 70% ukupne mase sintetičkih polimera koji se proizvode u svetu.

Prvi uređaji koji su razvijeni su kao materijal koristili filament od ABS-a. Sa pojavom PLA plastike (poli mlečna kiselina) ona postaje standard u FDM tehnologiji, pa se danas najčešće i pronalazi. PLA se vrlo lako deponuje na radnu ploču, hladi se vrlo brzo nakon izlaska iz mlaznice, može se koristiti pri štampanju površina vrlo malih uglova u odnosu na horizontalu bez korišćenja potpora, otporna je na većinu rastvarača, nema neprijatnih mirisa tokom štampe, ali ima malu otpornost ka visokim temperaturama. (detaljnije u poglavljima 5.11-5.13 ???). U tabeli 5.1 dat je prikaz materijala koji se danas koriste u FDM tehnologiji kao i njihove mehaničke karakteristike.

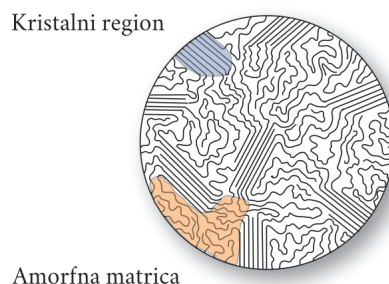
Tabela 5.1 Materijali koji se koriste u FDM tehnologiji

Material	Density [g cc ⁻¹]	Young's modulus [MPa]	Tensile strength [MPa]	Processing temperature [°C]
Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)	1.05	2180-2230	26-31	250-280
Poly(lactic acid) PLA	1.27	3368	56.6	190-220
Nylon 12	1.05	1138-1282	28-32	255-275
Acrylonitrile styrene acrylate (ASA)	1.06	1950-2010	27-29	240-260
High impact polystyrene (HIPS)	1.05	1650	16	210-230
Copolyester (PETG)	1.27	2100	50	220-245
Polycarbonate (PC)	1.24	1958-1944	30-40	230-255
Polyetheriminde (PEI)	1.27	2150-2770	69.81	330-350
ULTEM	1.27	2200-3580	44-110	375-420
Polyphenylsulfone (PPSF)	1.29	2068	55	360-390

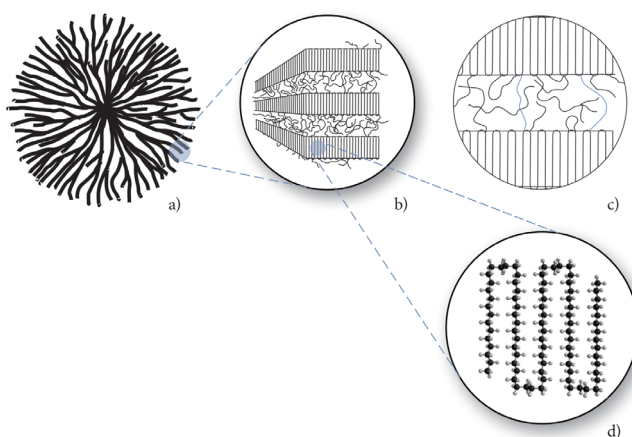
5.10.2. Kristaliničnost polimera

Kristaliničnost je važno svojstvo polimera, jer sa povećanjem kristaliničnosti dolazi do povišenja zapreminske gustine, čvrstoće, tvrdoće, žilavosti, otpornosti na povišene temperature, itd. Prilikom hlađenja polimernog rastopa, polimer može preći u čvrsto amorfno stanje, i u tom slučaju se zadržava neuređena konformacija koja je bila svojstvena i rastopu (sl. 5.21). Međutim, pod povoljnim uslovima može doći i do formiranja kristalne faze, pri čemu dolazi do promene konformacije makromolekula. Tako u pojedinim zonama zapremine, može doći do višestrukog savijanja polimernih lanaca, gušćeg pakovanja i formiranja zona sa uređenom, periodičnom strukturom, koje se nazivaju kristaliti (sl. 5.21). Postoji znatan broj polimera koji, prilikom kristalizacije, formiraju strukture koje su približno sfernog oblika, zbog čega su dobili naziv sferuliti. Sferulit se sastoji od niza lamelastih kristalita koji se šire u radijalnom pravcu, polazeći iz zajedničkog nukleusa - centra kristalizacije (sl. 5.22a). Debljina lamela iznosi približno 10 nm, a na TEM mikroskopskom snimku ove lamele su uočljive kao bela vlakna. Na slikama 5.22b i 5.22c vidi se da kristalite međusobno razdvajaju amorfni regioni, kroz koje prolaze i molekuli koji povezuju susedne lamele. Šematski prikaz razvoja sferulita u rastopu, dat je na slici 5.23. Uočljivo je da usled rasta, susedni sferuliti dolaze u kontakt, formirajući planarne granične površi (sl. 5.23a-d),

što je ilustrovano i na SEM snimku (sl. 5.23e). Uočljiva forma malteškog krsta, rezultat je različitog odbijanja svetlosti usled spiralnog uvijanja kristalita koji rastu iz centra.



Slika 5.21 Šematski prikaz kristalnih regiona i amorfne matrice.



Slika 5.22 Šematski prikaz sferulita (a), uvećani detalj prikazuje tri susedne lamele (b) između kojih se nalaze amorfni regiona sa povezujućim molekulima, označeni plavom bojom na detalju (c), uvećani detalj (d) šematski ilustruje konformaciju presavijenog makromolekulskog lanca koji ulazi u sastav lamele.

5.10.3. Faktori koji utiču na kristaliničnost

U opštem slučaju, na stepen kristaliničnosti utiču sledeći faktori:

- *Brzina hlađenja prilikom očvršćavanja:* da bi polimerni lanci formirali uređene, kompaktne, kristalne domene, neophodno je da im se omogući sporije hlađenje, tj. dovoljno dug vremenski period iznad temperature ostakljivanja;
- *Složenost strukturnih jedinica - mera:* kompleksne strukture otežavaju pakovanje segmenata koje je neophodno za formiranje uređenih, kristalnih domena, dok meri jednostavne strukture, kakvi se, na primer, sreću kod polietilena, znatno olakšavaju kristalizaciju;

- *Konfiguracija polimernih lanaca*: polimeri sa linearnom strukturom kristalizuju relativno lako, razgranata struktura otežava ovaj proces, polimeri sa lestvičastom strukturom mogu da budu i amorfni i kristalinični, dok se kod umreženih polimera sreće isključivo amorfna struktura;
- *Izomerizam*: izotaktični i sindiotaktični polimeri relativno lako kristalizuju, jer zahvaljujući geometrijskoj regularnosti, mogu da obrazuju kompaktnu, uređenu domenu, dok ataktični polimeri teško kristalizuju, jer ih u tome sprečava geometrijska neregularnost;
- *Kopolimerizam*: na osnovu slične analogije, pravilniji raspored mera olakšava kristalizaciju, pa na osnovu toga alternirajući i blok kopolimeri lakše obrazuju kristalne domene, u poređenju sa nasumičnim i graft kopolimerima.

5.10.4. Temperatura topljenja i temperatura ostakljivanja

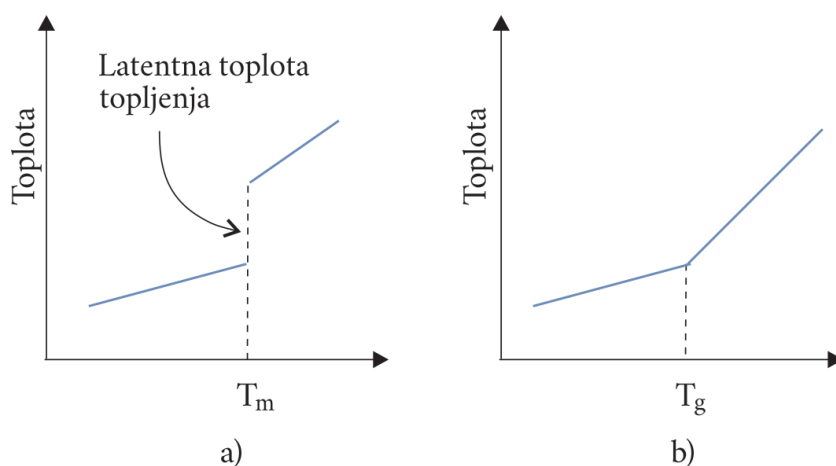
Prilikom zagrevanja, polimeri u opštem slučaju prolaze kroz nekoliko važnih toplotnih tranzicija, tj. prelaza. U tim prelazima, njihovo ponašanje će zavisiti od stepena kristaliničnosti. Temperatura topljenja je karakteristika kristalne faze, dok je temperatura ostakljivanja karakteristična za amorfnu fazu. U praksi se najčešće sreću kristalinični polimeri koji, u različitim proporcionalnim odnosima, poseduju regione i sa kristalnom i sa amorfnom strukturom. U tom slučaju, uzorci takvih polimera prilikom standardne toplotne analize prolaze i temperaturu ostakljivanja i temperaturu topljenja. Kako je već rečeno, samo kristalni domeni u posmatranom uzorku imaju tačku topljenja, dok samo amorfna matrica reaguje na temperaturu ostakljivanja. Fenomen temperature ostakljivanja može se bolje razumeti na jednostavnim dijagramima (sl. 5.24). Posmatrajmo dva slučaja, prvi za polimer sa 100% kristalnom strukturom (teoretski slučaj), a drugi za polimer sa čisto amorfnom strukturom. U slučaju polimera sa čisto kristalnom strukturom, ako se uzorak polimera zagreva konstantnom brzinom i temperatura će rasti konstantnom brzinom.

Količina toplote koju je potrebno dovesti jediničnoj masi polimera da bi joj se temperatura povisila za 1 stepen Kelvina, naziva se *specifični toplotni kapacitet*. U SI sistemu, specifični toplotni kapacitet se izražava u $[J/kg K]$. Opisani fenomen se odvija sve do temperature topljenja (T_m - *melting temperature*). Ukoliko se toplota i dalje dovodi uzorku, temperatura jedno vreme neće rasti (karakterističan skok na slici 5.24a), sve dok se polimer u potpunosti ne istopi. Nakon toga, temperatura će ponovo nastaviti da raste. Važno je, međutim, zapaziti, da nagib krive nije isti pre i posle tačke topljenja (sl. 5.24a), jer je toplotni kapacitet viskoznog rastopa veći od toplotnog kapaciteta polimera u čvrstom stanju. Zato konstantna količina toplote koja se i dalje dovodi uzorku, rezultuje sporijim porastom temperature (kriva se strmije penje nakon T_m). Vertikalni segment (prekid) koji kriva beleži u tački topljenja, odgovara latentnoj toploti topljenja.

Iz prethodnog je jasno da prilikom topljenja polimera sa 100% kristalnom strukturom dolazi do odvijanja dva važna fenomena:

- Polimer apsorbuje određenu količinu toplote koju nazivamo latentnom toplotom topljenja;
- Nakon topljenja dolazi do promene - povećanja toplotnog kapaciteta polimera.

S tim u vezi, svaka toplotna promena - bilo da je reč o topljenju, mržnjenju, ključanju ili kondenzaciji - koja rezultuje promenom toplotnog kapaciteta i pojavom latentne toplote, naziva se toplotnim prelazom prve vrste. Ako se posmatra isti process dovođenja toplote u slučaju polimera sa amorfnom strukturom (sl. 5.24b), prvi deo procesa biće isti kao u slučaju kristalnog polimera. Međutim, u trenutku dostizanja tačke koja odgovara temperaturi ostakljivanja (T_g), nastupa značajna razlika.



Slika 5.24 Odnosi dovedene količine toplote i porasta temperature za kristalni polimer (a) i amorfni polimer (b).

Za razliku od kristalnog polimera (sl. 5.24a) ovde temperatura i dalje nastavlja da raste (nema karakterističnog prekida), pa prema tome nema ni pojave latentne toplote. Kao i u prethodnom slučaju, nakon T_g rast temperature usporava (kriva je strmija) usled povećanja toplotnog kapaciteta (sl. 5.24b). Ovde se takođe može konstatovati da se prilikom dovođenja toplote polimeru sa amorfnom strukturom, odvija sledeće:

- Temperatura stalno raste, bez pojave latentne toplote;
- Nakon prolaska kroz tačku ostakljivanja (T_g) dolazi do promene – povećanja toplotnog kapaciteta polimera.

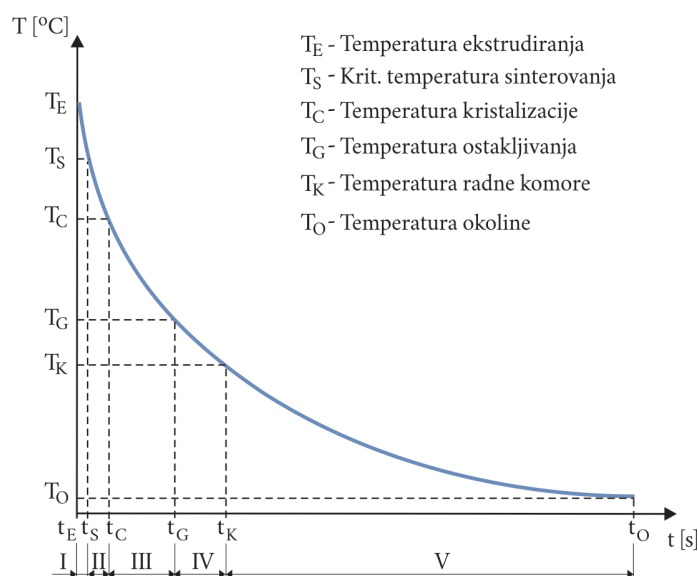
U vezi sa navedenim, svaka toplotna promena koja rezultuje promenom toplotnog kapaciteta, bez latentne toplote, naziva se toplotnim prelazom druge vrste.

5.10.5. Karakteristične temperaturne faze kroz koje prolazi ekstrudirani materijal

U procesu ekstrudiranja, od trenutka napuštanja mlaznice FDM ekstrudera, do hlađenja na temperaturu okoline, termoplastični materijal prolazi kroz pet karakterističnih faza, od kojih se svaka odvija na specifičnoj temperaturi (sl. 5.26).

5.10.5.1. Faza I - Sinterovanje termopolimera

Faza I se odvija između temperature ekstrudiranja (T_E) i kritične temperature sinterovanja (T_S) (sl. 5. 26), pri čemu dolazi do sinterovanja polimera u kontaktnoj regiji između staze koja se trenutno deponuje i staze koja je prethodno očvrsla.

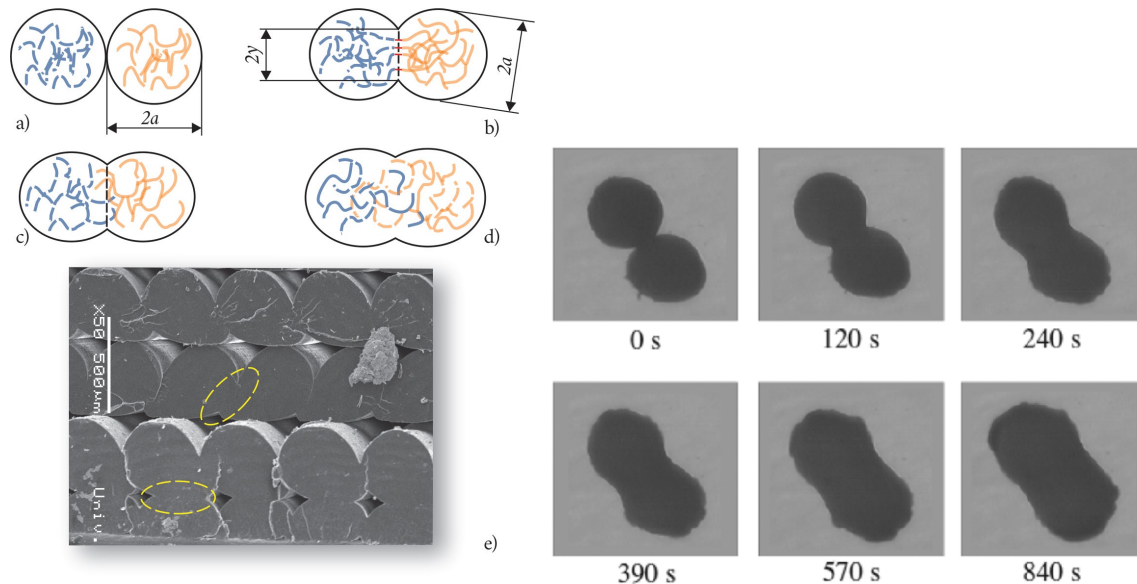


Slika 5.26 Dijagram vremenske zavisnosti i temperature ekstrudiranog materijala u FDM procesu, sa obeleženim karakterističnim temperaturnim fazama (I-V)

Osnovni pokretač procesa sinterovanja polimera jeste toplotna energija koju poseduje viskozni rastop. Važno je zapaziti da do formiranja karakterističnih vratnih prelaza između dve susedne staze, može doći samo na temperaturi iznad temperature ostakljivanja. Zato je neophodno da temperatura ekstrudiranja (T_E) bude iznad kritične temperature sinterovanja (T_S), a ispod temperature na kojoj dolazi do degradacije polimera. S tim u vezi, u slučaju ABS-a, temperatura ekstrudiranja može da se kreće između 210 i 270°C, dok se ekstrudiranje PLA uobičajeno odvija u rasponu od 190 do 235°C. Ključne faze procesa sinterovanja prikazane su na slici 5.12, pri čemu su poprečni preseki deponovanih staza idealizovani kao kružnice. Prvu fazu čini uspostavljanje površinskog kontakta između ohlađene staze i staze koja se trenutno deponuje pored nje ili na nju, pri temperaturi koja je znatno iznad T_g . (sl. 5.27a).

U narednoj fazi, zahvaljujući smanjenom površinskom naponu, dolazi do kvašenja i formiranja hemijskih, prvenstveno kovalentnih, veza između molekulskih lanaca sa obe strane interfejsa (sl. 5.272b). Usled adsorpcije, (sl. 5.27c), u sledećoj fazi molekulski lanci obavljaju

kretanja kroz kontaktni interfejs, simbolizovan isprekidanom vertikalom (sl. 5.27c), kako bi ostvarili konfiguraciju koja omogućava postizanje adsorpcionog ekvilibrijuma. Dolazi do mešanja molekulskih lanaca u zoni interfejsa i do daljeg formiranja primarnih hemijskih veza između njih. U finalnoj fazi (sl. 5.27d), dolazi do potpune randomizacije polimernih lanaca sa obe strane, što uzrokuje nestanak interfejsa i završetak formiranja vratnog prelaza



Slika 5.27 Faze formiranja vratnih prelaza: (a) ostvarivanje početnog kontakta, (b) kvašenje i formiranje kovalentnih veza, (c) interdifuzija, (d) nestajanje kontaktnog interfejsa, (e) SEM snimak očvrslih staza, sa označenim vratnim prelazima koji odgovaraju šematskoj fazi na slici (d). Mikroskopski prikaz procesa (e)

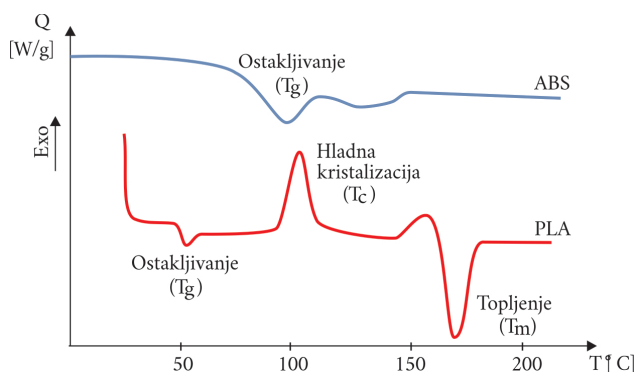
Kvalitet veze između dve staze, može biti ocenjen na osnovu veličine vratnog prelaza, za šta je najjednostavnije koristiti količnik između vratnog radijusa (γ) i radijusa cilindra (a) (sl. 5.27b). Izgled formiranih vratnih prelaza, koji odgovara poslednjoj fazi (5.27d), može se dobro uočiti na SEM snimku poprečnog preseka epruvete od PLA materijala. Presek je dobijen kriolomom (sl. 5.27e) da bi oblik deponovanih staza bio sačuvan od deformacije.

5.10.5.2. Faza II - Kristalizacija

Kristalizacija je faza u kojoj jedan procentualni deo lanaca termoplastičnog polimera formira uređene regione - lamele, od kojih nastaju veće sferoidne strukture, koje se nazivaju sferuliti (videti 5.10.2). Do kristalizacije dolazi na temperaturi iznad kritične temperature kristalizacije (T_c). Ova temperatura predstavlja karakteristiku materijala i može se najjednostavnije odrediti metodom diferencijalne skenirajuće kalorimetrije (DSC) (sl. 5.28). Što se hlađenje odvija sporije, to se intenzivnije odvija proces kristalizacije. Maksimalni procenat kristalne strukture zavisice pri tom od vrste termopolimera. U principu, sa povećanjem procenta kristaliničnosti rastu i mehaničke osobine polimera, kao i otpornost na povišene temperature. Za PLA, temperature kristalizacije iznosi približno 100°C.

5.10.5.3. Faza III - Ostakljivanje

Faza ostakljivanja se odvija na temperaturi iznad temperature ostakljivanja (T_g). Tačnije posmatrano, temperatura ostakljivanja zapravo je uzan opseg temperatura na kojem dolazi do prelaska amornog polimera ili amorfne faze u kristaliničnom polimeru, iz krte i krute faze, u viskoelastičnu fazu.

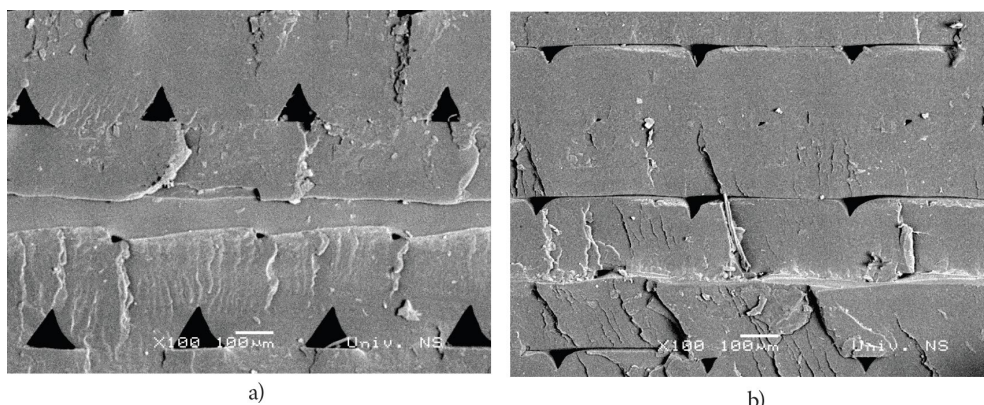


Slika 5.28 Karakteristične toplotne krive koje su dobijene DSC analizom uzoraka od ABS (amornog) i PLA (kristaliničnog) materijala

Uobičajeno je da se u tehničkim podacima T_g za različite materijale navodi kao jedinstvena vrednost, pa je tako za ABS $T_g \approx 105^\circ\text{C}$, a za PLA, $T_g \approx 65^\circ\text{C}$. Od trenutka napuštanja otvora mlaznice, do početka ostakljivanja, deponovani termopolimer se nalazi u viskoelastičnom stanju, što mu omogućava tečenje i popunjavanje praznina. Time se smanjuje poroznost, tj. prisustvo vazdušnih džepova između deponovanih staza, slika 5.29.

5.10.5.4. Faze IV i V

Nakon očvršćavanja, deponovani materijal se hladi do temperature koja vlada u radnoj komori, ukoliko 3D štampač njome raspolaže, a nakon vađenja iz radnog prostora mašine, odvija se završno hlađenje, do temperature okoline. Vremenska dužina svakog od navedenih koraka zavisice od vrste materijala, veličine izrađenog dela, kao i procesa hlađenja. Visina temperature u radnoj komori mašine primarno je uslovljena vrstom materijala i podešava se na osnovu preporuka. Na primer, material sa povišenim performansama, Ultem 9835, zahteva da se ekstrudiranje obavlja u zaštićenom radnom prostoru - komori, na temperaturi od $190\text{--}200^\circ\text{C}$.



Slika 5.29 SEM snimci poprečnih preseka očvrstlih staza; U zavisnosti od kombinacije tehnoloških parametara koji su korišćeni prilikom ekstrudiranja materijala (pre svega, debljine sloja, brzine i temperature ekstrudiranja) dobijaju se (a) veći ili (b) manji vazdušni džepovi

5.11. Polilaktička kiselina (PLA)

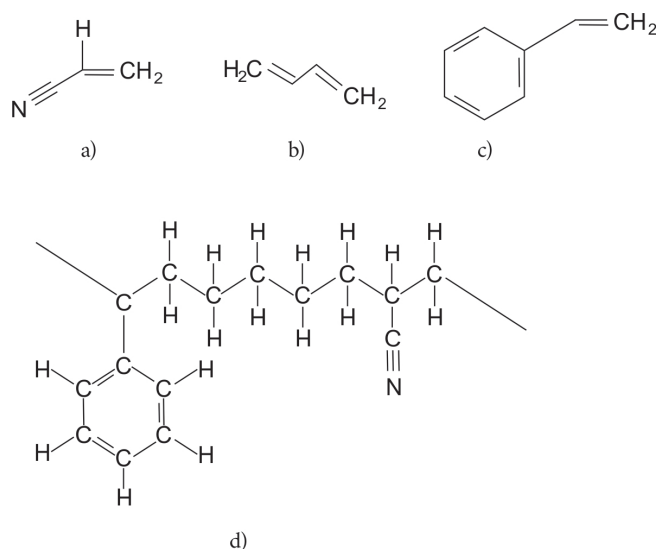
PLA je jedan od FDM materijala koji se nalazi u najčešćoj upotrebi i najpoznatiji je predstavnik biorazgradivih polimera koji se dobijaju iz obnovljivih izvora. S obzirom na to da se mlečna kiselina prirodno proizvodi i izlučuje iz ljudskog organizma, neke od PLA formulacija imaju široku primenu u gradnji medicinskih implantata za koje je neophodno da se tokom vremena, bez štetnih posledica, razlože u organizmu, a da ih pri tom zameni izraslo tkivo. Osim biorazgradivosti, PLA ima još jednu prednost, koja se ogleda u tome da, prilikom 3D štampe, ne odaje nikakva štetna isparenja i mirise, tako da se sa ovim materijalom može raditi i u zatvorenim prostorijama, bez ventilacije. PLA je kristaliničan polimer sa niskom temperaturom ostakljivanja (T_g) i ona se kod većine formulacija kreće između 60 i 65°C. Delovi izrađeni od PLA ne mogu da budu korišćeni u okruženjima sa povišenom temperaturom, ali, sa druge strane, niska T_g omogućava ekstrudiranom materijalu dovoljno vremena za relaksaciju unutrašnjih napona, pre hlađenja na temperaturu okoline. To za rezultat ima neznatno vitoperenje, kao i mogućnost dobrog prijanjanja na nezagrejanu radnu ploču. PLA se topi na temperaturi od približno 175°C, ali da bi se postiglo dobro tečenje i nanošenje na radnu ploču, temperaturu ekstrudiranja treba podesiti u rasponu od 210 do 230°C.

Istovremeno prisustva polarnih veza, PLA dobro apsorbuje vlagu, što dovodi do delimične razgradnje polimera i izaziva dodatno povišenje krtosti, dok u samom procesu ekstrudiranja može da dovede do začepjavanja ekstrudera. Zbog toga se preporučuje čuvanje filameta u kontejnerima sa dobrim zaptivanjem, uz dodatak desikanta.

5.12. Akrilonitril-butadijen-stiren (ABS)

ABS je amorfni termoplastični materijal, i pored PLA, predstavlja jedan od dva najšire korišćena materijala u FDM tehnologiji, naročito kada su u pitanju desktop 3D štampači. Kao i u slučaju PLA, postoje različite gradacije, tj. formulacije ovog kopolimera, koje se razlikuju po stepenu polimerizacije, procentu kristaliničnosti, kao i sastavu aditiva. Varijacije u osobinama

materijala moguće je postići već i na osnovu činjenice da u sastav ABS polimernog lanca ulaze tri tipa monomera (sl. 5.30), koji mogu biti dodavani u različitim odnosima i u različitim stadijumima polimerizacije, što rezultuje različitim mešavinama i kopolimerima, pod zajedničkom oznakom, ABS. Formulacija ABS koja se koristi za potrebe FDM tehnologije vrlo je slična onoj koja se koristi u konvencionalnoj tehnologiji injekcionog livenja, npr. za izradu *Lego* kockica. Kako je već rečeno, mešavina svojstava kojima se odlikuje ABS, potiče od tri ključne komponente (sl. 5.30).



Slika 5.30 Monomeri akronitrila (a), butadijena (b), stirena (c) i jedna od njihovih mogućih konfiguracija u ABS (d).

Svoju amorfnost, ABS duguje prisustvu velike polistirenske bočne grupe, koja mu ujedno daje i krutost na osnovu zapletenosti lanaca. Svojim gumolikim svojstvima, butadijen doprinosi žilavosti ABS-a, dok akrilonitril daje otpornost na povišene temperature, kao i otpornost na atmosferske uticaje. Temperatura ostakljivanja ABS-a zavisi od konkretne formulacije, ali se uobičajeno kreće oko 105⁰C, što je znatno više od PLA (65⁰C). Sledstveno tome, ABS prilikom ekstrudiranja i deponovanja, očvršćava na znatno višoj temperaturi, tj. znatno pre od PLA i zato duže trpi unutrašnje napone, što za posledicu ima veće vitoperenje radnog predmeta, kao i odvajanje krajeva od radne ploče. Zbog ovoga je u procesu izrade, neophodno koristiti zagrevanje radne ploče (100-110⁰C) ili upotrebiti hemijske atezive koji se nanose na radnu ploču. Preporučena temperatura ekstrudiranja ABS-a kreće se od 230 do 240⁰C.

Za razliku od PLA, prilikom ekstrudiranja, ABS odaje toksične gasove i miris, tako da se preporučuje rad u dobro ventiliranim prostorijama. Usled smanjene otpornosti ABS-a na dejstvo hemijskih rastvarača, završni površinski kvalitet delova može biti povišen direktnim tretmanom acetonskim rastvorom ili izlaganju acetonskim isparenjima u, za to predviđenim, komorama.

5.13. Termoplastični elastomeri (TPE)

Termoplastični elastomeri (TPE) su klasa kopolimera ili smeša polimera koja u sebi sadrže materijale sa termoplastičnim i elastomernim svojstvima. Konvencionalni elastomeri pretežno

spadaju u termoreaktivne polimere, i njihova struktura ne omogućava ekstrudiranje, što ih čini nepodesnim za primenu u FDM tehnologiji.

Ključna razlika između klasičnih, termoreaktivnih elastomera i termoplastičnih elastomera, jeste u tome što kod TPE nije potrebno izazvati umrežavanje radi postizanja elastomernih svojstava. TPE zapravo predstavljaju kombinaciju svojstava termoplastičnih i elastomernih polimera, tj. poseduju elastičnost, dok istovremeno mogu da trpe toplotnu obradu, kao termoplastični polimeri. Postoji nekoliko generičkih klasa komercijalno raspoloživih TPE:

- Stirenski blok kopolimeri (TPE-S);
- Termoplastični olefini (TPE-O);
- Elastomerne legure (TPE-v ili TPV);
- Termoplastični poliuretani (TPU);
- Termoplastični kopoliestri;
- Termoplastični poliamidi.

Znatan broj TPE formulacija čine blok kopolimeri, čiji se lanci sastoje odkrutih (termoplastičnih) segmenata i fleksibilnih (termoreaktivnih) segmenata. Kao tipičan primer za razumevanje navedene strukture, može poslužiti blok kopolimer polistirena i butadijena (sl. 5.31a). Stirenske ponavljajuće jedinice se nalaze samo na krajevima lanaca, čineći oko 25% njihovog sastava. Stirenski krajevi nekoliko polimernih lanaca formiraju domene sferičnog oblika (sl. 5.31b). Zahvaljujući višoj temperaturi ostakljivanja stirena ($\approx 100^{\circ}\text{C}$), ovi domeni imaju povišenu čvrstoću i krutost, tako da drže lance na okupu. Butadijenske ponavljajuće jedinice smeštene su između stirenskih domena. Butadijenski segmenti imaju temperaturu ostakljivanja koja je daleko ispod sobne temperature ($\approx 80^{\circ}\text{C}$), tako da na sobnoj temperaturi imaju osobine gume. Dakle, zbog navedenih elastomernih osobina butadijenskih segmenata, ovaj TPE na sobnoj temperaturi može da trpi ograničene, eleastične deformacije. Sa druge strane, kada se TPE zagreje na temperaturu iznad temperature ostakljivanja stirena, stirenski domeni gube integritet, a polimer se transformiše u viskozni rastop, i može da bude oblikovan kao termoplast. Kada se polimer ponovo ohladi, sferični stirenski domeni se ponovo oformljuju, a TPE ponovo dobija svoja elastomerna svojstva.

Zahvaljujući ovakvom *reverzibilnom umrežavanju*, TPE se na povišenim temperaturama ponašaju kao termoplasti, dok na sobnoj temperaturi imaju elastična svojstva nalik onima koje poseduju termoreaktivni elastomeri.

Kao literatura za ovo poglavlje korišćena su poglavlja iz:

1. Knjiga: 3D štampa, Ognjan Lužanin, Novi Sad, 2019.
2. Knjiga: Additive Manufacturing Technologies, I. Gibson | D. W. Rosen | B. Stucker, New York, 2010.

6. SELEKTIVNO LASERSKO SINTEROVANJE

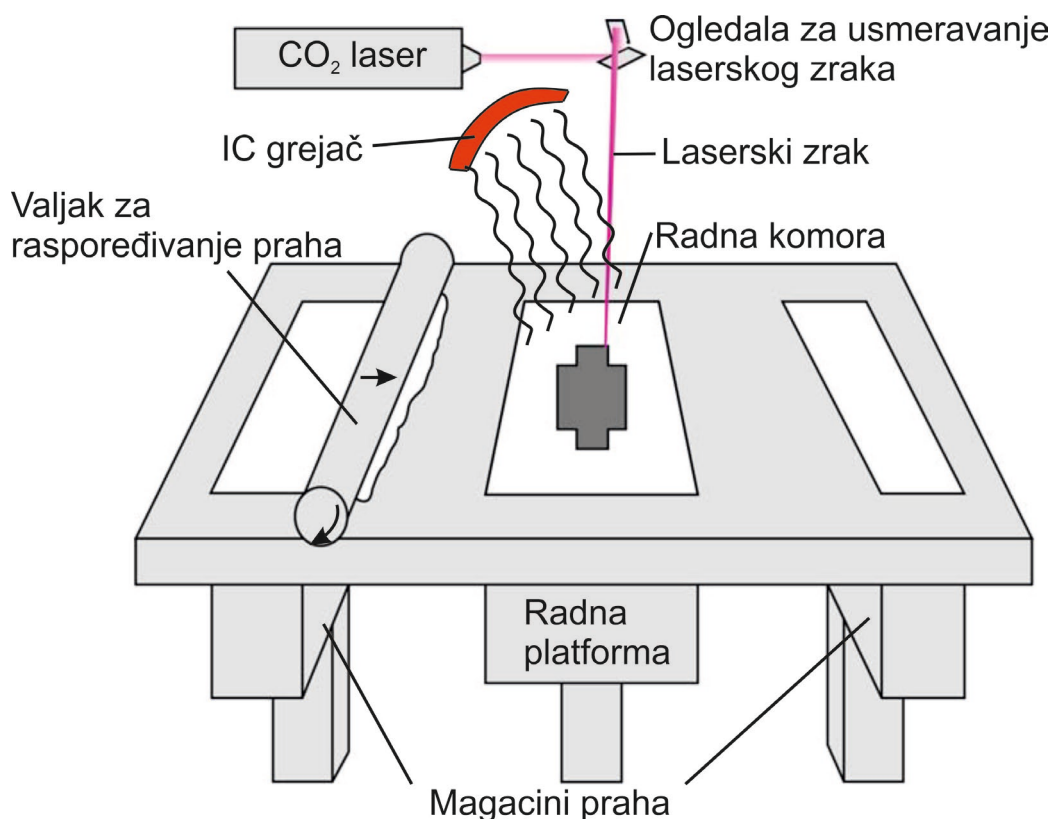
Postupak Selektivnog laserskog sinterovanja (SLS) razvijen je u SAD, na univerzitetu u Teksasu (Ostin), prvenstveno za proizvodnju prototipova od polimernih materijala. Postupak koristi tehniku skeniranja površine laserom radi spajanja čestica praha i formiranje jednog sloja. Danas je tehnika proširena i na druge materijale kao što su: čelični materijali (strukturni i legure), keramika, kompozitni materijali itd.

6.1 Proces SLS

Šema SLS procesa prikazana je na slici 6.1 i 6.2. Prah koji se nalazi u magacinu širi se po radnoj komori pomoću sistema za nanošenje praha, za debljinu sloja koja obično iznosi 0.1 mm. Proces se odvija unutar zatvorene komore ispunjene azotom, ili nekim drugim inertnim gasom, kako bi se smanjila mogućnost oksidacije praha i njegove degradacije. Prah koje se nalazi u radnoj komori se zagreva na temperature koja je bliska temperaturi topljenja ili temperaturi stakljenja praha. Infracrveni grejači su postavljeni iznad radne platforme kako bi zagrejali prah. Takođe, prah koji se nalazi u magacinu praha se zagreva na zadatu temperaturu kako se ne bi tokom procesa mešali prahovi koji imaju različite temperature, što može dovesti do narušavanja procesa. Kod nekih sistema zagreva se i radna ploča (koja se nalazi na dnu radne komore) radi uniformnijeg zagrevanja/hlađenja delova. Predgrevanje praha, kao i uniformnost temperature, vrši se u cilju smanjenja potrebne snage lasera (veća temperatura predgrevanja, potrebna manja snaga lasera) kao i sprečavanju neželjene deformacije (krivljenja) delova usled toplotnih napona.



Slika 6.1 Šema procesa SLS



Slika 6.2 Šema procesa SLS

Kada je sloj praha nanet u radnoj komori i predgrejan na zadatu temperaturu, laserski zrak (obično se koristi CO₂ laser) skenira površinu praha po zadatoj putanji očvršćavanja i na taj način se vrši spajanje čestica praha. Pomeranje laserskog zraka vrši se pomoću dva galvanometra (za svaku osu po jedan). Okolni prah ostaje neočvrstnut, i kao u procesu vezivne 3D štampe može služiti kao potpora za sledeće sloj, pa nije potrebno generisati potpore. Nakon završetka izrade

jednog sloja, radna platforma se spušta za debljinu sloja i proces se iterativno ponavlja dok se ne izradi čitav deo. Nakon završetka procesa, deo se mora postepeno hladiti radi sprečavanja neželjenih deformacija (skupljanje usled termalnih naprezanja). Takođe, ako se deo odmah nakon štampe izvadi van mašine, usled kontakta sa kiseonikom iz vazduha može doći do njegove oksidacije i degradacije. Hlađenje dela je potrebno i radi mogućnosti manipulacije i čišćenja bez opasnosti po operatera.

6.2 Mehanizmi fuzije praha

Od pojave SLS-a, svaki novi razvojni inženjer tehnologije uveo je konkurentnu terminologiju kako bi opisao mehanizam po kojem dolazi do fuzije, pri čemu su najpopularnije varijante „sinterovanja“ i „topljenja“. Međutim, upotreba jedne reči za opisivanje mehanizma fuzije praha je inherentno problematična, jer je moguće više mehanizama. Postoje 4 različita fuzionna mehanizma koji su prisutni u SLS procesima. To su:

- sinterovanje u čvrstom stanju,
- hemijski indukovano spajanje,
- sinterovanje u tečnoj fazi i
- potpuno topljenje.

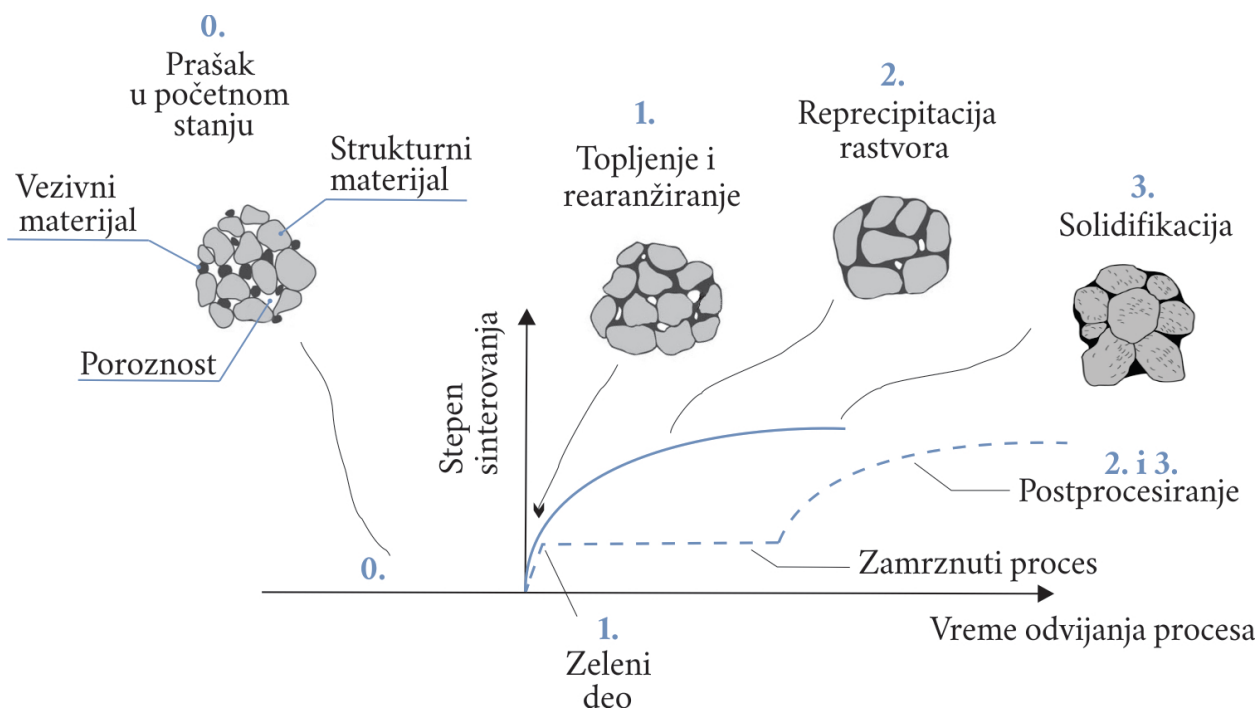
Većina komercijalnih procesa koristi prevashodno sinterovanje i topljenje u tečnoj fazi.

6.2.3 Sinterovanje u tečnoj fazi

Proces sinterovanja u prisustvu tečne faze, obuhvata tri ključne faze (sl. 6.5):

- Topljenje i rearanžiranje;
- Rastvaranje i reprecipitaciju;
- Finalnu solidifikaciju.

U inicijalnoj fazi zagrevanja još uvek nema topljenja i pojave tečne faze, a početno, slabo vezivanje čestica, odvija se kroz proces atomske difuzije koja je karakteristična za sinterovanje u čvrstoj fazi (sl. 6.5 – faza 0). U prvoj karakterističnoj fazi topljenja i reanžiranja, najpre dolazi do stvaranja tečne faze, koja se širi u šupljinama između čestica čvrste faze i, usled prisustva površinskih napona, obavlja kvašenje zrna (sl. 6.5 -faza 1). Dobro kvašenje zrna izaziva pojavu jakih kapilarnih sila, koje su glavni pokretač rearanžiranja čestica čvrste faze. Pod dejstvom kapilarnih sila, čestice se pomeraju i prepakuju, smanjujući ukupnu poroznost. Do eliminacije poroznosti dolazi usled težnje sistema da minimizira ukupnu površinsku energiju. Količina tečne faze i veličina čestica značajno utiču na odvijanje densifikacije. Sitnije čestice u pravilu omogućavaju bolje rearanžiranje. Sa druge strane, kontakti između čestica ostvareni u inicijalnoj fazi zagrevanja, kao i nepravilan oblik čestica, otežavaju proces rearanžiranja.



Slika 6.5 Karakteristične faze u procesu sinterovanja u prisustvu tečne faze

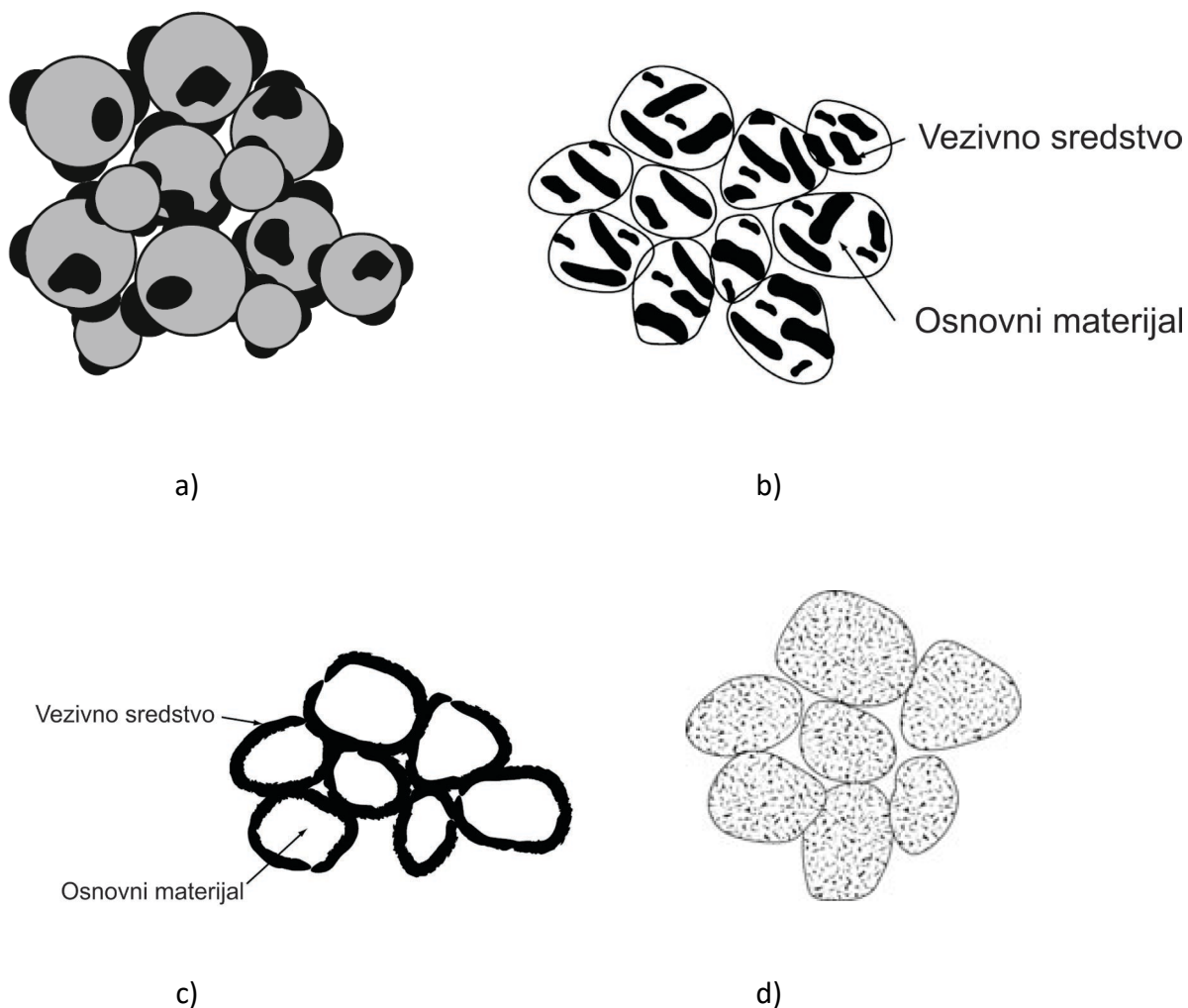
Sinterovanje u tečnoj fazi je verovatno najsvestraniji mehanizam u SLS tehnologiji. Sinterovanje u tečnoj fazi je izraz koji se u velikoj meri koristi u industriji za preradu praha i koji se odnosi na fuziju čestica praha, kada deo čestica u okviru smeše čestica praha postane rastopljen, dok ostali delovi ostaju čvrsti. Pri sinteroivanju u tečnoj fazi, rastopljene čestice deluju kao lepak koji veže čvrste čestice zajedno.

Kao rezultat toga, čestice koje se tope na visokoj temperaturi mogu biti povezane bez potrebe da se one rastapaju ili sintejuju direktno. Sinterovanje u tečnoj fazi se koristi u tradicionalnoj metalurgiji praha za formiranje, na primer, alata za rezanje cementnog karbida gde se Co koristi kao konstitutivni element niske temperature za spajanje čestica VC-a.

Postoji mnogo načina na koje se sinterovanje u tečnoj fazi može koristiti kao mehanizam fuzije u AM procesima. Radi jasnoće, klasifikacija koju su predložili Kruth i dr. je osnova za razlike koje će biti opisane u nastavku.

Čestice koje se koriste pri sinteroivanju u tečnoj fazi mogu se podeliti na:

- a) odvojene čestice,
- b) kompozitni materijali,
- c) obložene čestice i
- d) homogene smeše.



Slika 6.6 Varijacije čestica pri sinterovanju u tečnoj fazi a) odvojene čestice, b) kompozitni materijali, c) obložene čestice i d) homogene smeše

6.2.3.1 Odvojene čestice

Jednostavna, dobro mešana kombinacija čestica veziva i strukturnog praha je u mnogim slučajevima dovoljna za sinterovanje u tečnoj fazi (sl. 6.6a). U slučajevima kada osnovni materijal ima dominantna svojstva poželjna u konačnoj strukturi, pogodno je da čestice vezivnog materijala budu manje od čestica osnovnog materijala. To omogućava efikasnije širenje-raspoređivanje u sloju praha, manje skupljanje i manju poroznost nakon procesa. Disperzija čestica veziva manje veličine čestica oko strukturnih čestica takođe pomaže da se vezivo efektivnije pretoči u praznine (pore) između čestica osnovnog materijala, što rezultira njihovim boljim vezivanjem. Ovo se primenjuje kada se SLS koristi za obradu čeličnog praha sa polimernim vezivom. Takođe primenjuje se i kada se izrađuju delovi od mešavina metal-metal i metal-keramika i to direktno bez upotrebe polimernog veziva.

U slučaju sinterovanja u tečnoj fazi kod odvojenih čestica, izvor toplote prolazi brzo, i obično nema dovoljno vremena da rastopljeno vezivo teče i da površinski napon povuče čestice

zajedno pre ponovnog učvršćivanja veziva, osim ako vezivo ima posebno nisku viskoznost . Zbog ovog fenomena, kompozitne strukture formirane od odvojenih čestica su dosta porozne. Sa druge strane ovakva poroznost je pogodna za delove, koje se zatim naknadno obrađuju (sinteruju) u peći da bi se postigle njihove konačne osobine. Delovi koji su sastavljeni od ovkvih čestica sa polimernim vezivom, a koji zahtevaju dalju obradu (npr. obrada u peći za snižavanje ili popunjavanje poroznosti), nazivaju se "zelenim" delovima.

U nekim slučajevima, gustine veziva i osnovnog materijala su sasvim različite. Kao rezultat, vezivo i osnovni materijal se mogu odvojiti tokom eksploatacije. Pored toga, neki praškasti materijali su najekonomičniji u veličinama čestica koje su premale za efikasno nanošenje u sloju.

6.2.3.2 Kompozitni materijali

Kompozitne čestice (sl. 6.6b) sadrže i vezivo i strukturni materijal unutar svake čestice praha. Čestice praha koje se sastoje od veziva i osnovnih materijala koji se aglomerišu zajedno dobijaju se mehaničkim legiranjem vezivnih i osnovnih čestica ili mlevenjem livenih, ekstrudiranih smeša u prahu. Prednosti kompozitnih čestica su da formiraju zelene delove veće gustine i obično imaju bolju završnu obradu površine nakon procesa nego odvojene čestice.

Kompozitne čestice mogu se sastojati od smeša polimernih veziva sa polimerom više tačke topljenja, metalnim ili keramičkim osnovnim materijalima; ili metalna veziva sa metalima ili keramičkim materijalima koji imaju višu tačku topljenja. U svim slučajevima, vezivni i strukturni delovi svake čestice, međusobno se razlikuju i jasno se mogu videti ako se posmatraju pod mikroskopom. Najčešća komercijalno dostupna kompozitna čestica koja se koristi u procesima je kombinacija najlon - staklo. U ovom slučaju, osnovni materijal (staklene kuglice) se koristi da poboljša svojstva vezivnog materijala (najlon). U ovom slučaju čestice se koriste na netipičan način, tj. vezivo nije samo sredstvo za spajanje koje strukturni materijal drži u geometrijskoj formi, već u kombinaciji sa staklom (osnovnim materijalom) daje željene mehaničke karakteristike.

6.2.3.2 Obložene čestice

U nekim slučajevima, kompozit koji se formira oblaganjem strukturnih čestica vezivnim materijalom je efikasniji od slučajnih aglomeracija veziva i strukturnih materijala. Ove obložene čestice mogu imati nekoliko prednosti; uključujući bolju apsorpciju laserske energije, efikasnije vezivanje strukturnih čestica i bolju tečljivost prilikom topljenja.

Kada se koriste kompozite čestice ili odvojene čestice, nasumična raspodela sastojaka znači da će toplotna energija koja se prenosi na prah, kao što je lasersko zračenje, biti apsorbovana od strane bilo kojeg konstituenta koji ima najveću apsorpciju i / ili najviše direktnu "vidljivost" prema izvoru toplote odnosno zračenja. Ako čestice osnovnog materijala imaju veću apsorpciju, veća količina energije će biti apsorbovana u njima. Ako je brzina zagrevanja

strukturnih čestica znatno veća od brzine provodljivosti da čestica veziva, strukturni materijali sa višim temperaturama topljenja mogu da se rastope pre materijala za vezivanje sa nižom temperaturom topljenja. Kao rezultat, očekivana mikrostruktura nakon procesa značajno će se razlikovati od one u kojoj se vezivo rastopilo, a strukturni materijal je ostao čvrst. Ovo u nekim slučajevima može biti poželjno; ali tipično nije namera kada se formuliše kombinacija veziva / strukturnog materijala. Obložene čestice mogu pomoći u prevazilaženju problema grejanja osnovnog materijala povezanog sa slučajnim smešama i aglomeratima. Ako je strukturna čestica obložena vezivnim materijalom, tada energija koja udara mora prvo proći kroz oblogu pre nego što počne da utiče na osnovni materijal. Kako je cilj procesa topljenje veziva, a ne strukturnog materijal, oblaganje pomaže da se osigura topljenje odgovarajućeg sastojka.

Postoje i druge prednosti obloženih čestica. Pošto postoji direktna korelacija između brzine zraka (izvora energije – laser) i brzine izgradnje u AM obradi, poželjno je da se vezivo rastopi samo na veoma kratak vremenski period. Najefikasnije lepljenje susednih čestica materijala se ostvaruje ako je vezivo prisutno na površinama osnovnog materijala. Ako se vezivo slučajno meša sa strukturnim materijalima, i / ili je viskoznost veziva suviše visoka da bi dolazilo do kontaktnih tačaka tokom kratkog vremena prilikom topljenja, onda vezivo neće biti tako efikasno. Kao rezultat, procentualni sadržaj veziva potreban za efikasnu fuziju obloženih čestica je obično manji od sadržaja veziva potrebnog za efektivno spajanje nasumično mešanih čestica. Mnogi strukturni metalni prahovi su sferični. Sferni prahovi se lakše raspoređuju i ravnaju prilikom nanošenja u jedan sloj. Obložene čestice zadržavaju sferičnu prirodu osnovnog oblika čestica, te se stoga lakše raspoređuju po slojevima.

6.2.4 Potpuno topljenje

Potpuno topljenje je mehanizam koji se najčešće povezuje sa procesom spajanja slojeva praha pri korišćenju inženjerskih legura metala i polukristalnih polimera. U ovim materijalima, celokupna oblast materijala podvrgnuta usmerenoj toplotnoj energiji, koja topi prah do dubine koja prelazi debljinu sloja. Toplotna energija naknadnog skeniranja laserom ili elektronskim snopom je dovoljna da se ponovo rastopi deo prethodno očvrste strukture; i stoga, ovaj tip potpunog topljenja je veoma efikasan u stvaranju dobro vezanih, visoko-gustih struktura od inženjerskih metala i polimera.

Najčešći materijal koji se koriste SLS postupcima je poliamid. Kao polu-kristalni materijal, ima tačnu tačku topljenja. Da bi se proizveli delovi sa najvećom mogućom čvrstoćom, ovi materijali treba da se u potpunosti otope tokom obrade. Međutim, povišene temperature povezane sa potpunim topljenjem za rezultat imaju rast delova i stoga, iz praktičnih razloga, mnoge studije optimizacije čvrstoće rezultiraju parametrima koji su na granici između potpunog topljenja i sinterovanja u tečnoj fazi. Za procese spajanja slojeva metalnog praha, inženjerske legure koje se koriste u ovim mašinama (Ti, nerđajući čelik, CoCr, itd.) se obično potpuno tope. Brzo topljenje i očvršćavanje ovih metalnih legura rezultira jedinstvenim svojstvima finalnog dela koja se razlikuju od livenog ili kovanog dela napravljenog od identičnih legura, i mogu biti bolja.

Bez obzira da li je tehnologija spajanja česti praha na opisane načine poznata kao „selektivno lasersko sinterovanje (SLS)“, „selektivno lasersko topljenje (SLM)“, „direktno lasersko sinterovanje metala“, „topljenje mlazom elektrona (EBM)“ ili neko pod nekim drugim imenom, bilo koji od navedenih imena koristi mehanizam spajanja čestica (i u stvari, često je prisutan više od jednog) u zavisnosti od kombinacija čestica praha i utroška energije koja se koristi za formiranje dela

6.3 Nanošenje praha u slojeve

Razvijeno je nekoliko različitih sistema za nanošenje praha u SLS procesima. Razvoj novih sistema iznuđen je izbegavanjem patentiranog sistema kontrarotirajućeg valjka koji se prvo koristio u SLS mašinama. Razvoj drugih pristupa doveo je do šireg spektra tipova praha i morfologija koje se mogu koristiti. Svaki sistem za isporuku praha za fuziju sloja mora ispuniti najmanje četiri karakteristike.

- 1 Mora imati magacin praha dovoljne zapremine kako bi proces mogao da se izvede do maksimalne visine radnog prostora bez potrebe za pauziranjem mašine za dopunjavanje rezervoara praha.
- 2 Tačna zapremina praha mora se transportovati iz magacina praha do radne platforme, a mora biti dovoljna da pokrije prethodni sloj, ali bez prevelikog rasipanja viška materijala.
- 3 Prah se mora rasporediti tako da formira gladak, tanak, sloj praha i taj proces mora biti ponovljiv.
- 4 Raspoređivanje praha ne sme da stvara prekomerne sile smicanja koje mogu oštetiti prethodno izrađene slojeve.

Pored toga, bilo koji sistem za isporuku praha mora biti u stanju da se nosi sa sledećim osobinama praha:

1. Kako se veličina čestica smanjuje, povećava se trenje među česticama i elektrostatičke sile. Ovo rezultira stanjem u kojoj prah može izgubiti svoju fluidnost (pokretljivost). (Da bi ilustrovali ovaj gubitak fluidnosti, uporediti karakteristike tečenja kašičice pune kristal šećera sa kašičicom punom šećera u prahu. Kristal šećer će iscuriti iz kašike na relativno malom nagibu, dok će šećer u prahu ostati dok se kašika ne nagne pod većim uglom, u kom trenutku će ispasti kao velika grudva, osim ako neka smetnja (vibracija, trešenje itd.) ne prouzrokuje da se ispadne mala količina u isto vreme.) Dakle, bilo koji efikasan sistem za isporuku praha mora da obezbedi fluidnost praha kako bi nanošenje bilo efikasnije i tačnije.

2. Kada se odnos površine i zapremine čestica poveća, njena površinska energija se povećava i postaje reaktivnija. Za određene materijale, to znači da prah postaje eksplozivan u prisustvu kiseonika ili će se zapaliti ako postoji varnica. Kao rezultat toga, određeni praškovi moraju biti skladišteni u inertnoj atmosferi tokom procesa, a rukovanje prahom ne bi trebalo da izazove varnicu.

3. U procesu, male čestice imaju tendenciju da kontaminiraju vazduh u uređaju i lebde kao oblak čestica. U SLS mašinama, čestice u vazduhu će se taložiti na okolnim površinama; što može izazvati prljanje optike, smanjiti osjetljivost senzora, skrenuti laserski zrak, i oštetiti pokretne delove uređaja. Pored toga, čestice u vazduhu imaju efektivnu površinu veću od praškova u komori, povećavajući njihovu reaktivnost što kao i u prethodnom slučaju može izazvati eksploziju ili zapaljivanje. Kao rezultat ovoga, sistem za isporuku praha treba da bude projektovan na takav način da minimizira mogućnost stvaranje čestica u vazduhu.

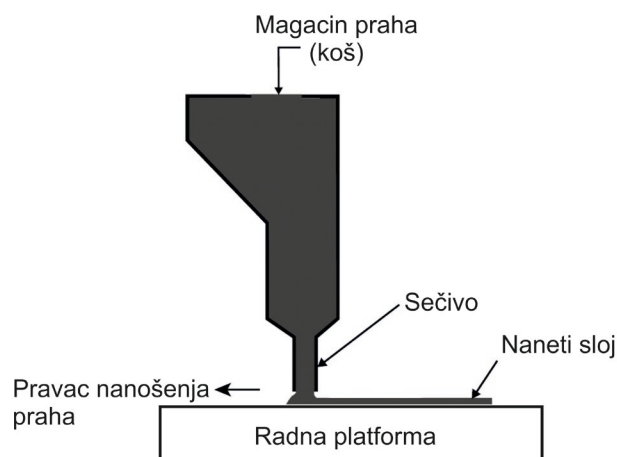
4. Manje veličine čestica praha omogućavaju bolji završni kvalitet površine, veću preciznost i tanje slojeve. Međutim, manje veličine čestica praha pogoršavaju sve prethodno pomenute probleme. Kao rezultat ovoga, svaki dizajn sistema za isporuku praha je se projektuje na način kako bi obezbedio najmanje moguće čestice praha koje mogu da se koriste, a pri tome da prevaziđe probleme koje one nose sa sobom.

6.4 Varijante sistema za nanošenje praha

Najraniji komercijalizovani sistem za isporuku praha u tehnologiji SLS, ilustrovan na slici 6.2. Dva magacina za punjenje predstavljaju rezervoar praha; sa dovoljno materijala da u potpunosti popune radnu platformu do najveće visine. Tačna količina praha za svaki sloj se obezbeđuje preciznim podizanjem dna magacina praha za punjenje radnog prostora do potrebne visine (količine praha), a u zavisnosti od debljine sloja. Izdignuti prah iznad magacina se zatim pomera pomoću kontra-rotirajućeg valjka preko radne platforme, nanoseći prah na nju. Sve dok je visina valjka konstantna, debljina slojeva će zavisiti od visine za koju se spusti radna platforma. Kontrarotirajuće dejstvo valjka stvara "talas" praha koji teče ispred cilindra i čini ga fluidnijim. Ovaj smer rotacije gura prah na gore uz valjak, čineći ga fluidnijim i omogućavajući ravnomerno i precizno širenje po radnom prostoru. Sile smicanja ka prethodno izrađenim slojevima stvorene ovim kontrarotirajućim valjkom su male, pa su prethodno izrađeni slojevi relativno neporemećeni.

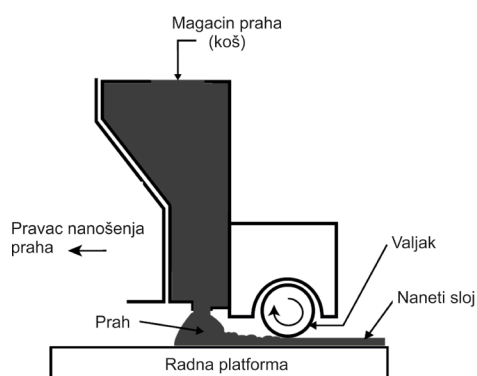
Još jedno često korišćeno rešenje za nanošenje praha je sistem sa sečivom (slika 6.7) . Sečivo je jednostavan tanak komad metala koji se koristi za „struganje, skidanje“ viška materijala sa površine praškastog sloja. Kada se koristi sečivo, prah se ne fluidizuje. Prema tome, sile smicanja primenjene na prethodno nanoseni sloj su veće nego u slučaju kontrarotirajućeg valjka. Ovo povećano smicanje se može smanjiti ako se koristi sečivo sa ultrazvukom, čime se delimično fluidizuje prah koji se gura.

Alternativni pristup korišćenju prikazanog magacina za prah je korišćenje sistema za dovod praha preko koša. Sistem sa košem isporučuje prah u ispred noža ili valjka odozgo, a ne ispod njega (slika 6.7 i 6.8). Magacin za prah je obično odvojen od radnog prostora mašine.



Slika 6.7 Sistem za nanošenje praha sa sečivom i košem

U slučaju izrade delova gde se kombinuju materijali kroz slojeve, jedini efikasan metod je upotreba više koševa sa odvojenim materijalima. U sistemu sa višestrukim koševima, tip materijala se može menjati po slojevima. Ovakav pristup demonstriran je samo u istraživačkom okruženju, i neke kompanije ga koriste za vrlo male delove.



Slika 6.8 Sistem za nanošenje praha sa valjkom i košem

6.5 Recikliranje praha

Kao što je već pomenuto, prilikom sinterovanja temperatura predgrevanja praha koji okružuje deo koji se izrađuje, može izazvati fuziju zrna čestica u zapremini praha koja nema kontakt sa laserskim zrakom. Pored toga, povišene temperature, naročito u prisustvu atmosferskih gasova, takođe menjaju hemijske osobine čestica praha. Slično tome, držanje polimernih materijala na povišenim temperaturama može da promeni molekularnu težinu polimera. Ovi kombinovani efekti znače da svojstva različitih vrsta prahova (posebno polimera) koji se koriste u SLS procesima menjaju njihove osobine kada se recikliraju i ponovo koriste. Za neke materijale ove promene su male i stoga se mogu više puta reciklirati. U drugim materijalima ove promene su dramatične, i stoga se mora koristiti visoko kontrolisana metodologija recikliranja da bi se održale konzistentne karakteristike izrađenih delova. Za najpopularniji

polimerni materijal koji se koristi u SLS, poliamid i efektivna veličina čestica i molekularna težina se menjaju tokom obrade. Kao rezultat toga, razvijene su brojne metodologije za recikliranje koje nastoje da održe konzistentna svojstva praha. Najjednostavniji pristup ovom problemu recikliranja je mešanje specifičnog odnosa neiskorišćenog praha sa korišćenim prahom. Primer smeše na bazi frakcija može biti 1/3 neiskorišćenog praha, 1/3 iz magacina praha i 1/3 praha iz radne komore. Prah iz magacina praha i prah iz radne komore se odvojeno posmatraju, jer su tokom procesa izloženi različitim temperaturnim profilima. Prah iz magacina je samo neznatno modifikovan u odnosu na originalni materijal, jer je bili izložen nižim temperaturama. Sa druge strane deo praha iz radne komore je z na povišenoj temperaturi, ponekad i na mnogo sati.

Korišćeni prah se mora nakon vađenja iz radnog prostora prosejati pomoću sita odnosno separatora, kako bi se odvojio aglomerizovan prah od praha koji nije aglomerizova. Bez obzira na metodu sortiranja čestica, veoma je važno da se materijal dobro pomeša tokom recikliranja jer će u suprotnom, delovi napravljeni od recikliranog praha imati različita svojstva na različitim lokacijama.

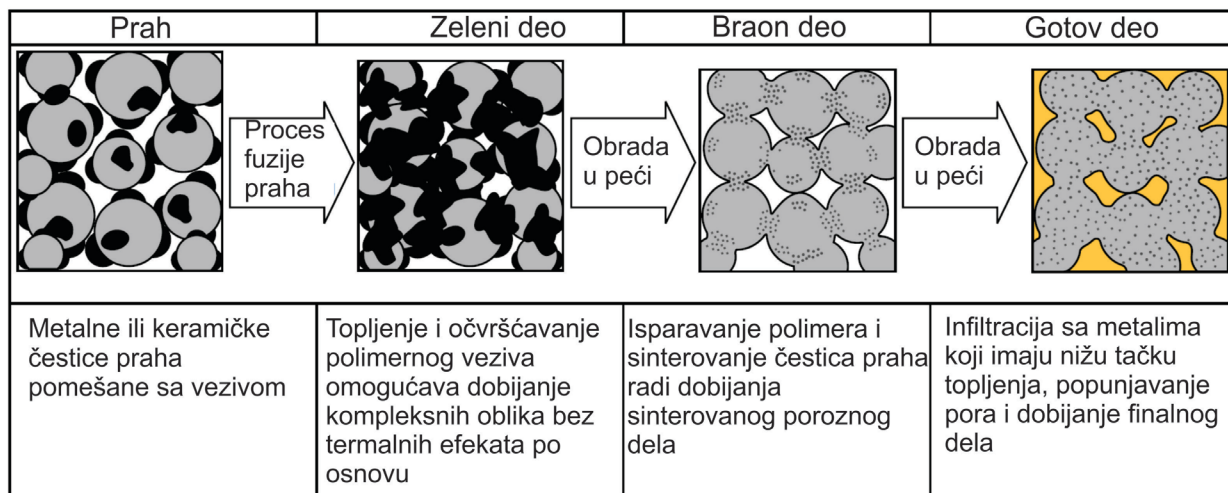
6.6 Metalni prahovi

Postoje četiri uobičajena pristupa za korišćenje SLS tehnologije u izradi kompleksnih metalnih komponenti: potpuno topljenje, sinterovanje u tečnoj fazi, indirektna izrada i metode grozda. Kao što je ranije razmotreno, u potpunom topljenju metalni praškasti materijal je potpuno rastopljen korišćenjem lasera velike snage ili elektronskog snopa; a u pristupu sinterovanja u tečnoj fazi koristi se mešavina dva praha metala ili legure metala, gde je konstituent sa većom temperaturom topljenja i dalje čvrst, a konstituent sa nižom temperaturom topljenja se topi. U oba ova pristupa, metalni deo je obično upotrebljiv u stanju u kome izlazi iz mašine, nakon odvajanja od ploče za izgradnju.

Kod indirektno izrade, metalni prah obložen polimerom ili smeša metalnih i polimernih prahova koriste se za izradu delova. Slika 6.9 prikazuje korake indirektno obrade metalnog praha. Prilikom indirektno obrade, polimerno vezivo se topi i veže čestice metalnog praha zajedno, dok metalni prah ostaje čvrst. Metalne čestice praha ostaju uglavnom nepromenjene pod uticajem toplote lasera. Proizvedeni delovi su veoma porozni (ponekad i preko 60 vol.% poroznosti). Zeleni delovi vezani polimerom se zatim obrađuju u pećima. Obrada u pećima se odvija u dve faze: (1) uklanjanje vezivnog sredstva i (2) infiltracija ili dodatno sinterovanje. Prilikom prve faze, polimerno vezivo isparava i na taj način se uklanja iz zelenog dela. Temperatura se povećava do te mere da se između metalnih čestica javlja vrat (sinterovanje). Nakon toga, preostala poroznost se eliminiše na dva načina:

- infiltracijom metalom niže tačke topljenja da bi se dobio potpuno gusti metalni deo ili
- dodatnim sinterovanjem i zgušnjavanjem da se smanji poroznost dela.

Infiltraciju je lakše kontrolisati, sa stanovišta tačnosti dimenzija, pošto je ukupno skupljanje mnogo manje nego tokom dodatnog sinterovanja. Međutim, infiltrirane strukture su uvek kompozitne prirode, dok sinterovane strukture mogu biti sastavljene od jednog tipa materijala.



Slika 6.9 Indirektan izrada delova pomoću metalnih prahova

Posljednji pristup stvaranju metalnih dijelova pomoću SLS-a je pristup grozdova. Za prethodna 3 pristupa, metalni prah se koristi u SLS procesu; ali u ovom pristupu, deo kreiran u SLS procesu je model koji se koristi za stvaranje metalnog dela. Dva najčešća načina na koji se delovi izrađeni SLS tehnologijom koriste kao šabloni za stvaranje metalnih delova su modeli za precizno livenje ili kao kalupi za livenje u pesku. U slučaju preciznog livenja, u mašini se koriste prahovi na bazi polistirena ili voska; i naknadno se uranjaju u keramiku i obrađuju se u pećima kako bi se grozd (model) istopio pre livenja. U slučaju kalupa za livenje u pesku, smeše peska i termoreaktivnog veziva se direktno izrađuju u mašini da bi se formirala jezgra ili šupljina za livenje u pesku. Ovi kalupi se zatim sklapaju, a rastopljeni metal uliva u kalup, stvarajući metalni deo.

6.7 Topljenje mlazom elektrona (EBM)

Za razliku od laserskih sistema, EBM koristi visoko-energetski elektronski snop da indukuje fuziju između čestica metalnog praha. Ovaj proces je razvijen na Tehnološkom Univerzitetu Chalmers, Švedska, a komercijalizovan je od strane kompanije Arcam AB, Švedska 2001. godine.

U EBM procesu, fokusirani elektronski snop skenira tanak sloj prethodno postavljenog praha, uzrokujući lokalizovano topljenje i ponovno očvršćavanje po poprečnom preseku. Međutim, postoje brojne razlike između SLM i EBM pristupa, koji su sažeti u tabeli 6.1.

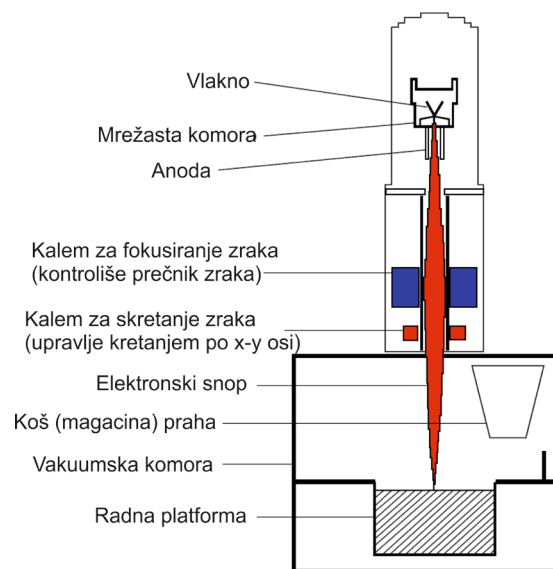
Tabela 6.1 Razlike između SLM i EBM pristupa

Karakteristika	EBM	SLM
Izvor toplote	Snop elektrona	Laser
Atmosfera	Vakuum	Inertni gas
Vođenje zraka	Magnetni kalemovi	Galvanometri
Apsorpcija energije	Provodljivost	Apsorpcija
Predgrevanje praha	Elektronski snop	IC grejači
Brzina skeniranja	Veoma brza (magneti)	Limitirana (galvanometri)
Potrošnja energije	Srednja	Visoka
Kvalitet površine	Srednja do loša	Odlična do srednja
Rezolucija	Srednja	Odlična
Materijali	Metali (provodljivi)	Polimeri, metali, keramika

Elektronski snopovi su različiti od laserskih zraka, pošto se elektronski snopovi sastoje od struje elektrona koji se kreću blizu brzine svetlosti, dok se laserski zrak sastoji od fotona koji se kreću brzinom svetlosti. Kada se elektronski snop propušta kroz gas pri atmosferskom pritisku, elektroni stupaju u interakciju sa atomima u gasu i odbijaju se. Nasuprot tome, laserski snop može proći kroz gasove sve dok su transparentni za talasnu dužinu lasera. Dakle, proces EBM se izvodi u vakuumskom okruženju sa niskim pritiskom (mala količina inertnog gasa se dodaje da bi se uklonili gasoviti nusproizvodi i kiseonik), dok se proces SLM izvodi u atmosferi inertnog gasa pri atmosferskom pritisku.

Elektroni imaju negativan naboj i fokusirani su i elektronskim snopom se upravlja elektromagnetnim poljem (magnetnim zavojnicama slika 6.10), dok su fotoni optički fokusirani i upravljani galvanometarskim mehanizmom. Kao rezultat toga, pošto magnetne zavojnice imaju skoro trenutni odziv, elektronski snop se prilikom skeniranja površine može kretati polako ili veoma brzo. U suštini, elektronski snop se može trenutno pomeriti sa jedne lokacije na drugu. Nasuprot tome, galvanometri su ogledala vezana za motore. Da bi fokalna tačka laserskog snopa prešla iz tačke A u tačku B, motori galvanometra moraju da pomeraju ogledala u skladu sa tim.

Dakle, praktično trenutno kretanje nije moguće i brzina skeniranja se određuje masom ogledala, karakteristikama motora i rastojanjem od ogledala do sloja praha.



Slika 6.10 Princip EBM postupka

Laserske zrak zageva prah kada čestice praha apsorbiraju fotone. Elektronski snopovi, međutim, zagrevaju prah prenosom kinetičke energije iz dolazećih elektrona u čestice praha. Kada čestice praha apsorbiraju elektrone, postaju negativno naelektrisane. Ovo ima dva potencijalno štetna dejstva:

- (1) ako odbojna sila susednih negativno naelektrisanih čestica prevaziđe gravitacione i frikционе sile koje ih drže na mestu, doći će do brzog izbacivanja čestica iz nanetog sloja praha, stvarajući oblak praha; i
- (2) povećanje negativnog naboja u česticama praha će imati tendenciju odbijanja dolaznih negativno nabijenih elektrona, stvarajući tako rasipanje zraka (snopa elektrona).

Ovih dopunskih fenomena nema kod fotonima. Kao rezultat, provodljivost sloja praha u EBM mora biti dovoljno visoka da čestice praha ne postanu visoko negativno naelektrisane, a moraju se i koristiti različite strategije skeniranja snopom (putanja očvršćavanja) da bi se izbeglo nagomilavanje oblasti negativno naelektrisanih čestica. U praksi, energija elektronskog snopa je više difuzna, kako ne bi došlo do prevelikog negativnog naelektrisanja na bilo kojoj lokaciji. Kao rezultat toga, povećava se efektivna veličina zapremine topljenja, stvarajući veću toplotno pogodenu zonu. Shodno tome, minimalna veličina delova, rezolucija i završna obrada EBM procesa je obično veća od SLM procesa. Kao što je gore pomenuto, u EBM sloj praha mora biti provodljiv i prema tome EBM se može koristiti samo za obradu provodljivih materijala (npr. metala), dok se laseri mogu koristiti sa bilo kojim materijalom koji apsorbira energiju na talasnoj dužini lasera (npr. metali, polimeri i keramika).

Generisanje elektronskog snopa je obično mnogo efikasniji proces od generisanja laserskog snopa sa stanovišta nastanka zraka za skeniranje (zagrevanje). Kada se razlika napona primeni na zagrejanu nit u sistemu elektronskog snopa, većina električne energije se pretvara u elektronski snop. Nasuprot tome, uobičajeno je da se samo 10-20% ukupnog unosa električne energije za laserske sisteme pretvara u energiju snopa, dok se preostala energija gubi u stvaranje toplote korišćenjem IC ili otpornih grejača. Pored toga, laseri sa energijama snopa većim od 1 kV su obično mnogo skuplji od sistema sa elektronskim snopom slične energije. Dakle, elektronski snopovi su jeftiniji izvor visoke energije od laserskih zraka. Međutim, noviji laserski sistemi su jednostavniji po svom dizajnu, pouzdaniji su, jednostavniji za održavanje i zbog toga ova prednost troškova energije za elektronske zrake ne može biti velika prednost u budućnosti.

Radna površina kod EBM procesa (temperatura praha) se održava na višoj temperaturi nego kod SLM sistema, a za to postoji nekoliko razloga. Prvo, viši energetski unos elektronskog snopa koji se koristi u sistemu EBM prirodno zagreva okolni neočvrnuti prah na višu temperaturu od laserskih zraka niže energije. Da bi se održala stabilna i ravnomerna temperatura tokom procesa, EBM proces koristi elektronski zrak za zagrevanje metalne podloge na dnu platforme, a pre nanošenja praha na radnu ploču. Defokusiranjem (rasipanjem) elektronskog snopa i skeniranjem velikom brzinom preko čitave površine supstrata ili sloja praha, sloj se može brzo i ravnomerno zagrejati na bilo koju prethodno podešenu temperaturu. Kao rezultat, IC i otporni grejači prisutni u većini SLM sistema za predgrevanje praha se obično ne koriste u EBM.

Jedan od najperspektivnijih aspekata EBM-a je sposobnost pomeranja snopa skoro trenutno. Iako trenutni sistem kontrole za EBM mašine koristi ovu mogućnost, buduća poboljšanja u strategijama skeniranja mogu dramatično povećati brzinu izrade delova procesom EBM-a, čime se još više razlikuje od SLM-a za određene aplikacije. Na primer, kada se kreiraju rešetkaste strukture (sa dizajniranom unutrašnjom poroznošću), trenutno kretanje snopa iz jedne lokacije skeniranja u drugu može dramatično ubrzati proizvodnju završnog proizvoda. Osim toga, buduće strategije skeniranja mogu pomoći da se smanje zaostali naponi nakon procesa. Jedan od primarnih ciljeva jeste da se omogući izrada kompleksnih delova slobodne forme bez vezivanja za osnovni supstrat (radnu ploču). Ovo će imati značajne koristi za krajnje korisnike, jer potreba za uklanjanjem metalnih nosivih struktura znači da je postprocesiranje nakon EBM i SLM neizbežno, a to iziskuje dodatnu mašinsku opremu u vidu mašina alatki (testere, brusilice, strugovi, EDM uređaji sa žicom itd).

6.10 Prednosti i ograničenja procesa

U SLS, neočvrnuti sloj praha je dovoljan noseći materijal za polimerne delove, pa stoga nisu potrebni nikakvi vidovi potpora. Time se štedi značajno vreme tokom izrade delova i naknadne obrade, i omogućava izrada složene geometrije, koju je teško naknadno obraditi kada su neophodne potpore. Kao rezultat toga moguće je izraditi i kanali za hlađenje u unutrašnjosti delova. Potpore su međutim potrebne za većinu metalnih materijala. Visoka zaostala naprezanja, koja se javljaju kod izrade delova od metala, iziskuju potpore kako bi se sprečilo prekomernog savijanje izrađenih delova. To znači da naknadna obrada metalnih delova nakon AM može biti

skupa i dugotrajna. Mali delovi (uključujući unutrašnje kanale za hlađenje) obično se mogu izraditi bez potpora; ali deo je obično vezan na dno radne platforme da bi se sprečilo savijanje.

Tačnost i završna obrada AM procesa na bazi praha su obično lošiji od procesa zasnovanih na očvršćavanju fluida. Međutim, na preciznost i završni kvalitet površine veoma utiču parametri procesa i veličina čestica praha. Finije veličine čestice proizvode površine manje hrapavosti, preciznije delove, ali ih je teško rasporediti i obraditi. Veće čestice olakšavaju obradu i nanošenje praha, ali je površina povišene hrapavosti, i smanjuje se minimalna debljinu sloja. Materijali za koji se koriste u ovim procesima obično pokazuju skupljanje od 3-4%, što može dovesti do deformacije delova. Materijali sa niskom toplotnom provodljivošću rezultiraju boljom preciznošću, a rast dela (netačnost dimenzija) se minimizira kada je provođenje toplote svedeno na minimum.

U SLS procesima ukupno vreme izrade delova može da traje duže nego kod drugih aditivnih postupaka zbog ciklusa predgrevanja i hlađenja. Međutim, kod novijih konstrukcija mašina, pokretne platforme omogućavaju pregrevanje i hlađenje van mašine, što omogućava mnogo veću produktivnost. Pored toga moguće je kao i kod vezivne 3D štampe izrađivati veliki broj delova različite geometrije raspoređenih po celoj radnoj zapremini radne komore. Ovo omogućava neočvrnuti prah koji pruža svojevrsnu potporu delovima i onemogućava njihovo međusobno spajanje. Takođe, zbog ovog fenomena moguće je izrađivati pokretne delove u sklopovima (npr. sklopljeni kuglični ležaj), što nijednom drugom konvencionalnom tehnologijom nije moguće.

Kao literatura za ovo poglavlje korišćena su poglavlja iz:

1. Doktorska disertacija: Optimizacija parametara postprocesiranja u tehnologiji vezivne 3D štampe, Dejan Movrin, Novi Sad, 2017.
2. Knjiga: 3D štampa, Ognjan Lužanin, Novi Sad, 2019.
3. Knjiga: Additive Manufacturing Technologies, I. Gibson | D. W. Rosen | B. Stucker, New York, 2010.