

# Mogućnost primjene predoblika načinjenih postupkom svjetlosnog očvršćivanja kroz LCD zaslon u ljevanju metalnih odljevaka

---

**Tomašić, Vedran**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:201326>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-01**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Vedran Tomašić

**Zagreb, 2021.**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing. stroj.

Student:

Vedran Tomašić

**Zagreb, 2021.**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Ani Pilipović na velikoj pomoći ukazanoj prilikom izrade završnog rada te na nesebičnom dijeljenju vlastitog znanja i iskustva.

Hvala gospodinu Ivanu Zovku iz Ljevaonice IMPK na pomoći i savjetima prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Od srca se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na velikom povjerenju i strpljenju tijekom studija te na neprestanoj i inspirativnoj podršci prilikom stjecanja akademskog obrazovanja.

Vedran Tomašić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite

Povjerenstvo za diplomске radove studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/21-6/1
Ur. broj:	15-1703-21

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **VEDRAN TOMAŠIĆ** Mat. br.: 0035202613

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mogućnost primjene predoblika načinjenih postupkom svjetlosnog očvršćivanja kroz LCD zaslon u lijevanju metalnih odljevaka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Possibility of preform application made with masked stereolithography in casting of metals**

Opis zadatka:

Aditivna proizvodnja omogućuje u kratkom vremenu izradu komplicirane geometrije prema računalnom CAD modelu. Najstariji postupak u aditivnoj proizvodnji je postupak gdje se primjenjuje materijal u obliku kapljevine koja umrežuje pri djelovanju laserske zrake. Danas se na tržištu mogu pronaći različite modifikacije postupka i 3D pišaća koji su jeftiniji, pa je jedan od takvih postupaka svjetlosno očvršćivanje kroz LCD zaslon (masku) (eng. masked stereolithography – MSLA). Tim postupkom je moguće izrađivati pramodela koji služe za dobivanje kalupne šupljine u postupku lijevanja metalnih tvorevina.

U sklopu rada potrebno je opisati i objasniti sve aditivne postupke fotopolimerizacije u komori i materijale koji se primjenjuju. U eksperimentalnom dijelu rada prema planu pokusa potrebno je izraditi tvorevine različite debljine s različitim vremenom ekspozicije, te ustanoviti koji su parametri nužni (prvenstveno temperature lijevanja) da se tako dobivena tvorevina može primjenjivati u ljevarstvu i kako to utječe na livljivost i dimenzijsku stabilnost gotove metalne tvorevine.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:  
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:  
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. Ana Pilipović

Ana Pilipović

Predsjednica Povjerenstva:  
prof. dr. sc. Biserka Runje

Biserka Runje

## Sadržaj

POPIS SLIKA .....	i
POPIS TABLICA.....	ii
POPIS KRATICA .....	iii
POPIS OZNAKA .....	iv
SAŽETAK .....	v
SUMMARY .....	vi
1. UVOD.....	1
2. RAZVOJ ADITIVNIH POSTUPAKA.....	2
2.1. Osnovna podjela postupaka aditivne proizvodnje.....	4
3. FOTOPOLIMERIZACIJA .....	6
3.1. Osnove fotopolimerizacije .....	6
3.2. Kationska fotopolimerizacija .....	7
3.2.1. Razvoj kationskih fotoinicijatora .....	8
3.3. Radikalna fotopolimerizacija .....	10
4. POLIMERIZACIJA U KOMORI.....	13
4.1. Stereolitografija.....	13
4.1 Postupak stereolitografije .....	13
4.2. Očvršćivanje s digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. <i>Digital light processing - DLP</i> ) .....	16
4.2.1. Princip rada DLP postupka .....	17
4.2.6. Usporedba postupaka DLP-SLA, SLA i MSLA .....	21
4.3. Postupak DLP uz kontinuirani dotok materijala .....	22
4.4. 3d ispis polimera pri dnevnom svjetlu (e. <i>daylight polymer printing</i> ) .....	26
5. PRIMJENA AM POSTUPAKA U IZRADI PRAMODELA ZA PJEŠČANI I PRECIZNI LIJEV .....	28
5.1. Aditivna proizvodnja pramodela za pješčani lijev .....	28
5.1.1. Veziva u pijesku .....	30
5.2. Aditivna proizvodnja pramodela za precizni lijev.....	33
6. EKSPERIMENTALNI DIO .....	39
6.1. Izrada pramodela postupkom MSLA .....	40
6.2. Postupak lijevanja u pješčane kalupe u ljevaonici <i>IMPK</i> .....	46
7. ZAKLJUČAK.....	51
8. LITERATURA.....	52

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Aproksimacija površine sa manjom rezolucijom – a), i sa većom rezolucijom - b) [2] ..	3
Slika 2.2. Različita geometrija tvorevina koju je moguće izraditi primjenom AM postupaka [3] ..	3
Slika 2.3. Osnovna podjela postupaka aditivne proizvodnje [4] .....	4
Slika 3.1. Skokovita i simultana dvo-fotonska fotopolimerizacija (5).....	7
Slika 3.2. Shematski prikaz jodove ili sumporne soli koje sadrže anion tetrakis(perfluoro-t-butiloksi) aluminat [6].....	9
Slika 3.3. Shematski prikaz kemijske strukture ferocenijskih soli [6] .....	10
Slika 3.4. Prikaz osnovnog principa procesa fotopolimerizacije [7] .....	10
Slika 4.1. Postupak stereolitografije [9] .....	14
Slika 4.2. Primjer tvorevine izrađene postupkom SLA [13] .....	15
Slika 4.3. Model DLP postupka sa jednim čipom [9] .....	17
Slika 4.4. Model DLP postupka s 3 čipa [9].....	17
Slika 4.5. Shema 3D modela u softveru za rezanje .....	18
Slika 4.6. Razlika između uređaja za DLP-SLA i MSLA [15] .....	20
Slika 4.7. Prikaz presjeka zrake izvora svjetlosti postupaka DLP i stereolitografije [15].....	21
Slika 4.8. Shematski prikaz CLIP opreme [16] .....	23
Slika 4.9. Mogućnost rezolucije CLIP postupkom [16] .....	24
Slika 4.10. Shematski prikaz opreme za postupak DPP [18] .....	26
Slika 5.1. Shematski prikaz kalupa i odljevka koji nastaje postupkom pješčanog lijeva .....	29
Slika 5.2. Proizvodni proces u ljevaonici – pješčani lijev [19].....	30
Slika 5.3. Primjer umetnutih jezgri prije nasipavanja pijeska [21] .....	31
Slika 5.4. Prikaz mogućih nepravilnosti na spoju rebra i ostatka modela [23].....	32
Slika 5.5. Primjer 3D ispisanih tvorevina spojenih na uljevni sustav za precizni lijev [24].....	33
Slika 5.6. 4 faze temperiranja polimernog materijala prilikom lijevanja metala A – zagrijavanje, B – gorenje, C – držanje na određenoj temperaturi, D – hlađenje [24].....	34
Slika 5.7. Naknadne operacije nakon DLP-a i skidanja potporne strukture [24].....	35
Slika 5.8. Shematski prikaz postupka preciznog lijeva [25] .....	36
Slika 5.9. Zatvorene čahure kod preciznog lijevanja mogu biti jedino uklonjene razbijanjem keramičkog sloja [26] .....	37
Slika 5.10. PLA 3D ispisana tvorevina i izliveni modeli nastali prema njoj [23].....	37
Slika 5.11. Zagrijani kalup u kojem je polimerna tvorevina rastaljena i kalupna šupljina napunjena rastaljenom mjedi [23].....	38
Slika 6.1. Pripremljen model pločice s potpornom strukturom u softveru <i>Chitobox</i> .....	40
Slika 6.2. 3D pisac Anycubic Photon.....	41
Slika 6.3. Pločica uz vrijeme ekspozicije od 5 sekundi, prema tablici 6.2. ....	43
Slika 6.4. Pločica koja se uslijed nedovoljnog vremena ekspozicija odlijepila na početku ispisivanja .....	44
Slika 6.5. Prikaz okrhnuće tvorevine.....	45
Slika 6.6. Ispisane tvorevine na vremenu ekspozicije od 15 sekundi.....	46
Slika 6.7. Postupak pješčanog lijeva u ljevaonici IMPK .....	47
Slika 6.8.a., 6.8.b Pripremljena kalupna polovica za lijevanje testnih tvorevina .....	48
Slika 6.9.a. Nakon lijevanja metala i hlađenja.....	49
Slika 6.9.b. Rezultat ostvaren nakon hlađenja i skrućivanja metala .....	49

## POPIS TABLICA

Tablica 6.1. Plan pokusa .....	39
Tablica 6.2. Rezultati predpokusa .....	42



**POPIS KRATICA**

<b>Oznaka</b>	<b>Opis</b>
DLP svjetlosnim signalom	Očvršćivanje s digitalno obrađenim svjetlosnim signalom
MSLA	stereolitografija sa LCD maskom
UV	izvor ultraljubičastog zračenja
DPP	3D ispis pri danjem svjetlu
LCD	zaslon s tekućim kristalima
CAD računalom	kontruiranje potpomognuto računalom
STL	standardni triangulacijski jezik
AM	aditivna proizvodnja
DMD	digitalna mikroogledala (e. Digital Micromirror Devices)
LED	svjetleća dioda

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
C	-	konstanta proporcionalnosti
$\alpha_{PI}$	-	koeficijent apsorpcije
$\Phi_0$	-	broj fotona
$D_{e0}$	-	reaktivnost smole

## SAŽETAK

Brzina kojom se trenutno događaju promjene u praktički svim dijelovima svjetske industrije i ekonomije, na neki način tjera ljude i ljudsko znanje da u svakom trenutku bude spremno na traženje novih, boljih rješenja. Iz tog je razloga osnovni cilj ovog rada, vidjeti načine na koji mogu zajedno funkcionirati aditivna proizvodnja i ljevarstvo.

U prvom se dijelu razrađuju prednosti i nedostaci aditivnih postupaka kod kojih do umreživanja materijala dolazi u spremniku s polimernom smolom i to djelovanjem nekog od izvora svjetlosti. Osnovna razlika tih postupaka je upravo u izvoru svjetlosti koji se primijenjuje i koji imaju najveći utjecaj na kvalitetu površine ispisanih tvorevina. U radu se posebno obrađuju postupci DLP, MSLA i stereolitografija kod kojih su izvori svjetlosti za umrežavanje redom projektor, LED i laser.

Ekperimentalni dio prikazuje spoj aditivne tehnologije i ljevarstva. Tako su na MSLA printeru ispisane pločice kojima će se provjeriti da li je moguće taj materijal upotrijebiti kao pramodni za pješčani lijev. Osnovni parametri ispisa su vrijeme ekspozicije i umreživanje te se stoga posebna pažnja obraća na postavljanje upravo tih parametara.

Prije lijevanja napravljeni su i predpokusni kako bi se utvrdile granice vremena ekspozicije sa ciljem da se promotri proces lijevanja u slučaju bolje i slabije umreženih tvorevina. Isto tako, vrijeme ekspozicije utječe i na duljinu ispisa koja u aditivnoj proizvodnji može biti znatna, pa se i iz tog razloga to vrijeme mora smanjiti na minimalnu moguću vrijednost.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, pješčani lijev, parametri prerade, pramodni

## SUMMARY

The speed with which changes are currently taking place in virtually all parts of the world's industry and economy, in a way, forces people and human knowledge to be ready at any moment to look for new, better solutions. For this reason, the main goal of this paper is to see ways in which additive manufacturing and casting can work together.

The first part elaborates the advantages and disadvantages of additive processes in which the crosslinking of the material occurs in a container with a polymer resin. The main difference between these procedures is precisely in the light source that is applied and which have the greatest impact on the surface quality of the printed creations. The paper deals specifically with DLP, MSLA and stereolithography processes in which the light sources for crosslinking are the projector,, and the UV lamp.

The experimental part shows a combination of additive technology and casting. Thus, plates are printed on the MSLA printer to check whether it is possible to use this material as a pre-model for sand casting. The basic print parameters are exposure time and crosslinking, so special attention is paid to setting these parameters.

Prior to casting, pre-experiments were also made to determine the exposure time limits in order to observe the casting process in the case of better and less crosslinked formations. Also, the exposure time affects the print length, which can be significant in additive manufacturing, and for this reason this time must be reduced to the minimum possible value

Key words: additive manufacturing, casting patterns, parameters, sand casting

## 1. UVOD

S obzirom na razvoj aditivne proizvodnje i na sve širi opseg, što materijala, što primjene ovakvih postupaka u industriji, raste važnost provođenja teorijskih i eksperimentalnih ispitivanja kako bi se aditivni postupci primjenjivali što točnije i optimalnije. Ovdje se misli na poštivanje parametara postupaka i odgovarajućih parametara strojeva kako bi se svi oni negativni aspekti 3D ispisa anulirali.

Veliku popularnost mogu zahvaliti tome što je izrazito praktično izraditi brzi prototip proizvoda na ovakav način s obzirom na to da nema potrebe za skupim pred-procesima koji u klasičnim postupcima oduzimaju vrijeme i novac.

Postoji više vrsta postupaka, kao što je su npr. postupci u kojima se slojevi modela grade pomoću rastaljenog polimernog materijal koji se na podlogu nanosi ekstrudiranjem materijala kroz mlaznicu, ili oni u kojima slojevi materijala očvršćuju prilikom njihovog izlaganja nekom od izvora svjetlosti.

U radu će detaljnije biti razrađeni potonji, a to su stereolitografija, DLP (e. *digital light processing*) i DPP (e. *daylight polymer printing*), koji se međusobno razlikuju po izvoru svjetlosti – a to su UV laser, projektor i LCD (e. *liquid crystal display*). Također će se dati pregled osnovnih parametara postupaka kao i njihove prednosti i nedostaci.

Drugi dio rada sadržavat će prikaz spoja aditivne tehnologije i ljevarstva te će ukratko biti prikazano na koji način aditivna tehnologija može unaprijediti ljevarstvo i da li je to uopće moguće.

Prije eksperimentalnog dijela rade se predpokus čija je osnovna zadaća odrediti parametre 3D pisača, ali i vrijeme ekspozicije i umreživanje ispitnih tijela.

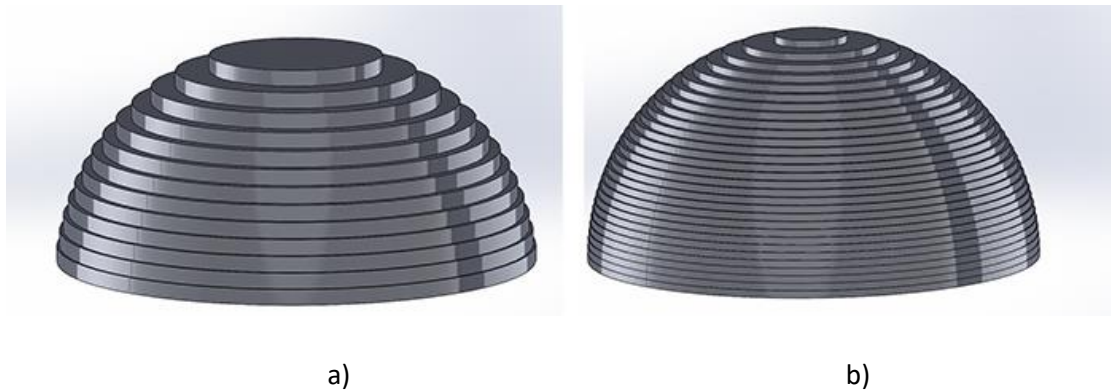
## 2. RAZVOJ ADITIVNIH POSTUPAKA

Aditivni su postupci (e. *Additive manufacturing*) svi oni tehnološki postupci kojima se tvorevina izrađuje gradnjom sloja materijala na sloj. Najranijim se aditivnim postupkom smatra onaj gdje se slojevi umrežuju izlaganjem materijala nekom od izvora svjetlosti, primjerice lasera, LCD izvora i slično. Prvi upotrijebljeni materijali, bili su fotoosjetljivi polimeri. Temeljem toga, 1987. stvoren je prvi pravi aditivni postupak – stereolitografija (SLA). [1]

Nakon postupka SLA, mnogo je drugih proizvodnih postupaka razvijeno koji spadaju u aditivne, od kojih se neki temelje na propuštanju rastaljenog materijala kroz mlaznice, to jest ekstrudiranja materijala, neki na rezanju i kemijskoj i toplinskoj obradi itd. Nadalje, možda najzanimljiviji postupci su baš ovi temeljeni na fotopolimerizaciji koji će detaljnije biti opisani u daljnjem dijelu rada.

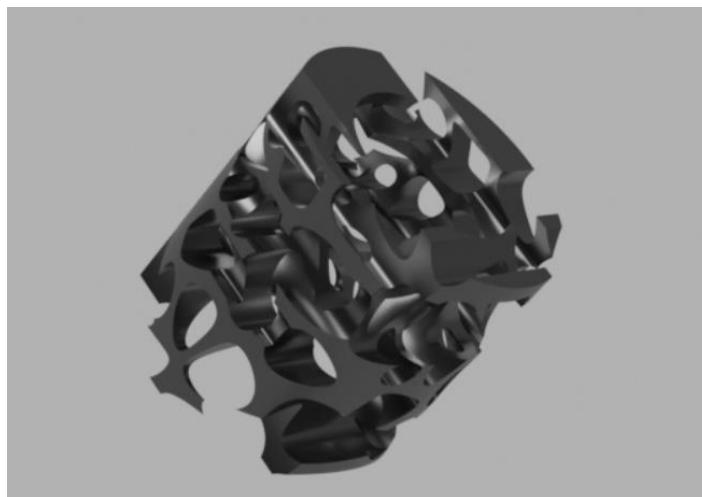
Početak razvoja aditivne proizvodnje jest 1987. godina, kada je Charles Hull razvio i patentirao prvi 3D uređaj za ispisivanje pod nazivom stereolitografski aparat – 1 (e. *stereolithography apparatus - 1*). Bio je to prvi postupak kojim je omogućena izrada tvorevine bez prethodne potrebe za razvojem bilo kakvih kalupa i drugih alata što je u tom slučaju označavalo početak velikih promjena u proizvodnji. [1]

Također, Hull razvija i STL jezik (e. *standard tessellation language*) čija je osnovna funkcija stvaranje poveznice između CAD softvera i 3D pisača. STL format modela predstavlja oblik koji će nastati prilikom 3D ispisa, gdje je važno napomenuti da će njegova kvaliteta biti to veća što je ispisani sloj manje visine, odnosno, u tom će slučaju ta aproksimacija površine nastala pretvorbom modela u STL biti manje izražena, a samim time će tvorevina biti bolja. (slika 2.1) [1]



Slika 2.1. Aproximacija površine sa manjom rezolucijom – a), i sa većom rezolucijom - b) [2]

Aditivni postupci nose velik broj prednosti pred klasičnim proizvodnim postupcima s obzirom da je proces potpuno automatiziran, a vrijeme izrade tvorevina sve je kraće. Vjerojatno ono najvažnije jest potpuna geometrijska sloboda koju ovakve metode nose. Ovdje se misli na činjenicu da je 3D ispisom moguće izraditi tvorevine bilo kakvog oblika, složenosti strukture i svega onoga što u klasičnoj situaciji pridonosi kompleksnosti i složenosti same pripreme i konstrukcije što alata, što uređaja i slično. Mogućnost da se neke pa i najkompleksnije tvorevine, izrade u jednom komadu ponajviše utječe na sve veći rast i razvoj ovakve vrste inženjeringa (slika 2.2). [1]

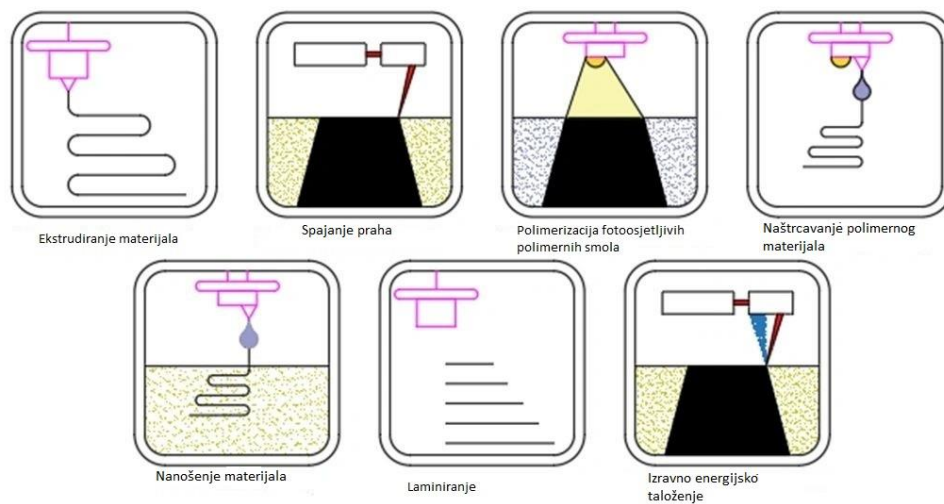


Slika 2.2. Različita geometrija tvorevina koju je moguće izraditi primjenom AM postupaka [3]

Smanjenje potrebe za alatom i kalupima, smanjenje potrebnih naknadnih operacija, ukidanje stega i drugih uređaja za učvršćivanje modela, ali i smanjeno razvojno vrijeme za dizajn i manja potrošnja energije i sličnih resursa također su aspekti proizvodnje koje treba uzeti u obzir.

## 2.1. Osnovna podjela postupaka aditivne proizvodnje

Osnovna podjela aditivnih postupaka sastoji se od 7 osnovnih vrsta postupaka (slika 2.3.). Prvi od njih je ekstrudiranje materijala (e. *Material extrusion*) gdje je osnovno načelo rastaljivanje materijala te njegovo slaganje na radnu podlogu uređaja uz konstantno podizanje glave pisača. Sljedeća vrsta postupaka jest spajanje prahova u komori (e. *Powder bed fusion*), gdje se sloj materijala, koji je u prahu, spaja, to jest srašćuje, nekom vrstom svjetlosnog izvora. [1]



Slika 2.3. Osnovna podjela postupaka aditivne proizvodnje [4]

Postupci koji će biti opisani u ovom radu i na koje će se staviti poseban naglasak spadaju u skupinu postupaka polimerizacije kapljevite fotoosjetljive smole u spremniku (e. *VAT*



*polymerization*), izlažući je UV svjetlu lasera, danjem svjetlu LCD-a itd. Nekoliko je osnovnih postupaka koja spadaju u ovu skupinu, a to su stereolitografija i očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. *digital light processing*), izrada tvorevina konstantnim dotokom polimernog materijala te DPP (e. *daylight polymer printing*). Njihov princip rada, osnovne značajke i mogućnosti u fokusu su ovog rada te će o njima više biti riječi u nastavku rada. [4]

Ovi postupci su vrlo slični u pogledu načina na koji funkcioniraju, a razlike su, dakle, u očvršćivanju materijala i u obliku materijala koji se primjenjuje. [4]

Nanošenje veziva na prah su skupina aditivnih postupaka u kojem se spajanje praškastog materijala ne vrši njegovim izlaganjem nekom od izvora svjetlosti, već se spajanje praškastog materijala izvodi direktnim deponiranjem neke vrste ljepila na njega. [4]

Nanošenje polimernog materijala je postupak koji je jako sličan klasičnom ispisu pomoću tinte, uz razliku da se ne taloži tinta već kapljevita disperzirana smola koja umrežuje pod djelovanjem UV svjetlosti. [4]

Skupina postupaka laminiranja (e. *sheet lamination*) materijala temelji se na međusobnom spajanju filmova materijala pomoću topline, ljepila, tlaka i slično te se, po završetku laminiranja, svi nepotrebni dijelovi izrezuju i odstranjuju. [4]

Postupci čija je osnova taloženje materijala na podlogu uz istovremeno taljenje nekim od usmjerenih energetske izvora, primjerice lasera, plazma luka ili snopa elektrona, posljednja su od 7 skupina u osnovnoj podjeli aditivnih postupaka. [4]

### 3. FOTOPOLIMERIZACIJA

#### 3.1. Osnove fotopolimerizacije

Promjene koje su zahvatile proizvodnju podržanu računalom, točnije, izradu tvorevina pomoću računala uključuju, prije svega, način izrade. Polimerne smole koje se umrežuju laserskom zrakom, sve su češće u primjeni za izradu tvorevina složenih oblika koje se nekim drugim, klasičnim, postupcima ne mogu izraditi, ili će taj postupak biti iznimno skup. [5]

Ovakvo umreživanje omogućeno je fizikalnim postupkom fotopolimerizacije. Skenirajući laserskom zrakom sloj nanesenog materijala, isti se umrežuje te se na njega nastavlja sljedeći slojevi sve dok tvorevina ne poprimi finalni oblik. Drugačije rečeno, fotopolimerizacija jest postupak u kojem se svjetlost primijenjuje kao izvor energije kako bi se potaknula pretvorba malih, nezasićenih molekula u tekućem stanju u krute makromolekule pomoću polimerizacijskih reakcija. Osnovne komponente kapljevutih smola su monomeri i oligomeri. Prilikom svjetlosne uzbude, monomeri i oligomeri mogu postati krutima umreživanjem tijekom fotopolimerizacije. [5]

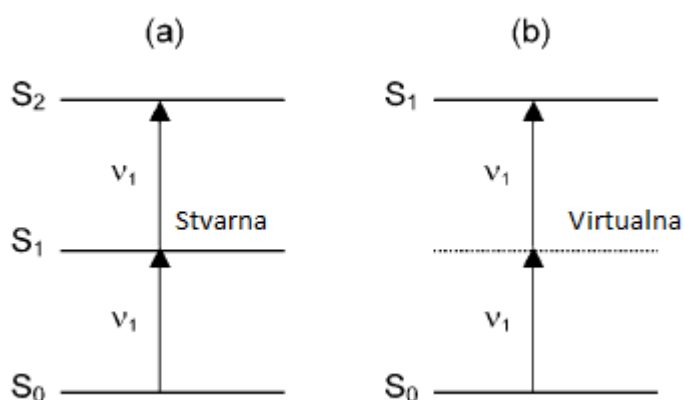
Ovakav tip fotopolimerizacije naziva se jednofotonskom fotopolimerizacijom i odgovara slojevima materijala debljine veće od 10  $\mu\text{m}$ . S obzirom na to da se zahtjevi za kvalitetom površine sve više povećavaju, razvila se potreba za novom vrstom fotopolimerizacije koja će takve zahtjeve moći pratiti. [5, 6]

Takva fotopolimerizacija naziva se dvofotonskom i omogućuje ulazak u nano mjerno područje. Simultanom apsorpcijom dvaju fotona, umjesto jednog, omogućeno je bolje umreživanje polimernih smola. Osnovne prednosti ovakvog pristupa su u boljoj penetraciji izvora svjetlosti u materijal omogućujući na taj način fotopolimerizaciju iznutra bez djelovanja na ostale dijelove smole van svjetlosnog snopa. Druga važna prednost jest u tome da kvadratna ovisnost brzine fotopolimerizacije o jakosti svjetlosnog izvora, omogućuje bolju 3D rezoluciju, i postignuta točnost puno bolja. [5]

Elektronska uzbuda potrebna za apsorpciju energije dvaju fotona može nastati skokovito ili simultano (slika 3.1.) gdje se pod pojmom skokovita, ustvari misli na postojanje razine

srednje energije izvora svjetlosti. Ta takvu vrstu fotopolimerizacije se može reći da se sastoji od dvije zaredane jedno-fotonske polimerizacije. [5]

Simultana dvo-fotonska fotopolimerizacija je proces koji se odvija kao proces u kojem sudjeluju 3 faktora. U ovom se slučaju odvija apsorpcija dvaju fotona u elektron kako bi se nadomjestila energija potrebna za uzbuđu. [5]



Slika 3.1. Skokovita i simultana dvo-fotonska fotopolimerizacija (5)

### 3.2. Kationska fotopolimerizacija

Kationska fotopolimerizacija primijenjuje se kod epoksidnih smola te iako manje u primjeni, ona ima svoje prednosti, kako u mikroprodukciji, tako i u klasičnoj. Primjerice smanjeno skupljanje materijala nakon takve polimerizacije omogućuje vrlo visoku točnost izradaka. Također, uvjeti u kojima se ona odvija, a to je sobna temperatura, vrlo brzo umreživanje, vrlo mali energetske zahtjevi, ali i činjenica da nema nikakvih reagensa koji bi podrazumijevali zagađenje niti otapala, svrstavaju ovakav tip polimerizacije u ekonomski vrlo isplative. [6]

Otkrivena 70-ih godina, kada je dokazano da, djelovanjem UV svjetlosti, tri fenil fosfonijev klorid i diariliodonium, stvaraju vrlo jake, kisele otopine, čime se izvela fotopolimerizacija vinil-monomera u mraku. [6]

Navedene se soli sastoje od kationa i aniona, gdje je kation komponenta koja apsorbira svjetlost, što znači da upravo ta komponenta osigurava, to jest, određuje apsorpcijska svojstva i fotoosjetljivost materijala, ali i krajnu toplinsku stabilnost. S druge je strane kationska komponenta, kojom se određuje kiselost koja je nastala tijekom fotolize i njezina učinkovitost. Anion dodatno određuje i smjer, odnosno vrstu ionskog para. Ove se soli mogu okarakterizirati kao komponente koje potiču stvaranje foto-kiselosti, a kao završni proizvod dobiva se vrlo jaka Brønsted-ova kiselina koja ima sposobnost pokretanja kationske fotopolimerizacije. [6]

Još jedna od pozitivnih strana je ta da tijekom kationske fotopolimerizacije nema prisutnosti kisika, što je najveći problem alternativni, fotopolimerizaciji potaknutoj radikalima. Zbog toga se iz procesa može izbaciti potreba za inertnom atmosferom tijekom umreživanja, što je osnovna razlika između kationske i anionske fotopolimerizacije. Pri kationskoj fotopolimerizaciji nema toksičnih spojeva ili iritabilnosti, što je slučaj za akrilatne i metakrilatne spojeve u radikalnoj fotopolimerizaciji. [6]

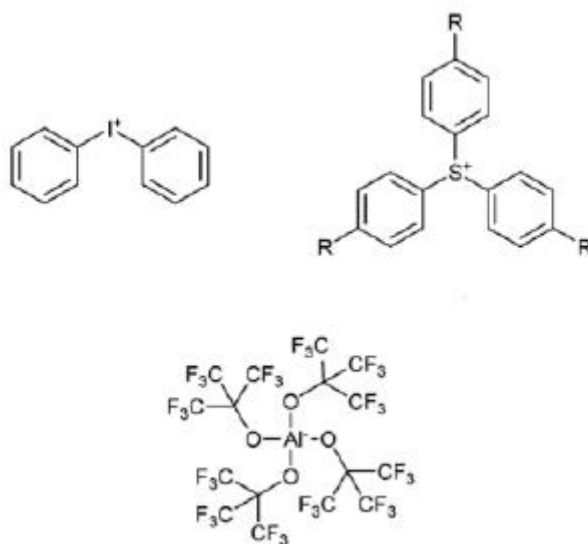
### **3.2.1. Razvoj kationskih fotoinicijatora**

Kako bi se potaknula reakcija monomera i oligomera potrebni su spojevi pod nazivom fotoinicijatori. Kemijskom modifikacijom soli, moguća je promjena aktivacijske valne duljine. Foto-razgradnju kationskih fotoinicijatora moguće je pomaknuti na veće valne duljine oksidacijom slobodnih radikala pomoću mehanizma kationske fotopolimerizacije potaknute radikalima. [6]

U proteklih se 10-ak godina pojavio velik broj fotoinicirajućih sustava temeljenih na organskim i anorganskim spojevima, koji posjeduju odlična apsorpcijska svojstva u

spektru vidljive svjetlosti. Također su se organske boje i silani spojevi koji dokazano mogu potaknuti kationsku fotopolimerizaciju primjenom povećane valne duljine. [6]

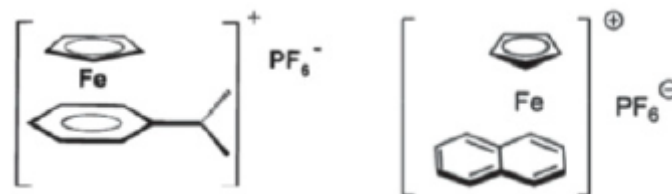
Jedan od novorazvijenih fotoinicijatora je onaj koji se temelji na e. *tetrakis(perfluoro-t-butiloxi) aluminat* anionu (slika 3.2). [6]



Slika 3.2. Shematski prikaz jodove ili sumporne soli koje sadrže anion tetrakis(perfluoro-t-butiloxi) aluminat [6]

Diferencijalnom pretražnom kalorimetrijom (e. *photo differential scanning calorimetry*) utvrđena je puno bolja reaktivnost ovakvih spojeva u usporedbi s komercijalno dostupnim fotoinicijatorima, i prema tome vidljiva puno bolja sposobnost poticanja kationske fotopolimerizacije. [6]

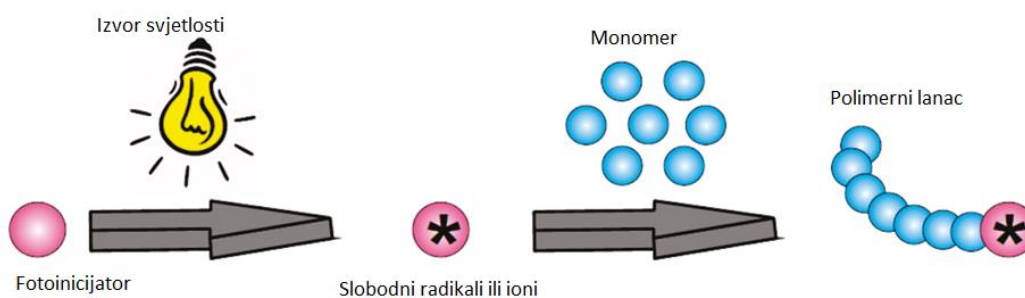
Primjenom ferocenijskih soli (slika 3.3.) kao novih fotoinicijatora omogućena je fotopolimerizacija kod valnih duljine od 385 i 405 nm. Eksperimentalno je potvrđeno da kombinacijom željeznih i jodovih soli, dolazi do nastanka radikala i kationa, čime se dokazuje dobra učinkovitost polimerizacije kationskih monomera koji se umrežuju pomoću izvora svjetlosti. [6]



Slika 3.3. Shematski prikaz kemijske strukture ferocenijskih soli [6]

### 3.3. Radikalna fotopolimerizacija

Polimerizacija potaknuta svjetlošću, najčešće se primjenjuje na lanac koji je potaknut nekim svjetlosnim izvorom i inicijatori i novi lančani završeci koji nastaju su radikali ili kationi (slika 3.4.). Radikali su organske molekule koje sadrže neupareni elektron, te se smatraju nestabilnim molekulama zbog kratkog životnog vijeka u kapljevitom ili plinovitom stanju. Radikali mogu biti podložni četirima osnovnim vrstama reakcija: prijenosu, eliminaciji, dodavanju ili nekoj vrsti kombinacije prethodnih. [7]



Slika 3.4. Prikaz osnovnog principa procesa fotopolimerizacije [7]

Većina fotoinicijatora za ovaj tip fotopolimerizacije funkcioniraju prema jednom od dva osnovna mehanizma. Prvi (tip I) je (e. *cleavage mechanism*), a drugi je mehanizam izuzimanja vodika (tip II). Osnovni fotoinicijatori drugog tipa mehanizma su benzofenon, tioksantone, benzil, kamforkinon, neka organska bojila i slično. U tom su slučaju donori vodika amini, alkoholi, eteri, tioli, a u novije vrijeme i silani, borani germani i slično. [7, 8]

Benzofenon je primjerice, fotoinicijator, koji se primjenjuje za polimerizaciju u uvjetima izloženosti UV-zračenju i to u industriji tinte, prozirnih premaza u industriji ispisa i slično. Kamforkin je inicijator fotopolimerizacije u većini smolastih kompozitnih materijala itd. [8]

Kao ko-inicijatori u procesu fotopolimerizacije, primjenjuju se najčešće amini, zbog svoje veće reaktivnosti. Opasnost primjene amina je u tome da oni doprinose toksičnosti i određenim nuspojavama koje u procesu polimerizacije mogu uzrokovati žuto-smeđe mrlje prilikom izlaganja toplini ili svjetlosti. Baš iz tog razloga postoji određena neučinkovitost u primjeni inicijatora, i količina inicijatora koji se ustvari iskoristi u samom procesu uvijek je manja od količine koja se u tijeku polimerizacije razgradi bez da ima efektivne koristi. [8]

Neke tvari, kada se dodaju u polimerizacijski sustav, imaju sposobnost određenog usporavanja toka procesa na način da radikale vraćaju u neradikalne tvari ili da ih čine manje reaktivnima. Dvije su osnovne vrste takvih tvari i to su inhibitori fotopolimerizacije i usporivači. Imena im sama govore o funkciji pa će tako inhibitori u potpunosti prekinuti polimerizaciju, dok će usporivači utjecati na vrijeme njezinog odvijanja. [8]

Najčešće molekule koje podliježu radikalnoj polimerizaciji su vinil monomeri. Ključan dio procesa je upijanje svjetlosti jedne ili više komponenti polimerizacijske smjese. Ukoliko energiju fotona upije direktno neka od fotosenzitivnih komponenti, sam monomer ili inicijator, odmah dolazi do formiranja radikala i do pojave fotoinicijacije te u pravim uvjetima, jedan slobodni radikal može potaknuti polimerizaciju više tisuća molekula. [8]

Jedna od prednosti radikalne polimerizacije je u tome što kod nje nema lančanog prijenosa (e. *chain transferr*), a razlog je tomu taj što se ovaj tip polimerizacije odvija na sobnoj temperaturi. [8]



## 4. POLIMERIZACIJA U KOMORI

### 4.1. Stereolitografija

Kasnih 1970-ih i ranih 1980-ih godina, A. Herbert iz *3M Korporacije* u Minneapolisu, H. Kodame iz *Nagoya Prefecture* istraživačkog instituta u Japanu i C. Hull s laboratorija *Ultra-Violet Products UVP-a*, California, radili su nezavisno na konceptu brze proizvodnje prototipova koji se temeljio na selektivnom umreživanju površinskog sloja fotopolimera i izradi trodimenzionalnih objekata sa uzastopnim slojevima. Zadržavajući kontinuiranu pomoć UVP-a, Hull je proizveo sustav koji može automatski izgraditi detaljne tvorevine. Hull je postupak nazvao stereolitografija, temelj tvrtke *3D Systems* - a, te 1987. počela je proizvodnja prvih stereolitografskih strojeva. [9]

Hull svoju inicijativu pokreće prije svega s idejom o praktičnom pristupanju problemu stvaranja gotovih modela čija je osnovna zadaća zorno prikazati produkte, u najvećoj mjeri, injekcijskog prešanja i sličnih postupaka. [10]

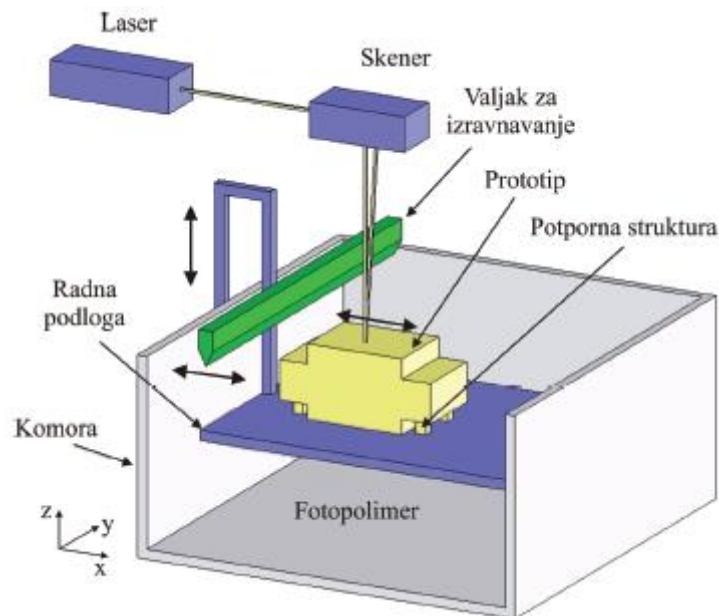
### 4.1 Postupak stereolitografije

Princip stereolitografije (slika 4.1) je da se fotopolimer skrućuje kada je izložen izvoru svjetlosti. Radna podloga smještena je samo jedan sloj debljine ispod vrha površine kapljevito polimera. [9]

Helij - kadmijski (He-Cd) ili argonski (Ar) laser generira i fokusira UV svjetlost i skenira sloj polimera iznad podloge koji očvršćuje. Taj korak počinje s najdonjim presjekom tvorevine. [9]

Radna podloga se zatim spušta prema dolje za debljinu idućeg sloja. Valjak za izravnavanje kapljevine fotopolimera služi za izbjegavanje mjehurića zraka u tvorevinama. Kako se tvorevine proizvode u kapljevini, potrebno je osigurati položaj tvorevine s pomoću potporne strukture, koja se uklanja nakon završetka postupka. Postupak se ponavlja do konačne proizvodnje. Tvorevina se vadi iz kapljevito polimera, a višak polimera se ispire u otapalu, čime nastaje tzv. "zelena. faza". Naknadno

umreživanje odvija se minimalno 1 sat izlaganjem naknadnom zračenju. Taj korak potreban je zbog toga što se neka kapljevita područja mogu zadržati u slojevima. [9]



Slika 4.1. Postupak stereolitografije [9]

S obzirom na to da je stereolitografija najstariji od svih aditivnih postupaka, razumljivo je da je on isto tako i najrazvijeniji i nudi najveću kvalitetu i najbolju rezoluciju tvorevina. Rezolucija postupka ovisi o promjeru zrake lasera i najčešće varira između 75 i 250  $\mu\text{m}$  čime je osigurana visoka kvaliteta i dimenzijska točnost. Postavke prikaza slike sloja na fotopolimernom materijalu slične su i funkcioniraju na gotovo identičan način kao kod DLP postupka. [12]

Kvaliteta površine koja se može očekivati postupkom stereolitografije prikazana je na slici 4.2. Vidljivo je da su bridovi vrlo kvalitetno izrađeni, kao što je i ukupna površina tvorevine. Također, slika prikazuje i vrlo tanke stijenke koje je moguće dobiti ovim postupkom što je također velika prednost.



Slika 4.2. Primjer tvorevine izrađene postupkom SLA [13]

Rezolucija u Z- smjeru ovisi direktno o mehaničkoj stabilnosti i ponovljivosti pokreta uređaja, ali i samoj razini kontrole fotopolimerizacije. Važno je da se neusmjerena svjetlost svede na minimum jer i ona može dovesti do očvršćivanja. U tome važnu ulogu imaju apsorpcijske boje i reaktivne grupe u smoli. Za visoko specijalizirane upotrebe, u mikro-stereolitografiji postoji i opcija debljine umreženog sloja fotopolimera od minimalnih 10  $\mu\text{m}$ . [12]

Nedostaci postupka su: visoka cijena materijala, potrebno je naknadno umreživanje fotopolimera, upotreba potporne strukture, materijali moraju biti pravilno skladišteni da ne dođe do prerane polimerizacije, mogućnost upotrebe uske skupine materijala (samo fotopolimeri), stezanje polimera nakon očvršćivanja uzrokuje vitoperenje tvorevine te ona može biti dosta krhka, dok u tvorevinama sa zatvorenom površinom može ostati zarobljena kapljevina, potreban je poseban prostor za uređaj jer fotopolimeri razvijaju štetne plinove, potrebno je naknadno uklanjanje potporne strukture, skupo održavanje lasera. [12]

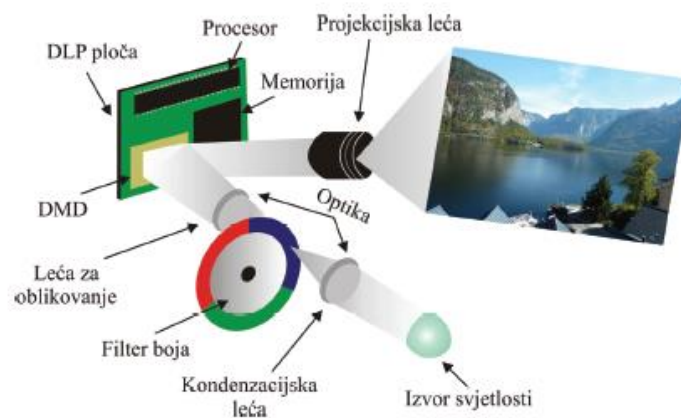
Prednosti postupka su vrlo dobra kvaliteta površine, te kombinacija brzine i vrlo malih debljina gradbenih slojeva koji mogu biti od 0,05 mm do 0,15 mm. [12]

To je razlog zbog čega je moguće ostvariti visoku završnu kvalitetu i vrlo dobre detalje na tvorevini. [12]

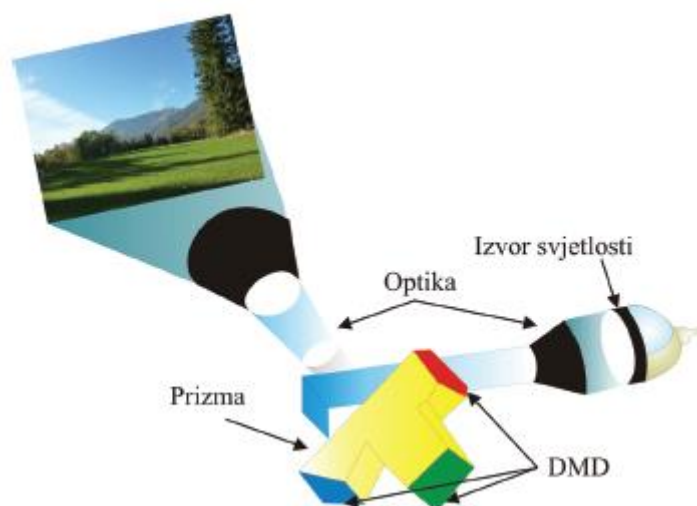
#### **4.2. Očvršćivanje s digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (e. *Digital light processing* - DLP)**

DLP je aditivni postupak kojim se izrađuju 3D modeli s vrlo dobrom kvalitetom površine, a razvila ga je njemačka tvrtka *EnvisionTEC*. Osnovna ideja jest da se pomoću projektor projicira slika na sloj fotoosjetljive polimerne smole, čime se određuju točke u sloju smole koje će ustvari biti dio modela. Zanimljivost je upravo u tome što je tvorevinu ovim postupkom moguće izraditi pomoću običnog projektor iz čije se zrake svjetlosti onda filtrira UV svjetlost čime se aktivira fotopolimerizacija. [9]

DLP je razvio dr. Larry Hornbeck 1987. godine. Sustav se sastoji od jednog, dva ili tri velika digitalna čipa koji broje preko milijun mikroogledala (e. *digital micromirror devices* – *DMD*). DMD se najjednostavnije može opisati kao svjetlosni prekidač tj. optički poluvodič, sa sposobnošću gašenja i paljenja 1000 u sekundi čime se omogućuje reprodukcija u boji i u sivim tonovima. Mikroogledala su smještena na DMD integrirani sklop, odnosno čip, čiji se zglobovi mogu okretati od  $-10^\circ$  do  $+10^\circ$ . Sustav sa jednim čipom propušta samo bijelu početnu svjetlost kroz rotirajući disk koji šalje sekvencijalnim slijedom crvenu, zelenu i plavu boju na DMP čip (slika 4.3. ). Sustav koji se sastoji od 3 čipa ima sposobnost propuštanja svake pojedine boje iz RGB spektra kroz zaseban čip omogućujući na taj način povećanje mogućih boja sa 16 milijuna na preko 35 milijuna (slika 4.4.). [9]



Slika 4.3. Model DLP postupka sa jednim čipom [9]



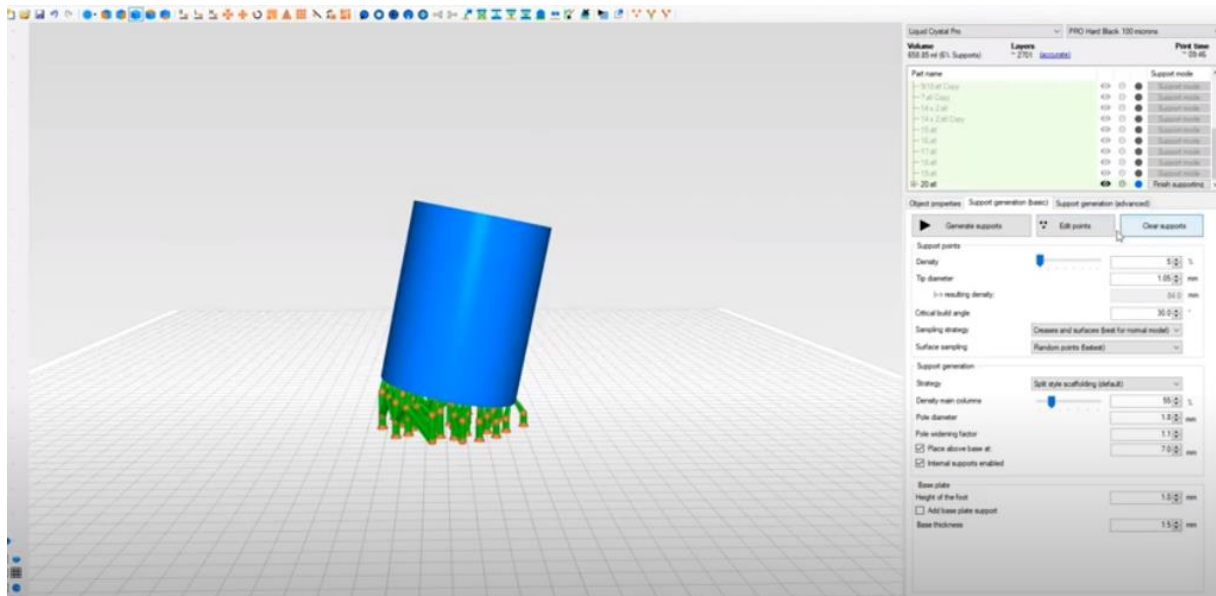
Slika 4.4. Model DLP postupka s 3 čipa [9]

Kao izvor svjetlosti primjenjuju se metal-halogene ili ksenonske lampe, čije zračenje se skuplja preko kondenzirajućih leća. Kako bi DMD uređaj dobro radio potrebno je tu svjetlost usmjeriti pod kutem od  $20^\circ$  u odnosu na normalu čipa. Tu će zadaću preuzeti prizma s unutarnjom refleksijom (e. *total internal reflection*) koja se postavlja između leće i čipa. Prizma ima filtre koji odvajaju svjetlost pomoću refleksije i prenose ga na RGB komponente. [9]

#### 4.2.1. Princip rada DLP postupka

Polazeći od činjenice da radna podloga u DLP postupku izvlači gotove slojeve 3D modela iz fotopolimerne smole prema gore (*top – down* postupak) razumljivo je da se izvor

svjetlosti nalazi na dnu uređaju. Prolaskom UV zraka kroz prozirnu foliju na dnu spremnika u kojem se zadržava fotopolimerna smolu, pokrenut će se fotopolimerizacija prema shemi modela koju smo u nekom od softvera za rezanje slojeva (e. *slicer*) dobili iz STL datoteke tog modela (slika 4.5.). [9]



Slika 4.5. Shema 3D modela u softveru za rezanje

Automatski upravljana radna podloga na kojoj se izrađuje tvorevina pričvršćuje se iznad spremnika za smolu i ona se prije početka izrade modela uranja u smolu u potpunosti, ostavljajući tek malu prazninu između folije i podloge za izradu. Upravo će ta praznina omogućiti izradu prvog sloja modela te će nakon toga uslijediti nekoliko automatskih operacija kojima se osigurava mogućnost nastavka 3D ispisa. [9, 11]

Prvo, gašenjem izvora svjetlosti onemogućava se daljnja fotopolimerizacija te se nakon toga spremnik za smolu zamiče horizontalno (u x smjeru), kako bi se odvojio sloj umreženog fotopolimera s dna spremnika. Zatim se platforma podiže na debljunu novog sloja čime se osigurava dotjecanje nove količine smole u prostoru projiciranja svjetlosti. Posljednja operacija jest ponovno spuštanje platforme u smolu na visinu od  $(d - d_r)$ , gdje je  $d$  ukupna debljina ispisanih slojeva, a  $d_r$  debljina jednog sloja). Nakon ponovnog

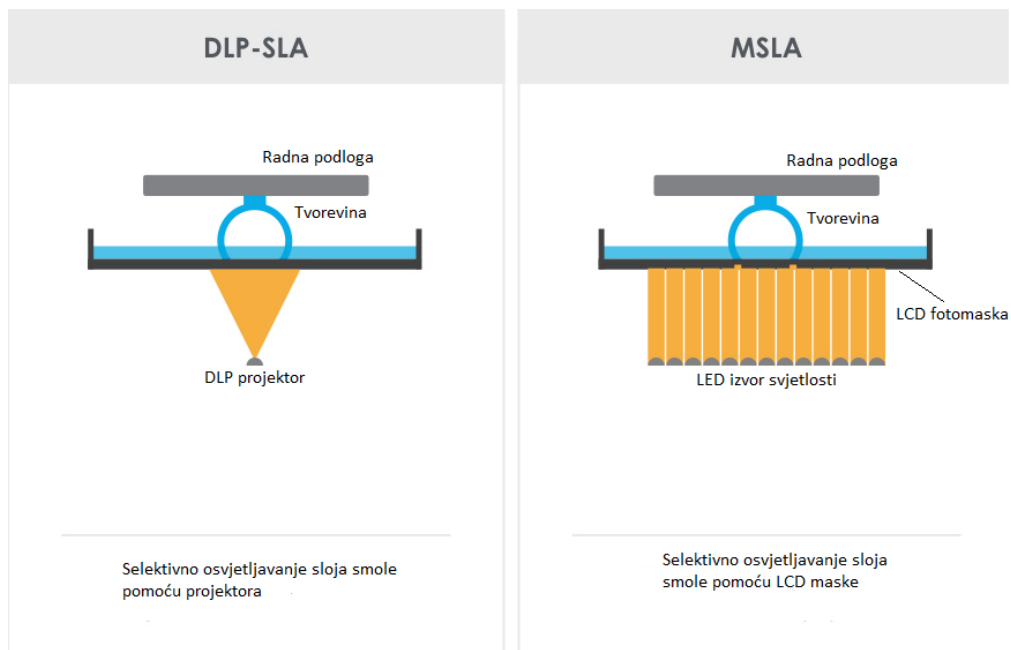
paljenja izvora svjetlosti, ponovno slijedi fotopolimerizacija i izrada novog sloja zadane tvorevine. [9, 11]

Upravo opisani postupak razlog je zbog kojeg ova tehnologija još uvijek ne ostvaruje onaj potencijal kakav je teoretski moguć. Dva su osnovna razloga zbog čega je to tako. Prvi je, utrošak vremena koji je potreban da se sva ova pomicanja ostvare i reputacija koja opisuje ovaj postupak kao jedan od najspornijih, a drugi se tiče horizontalnog pomaka spremnika za polimerizaciju kako bi se model odvojio od dna. Ta operacija zasigurno sa sobom nosi posljedicu mogućeg odvajanja modela od radne podloge ili u najblažem slučaju, vitoperenje modela s obzirom na to da postoje određeni problemi sa čvrstoćom tvorevina. To svakako nije problem kada je debljina sloja mala ili model sam po sebi nije velik, ali ukoliko se ispisuje vitak i visok model, za očekivati je da će moment sile biti veći, a prema tome raste i mogućnost za pojavu opisanih problema. [11]

Ovakav slijed operacija ponavlja sve dok model nije gotov i spreman za uklanjanje s podloge, dorađivanje i finalno umreživanje. Važno je napomenuti da je kvalitetno postavljena folija na dnu spremnika za smolu, ali i svi ostali parametri uređaja od iznimne važnosti kako bi CAD model bio što sličniji ispisanom tvorevini, ali i kako bi imala zadovoljavajuće karakteristike, odnosno neće biti anizotropna i slično, o čemu će više riječi također biti u daljnjem dijelu seminara. [11]

### **4.3. MSLA (e. *masked stereolithography apparatus*)**

Uz klasičan postupak stereolitografije kod kojeg do umreživanja dolazi djelovanjem laserske zrake i DLP, postoji još jedan postupak koji se zasniva na istoj tehnologiji i vrlo sličnim postavkama. Postupak MSLA je postupak koji je uglavnom sličan DLP-u uz razliku što se prilikom ekspozicije ne primjenjuje projektor, nego LED izvor (slika 4.6.). Točnije, kod DLP-a, jedan izvor svjetlosti baca snop svjetlosti na čitav sloj koji treba umrežiti. Sa slike je vidljivo da postupak MSLA na sličan način umrežuje slojeve, ali uz jednu ključnu razliku. [15]



Slika 4.6. Razlika između uređaja za DLP-SLA i MSLA [15]

DLP-SLA postupak, kao što je već napomenuto, primjenjuje projektor kao izvor svjetlosti kojim se umrežuju slojevi. S obzirom da je pomoću projektora moguće mijenjati površinu koja se umrežuje, omogućeno je i izrađivanje finijih detalja jer se pikseli smanjuju i zhušnjavaju. MSLA postupak ne koristi projektor kao kod DLP postupka, već se koristi običan izvor LED svjetlosti kojim se osvjetljava LCD fotomaska. Zadaća fotomaske je programirano propuštanje svjetlosti prema spremniku sa smolom i umreživanje željenih kontura tvorevine. [15]

Činjenica je da veličina piksela LCD maske ovisi u potpunosti o načinu njezine proizvodnje, što znači da veličina piksela nije prilagodljiva i da je ispis finijih detalja nemoguć u toj mjeri kao što je to slučaj za DLP. Ipak treba napomenuti da je DLP projektor puno skuplji od običnog LED izvora svjetlosti, te je, ovisno o vrsti tvorevine koja se ispisa, potrebno odvagati korist samog DLP-a u odnosu na cijenu MSLA uređaja. [15]

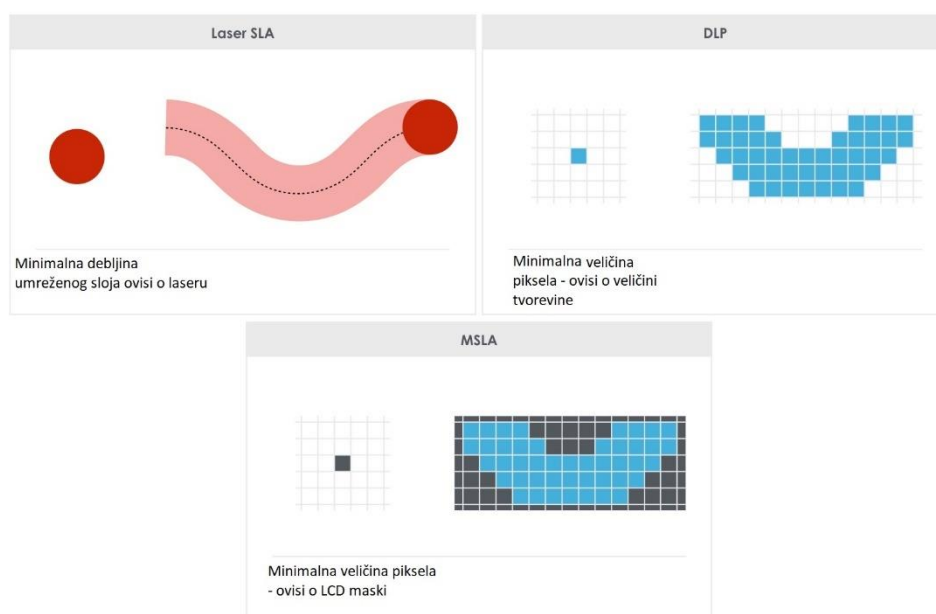


#### 4.2.6. Usporedba postupaka DLP-SLA, SLA i MSLA

U radu su objašnjeni principi rada za sva tri postupka i jedina razlika je ustvari u načinu osvjetljenja slojeva modela i vrsti svjetlosnog izvora, čija je direktna posljedica razlika u rezoluciji pojedinih tvorevina. MSLA i DLP postupak su u suštini isti te je jedina razlika ustvari u načinu kreiranja piksela, kako je to već opisano u prethodnom poglavlju. Dakle, stereolitografija kao primarni izvor svjetlosti primijenjuje lasersku zraku koja se pomoću mikrozrcala usmjeruje na određene koordinate te na taj način prolazi kroz dno spremnika sa fotopolimerom i očvršćuje ga sloj po sloj. [15]

Sličan je i DLP postupak uz iznimku primjene digitalnog projektora kojim se projicira čitava slika sloja modela čime se postiže istodobno očvršćivanje svih točaka presjeka. Takvo usmjeravanje svjetlosti postiže se brzom promjenom položaja mikroskopski malih zrcala (e. *digital micromirror device*) čiji princip i shema su dani ranije u radu. [13]

Slika 4.7. prikazuje u čemu je ključna razlika ova dva postupka i zbog čega nastaje spomenuta razlika u rezoluciji. [15]



Slika 4.7. Prikaz presjeka zrake izvora svjetlosti postupaka DLP i stereolitografije [15]

Sa slike je vidljivo da će stereolitografija dati bolju rezoluciju tvorevine i, posljedično, bolju kvalitetu površine zbog toga što laserska zraka ne zahtjeva nikakvu iteraciju krivulja, točnije, laserska zraka može bez problema oblikovati bilo kakvu putanju. S obzirom na to da DLP projicira piksele na smolu, a zbog činjenice da je piksel kvadratnog oblika, logično je očekivati da će svaka zakrivljena linija imati određeno odstupanje zbog aproksimacije njezine putanje kvadratnim pikselima. [15]

#### 4.3. Postupak DLP uz kontinuirani dotok materijala

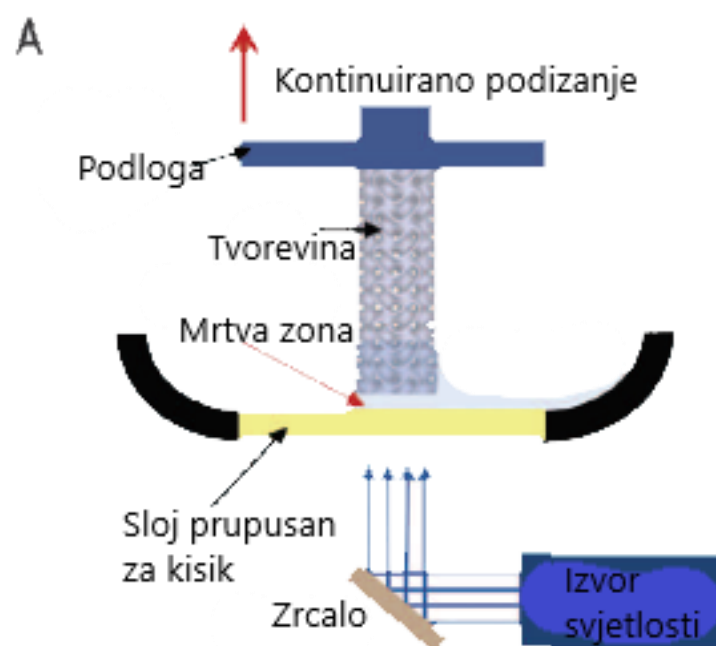
Tvrtka *Carbon3D* predstavlja široj javnosti tehnologiju koja će, nakon većih ulaganja i njezinog pada cijene, vrlo vjerojatno riješiti problem sporosti DLP-a i to, prema njihovim procjenama, ubrzanjem 3D ispisa od 25 do čak 100 puta u odnosu na sadašnje trendove. [15]

Dio problematike sporosti DLP-a veže su iz potrebu za potpunom inhibicijom kisika u području fotopolimerizacije, s obzirom na to da prisutnost kisika i dobra fotopolimerizacija, isključuju jedno drugo. [15]

Nadalje, želi se pokazati kako kontrolirana inhibicija kisika može dovesti do bolje produktivnosti. Kako je većina materijala za postupke umreživanja smole na akrilnoj bazi, pojavljuje se izazov vezan uz inhibiciju kisika, točnije reakcija koja se javlja na površini modela koji se umrežuje, a koja je rezultat inhibicije kisika. Nekoliko je mogućih rješenja, primjerice povišenje temperature umreživanja, promjena materijala ili valne duljine, barijera između tvorevine i zraka ili umreživanje u zatvorenom okolišu s malom pristunošću kisika. [16]

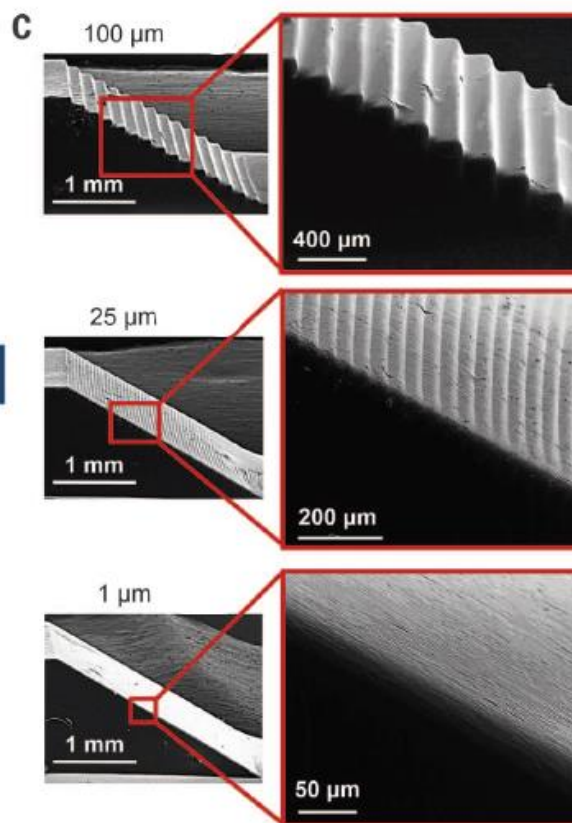
Postupak CLIP je razvijen da se mogućnost stvaranja peroksida na površini spajanjem kisika i slobodnih radikala iz smole ukloni, predlaže se drugačiji pristup. Iako se on prije svega odnosi na postupak stereolitografije, moguće je isti pristup primijeniti i na DLP. [16]

Ako bi se postupak izvodio iznad podloge koja je propusna za kisik, stvorila bi se proizvodnja sa konstantnim dotokom smole u tzv. mrtvoj zoni koja sadrži kisik. Debljina mrtve zone određena je dobro odabranim parametrima postupka (svjetlost, optička i druga svojstva smole). Slika 4.8. prikazuje jednostavnu konfiguraciju opreme, klasične dijelove poput uređaja koji služi kao izvor svjetlosnog signala, uz dodatak ploče propusne za kisik. [16]



Slika 4.8. Shematski prikaz CLIP opreme [16]

Mrtva zona održava sloj neumrežene smole ispod tvorevine koja se kontinuirano izvlači iz spremnika, pritom stvarajući usisni efekt koji će dalje uvlačiti kapljevitu smolu te time spriječiti naljepljivanje modela za podlogu i maknuti potrebu za manipulativnim operacijama. Brzina ispisa sa ovakvom opremom ovisi samo o viskoznosti smole i brzini umreživanja, brzina promjene projicirane slike bez problema se može povećati, a debljina sloja može biti i nekoliko mikrometara, što će osigurati izvrsnu rezoluciju tvorevine (slika 4.9.) [16]



Slika 4.9. Mogućnost rezolucije CLIP postupkom [16]

Uspostava "mrtve zone" osnova je CLIP postupka stoga je važna i postava, odnosno aparatura kojom će se ona i ostvariti. Primjenom kemijski inertnog, amornog fluor-polimernog sloja s optimalnom propusnošću kisika, kao i UV propusnošću, ostvaruju se uvjeti da se opisani postupak provede. Nadalje, postavlja se i pitanje kolika smije, to jest, kolika uopće može biti debljina mrtve zone, a ona se određuje prema sljedećoj jednadžbi:

$$\text{Debljina mrtve zone} = C * \left( \frac{\Phi_0 * \alpha_{PI}}{D_{e0}} \right) [16]$$

gdje  $C$  predstavlja konstantu proporcionalnosti,  $\Phi_0$  broj fotona na ravnini slike po jedinici površine,  $\alpha_{PI}$  predstavlja apsorpcijsku konstantnu koja objedinjuje količinu

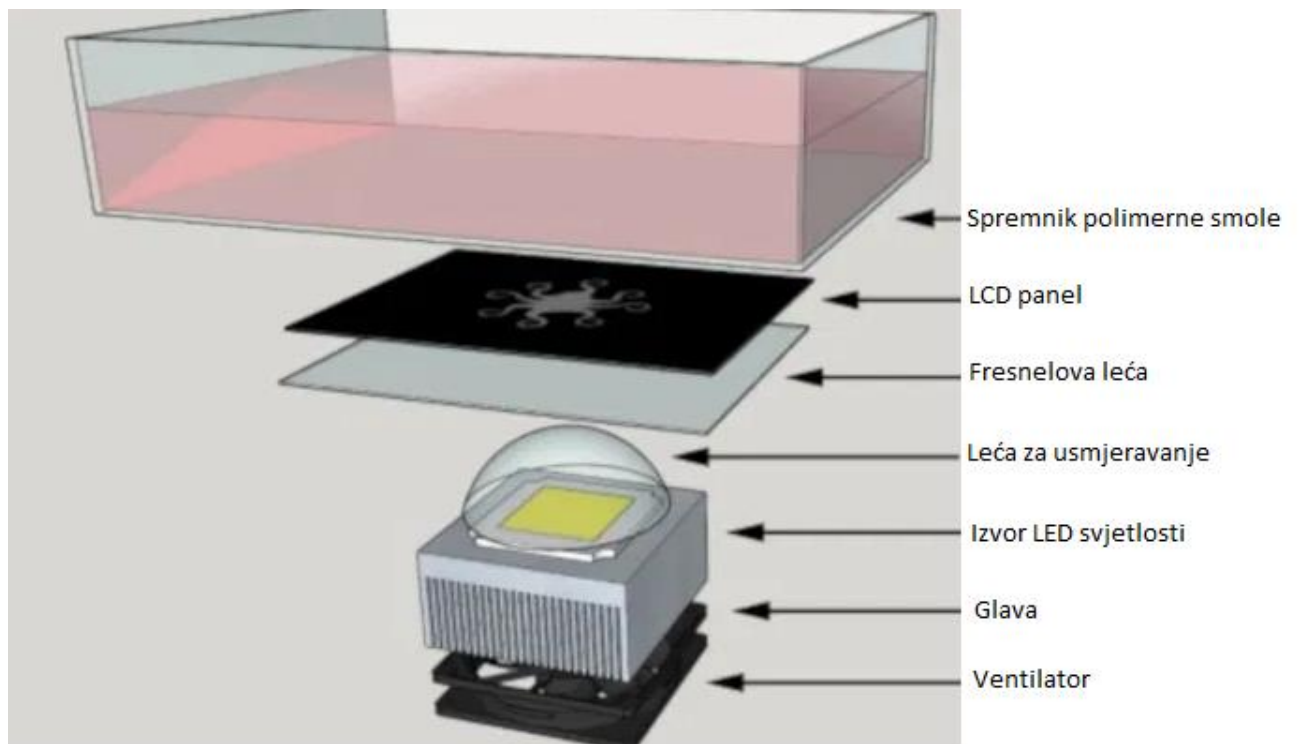
fotoinicijatora u smoli i ovisnost razine apsorpcije svjetlosti u odnosu na valnu duljinu, dok  $D_{e0}$  predstavlja reaktivnost monomer – fotoinicijator kombinacije. [16]

Iz jednadžbe je vidljivo da se povećanjem broja fotona ili primjenom materijala sa boljim apsorpcijskim svojstvima može bitno utjecati na debljinu sloja kisika što će pozitivno utjecati na sam proces. [16]

Autori zaključno za postupak navode kako ova analiza pokazuje da debljina mrtve zone od 20  $\mu\text{m}$ , omogućuje brzine ispisa od 300 mm /h, sa dubinom apsorpcije od 100  $\mu\text{m}$ . Ukoliko bi se dubina apsorpcije trostruko povećala, brzine ispisa mogle bi doseći i do 1000 mm/h, čime bi postupak zaista mogli nazvati revolucionarnim, no važno je ipak napomenuti da bi s ovakvim parametrima rezolucija bila narušena. Širok spektar materijala koji su kompatibilni za postupak, od mekih, elastičnih materijala, keramike, ali i nekih bio-materijala, također su predznak da će uz veliku količinu daljnjeg istraživanja i razvoja, ovaj postupak izmijeniti aditivnu tehnologiju te omogućiti daljnji korak prema velikoserijskoj proizvodnji tvorevina. [16]

#### 4.4. 3d ispis polimera pri dnevnom svjetlu (e. *daylight polymer printing*)

Postupak koji je sličan DLP-u i stereolitografiji, uz osnovnu razliku da se za navedeni postupak ne primijenjuje niti UV laser, a niti projektor za umreživanje polimerne smole. Umreživanje i očvršćivanje se provode izlaganjem tvorevine LCD svjetlu iz pisača te svakim slojem osvjetljenim LCD izvorom, gradi se model. (slika 4.10.) [17]



Slika 4.10. Shematski prikaz opreme za postupa DPP [18]

Postupak je izrazito sličan DLP-u i postoji vrlo malo razlika, osim, drugačijeg izvora svjetlosti. Svjetlost se direktno projicira sa ravnog izvora na radnu podlogu. Ovakvim se postupkom izbjegava širenje svjetlosne zrake pa su zbog toga pikseli koji određuju sloj materijala koji će očvrnuti, oštrije i zbog toga će i sam model biti bolje kvalitete. [18]

S time u vidu, može se zaključiti da će sveukupna kvaliteta ovisiti o gustoći LCD izvora. Slično kao i kod DLP-a, prednost LCD ispisa je u brzini samog ispisa i to iz razloga što se čitav sloj materijala osvjetljuje od jednom a ne točku po točku kao kod stereolitografije. [18]

Potencijalna je primjena moguća u različitim sferama industrije, kao što je primjerice, izrada nakita, stomatologija, medicina ali i ostale industrije. [18]

## 5. PRIMJENA AM POSTUPAKA U IZRADI PRAMODELA ZA PJEŠČANI I PRECIZNI LIJEV

Aditivna tehnologija pronalazi svoju primjenu u sve većem broju područja i u širokom spektru inženjerskih zadataka. Tako je jedan od njih u svakom slučaju lijevanje koje je, zbog svoje važnosti, u stalnom potraživanju za poboljšanjima koja bi posljedično mogla biti uzrokom manjeg pripremnog vremena, manjeg broja grešaka i na kraju poboljšanjem kvalitete finalnih proizvoda.

Stoga je u ovom radu obrađen spoj ljevarstva i aditivnih postupaka na način da se pokuša doći do opipljivih rezultata u pogledu spoja MLSA postupka i pješčanog, odnosno preciznog lijeva.

Zamisao jest, ukoliko se krene od činjenice da izrada modela za kalupnu šupljinu može biti prilično dugotrajna, a k tome doda da takav način izrade modela ima i određena ograničenja u pogledu kompleksnosti modela, da se to može zamijeniti upotrebom 3D ispisane tvorevine. Drugim riječima, jasno je da se klasičnim postupcima šuplje unutrašnjosti, komplicirane geometrije i slično, jednostavno ne mogu izraditi, ili ukoliko se mogu, proces je zahtjevan i skup.

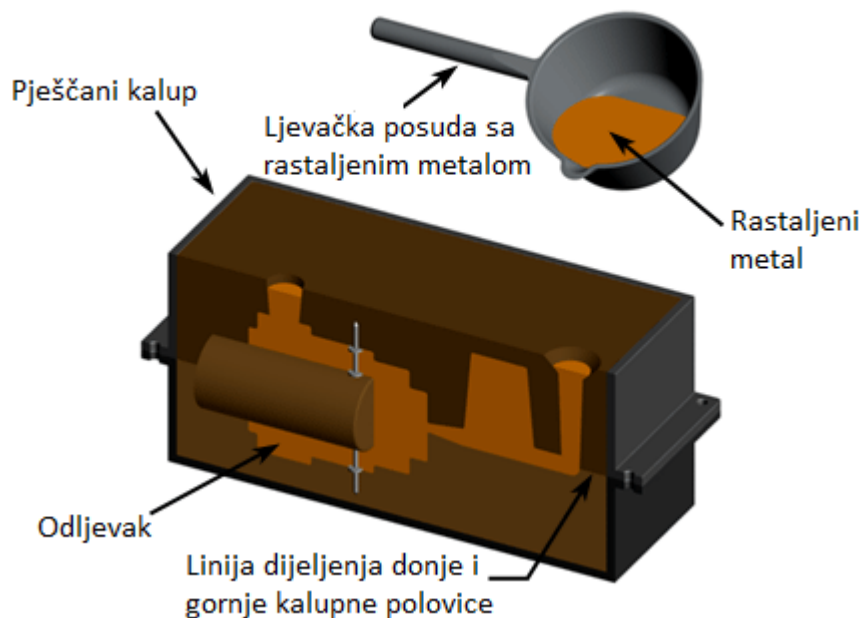
Veliki problem nastaje, kako u aditivnoj proizvodnji, tako i u ljevarstvu, prilikom izrade tvorevina vrlo tankih stijenki. Stoga se eksperimentalni dio rada fokusira na vrlo tanke stijenke, to jest na vrlo tanke pločice, debljine 1, 1,5 i 2 mm. Problemi vezani uz sam ispis pločica biti će objašnjeni u daljnjem dijelu rada gdje će se ustvari razraditi osnovna problematika spoja aditivnih tehnologija i ljevarstva.

### 5.1. Aditivna proizvodnja pramodela za pješčani lijev

Postupak lijevanja u pijesak jedan je od najjednostavnijih postupaka lijevanja, te je njegova osnova, lijevanje rastaljenog materijala u pripremljenu kalupnu šupljinu prema već željenom modelu. Kako bi odljevak bio što bolje kvalitete važno je, prilikom oblikovanja pijeska u kalupnoj polovici, pijesak dobro utisnuti oko pretpripremljenog



pramodela kako bi površina bila što bolje kvalitete. Primjer pripremljenog kalupa za navedeni postupak vidljiv je na slici 5.1.

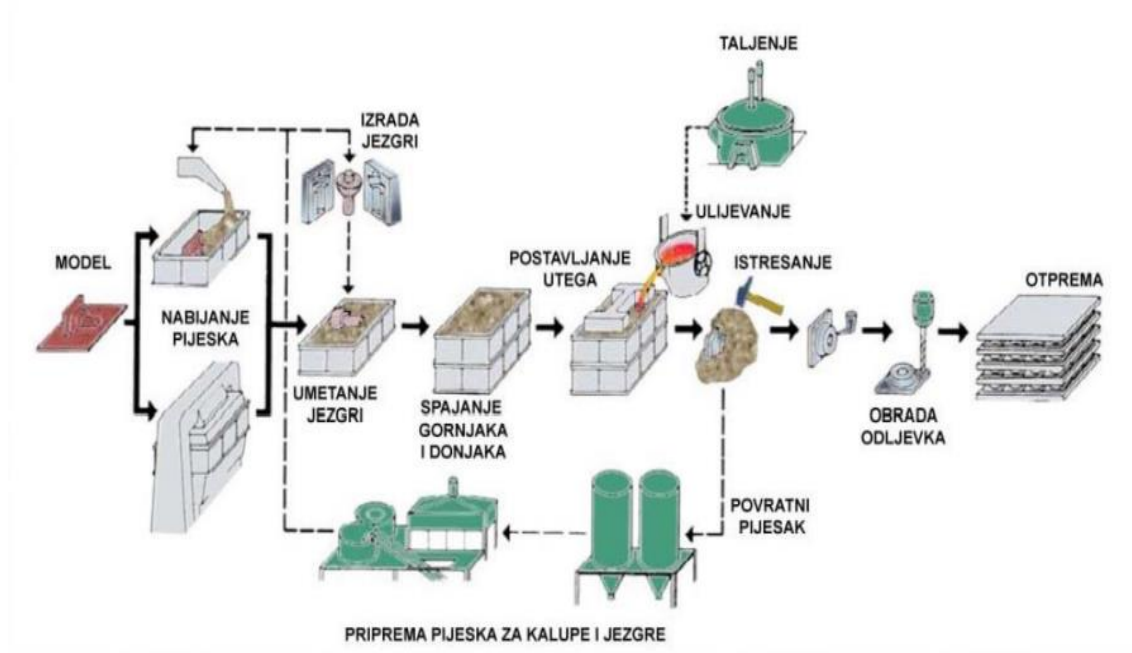


Slika 5.1. Shematski prikaz kalupa i odljevka koji nastaje postupkom pješčanog lijeva

Nakon što se pijesak u kalupnoj šupljini oblikuje, utiska na model i kalup bude spreman za rastaljeni metal, sa svrhom skrućivanja i otvrdnjavanja pijeska, kroz njega se propuhuje ugljikov dioksid. Karakteristika je pješčanog lijeva da se nakon propuhivanja ugljikovim dioksidom, tvorevina izvadi iz pijeska te se u zaostale šupljine potom ulijeva rastaljeni metal. [19]

Na slici je u potpunosti prikazan cjelokupni postupak izrade pješčanog lijeva u ljevaonici. Pješčano lijevanje se najčešće izvodi u dvije kalupne šupljine – gornjoj i donjoj, pogotovo ako se radi o simetričnim tvorevinama. Nakon stvrdnjavanja i hlađenja metala koji se lijeva, odljevak se najčešće podvrgava nekom obliku dodatne obrade kako bi se dobila što bolja kvaliteta površine. [19]

Na slici 5.2. su prikazani svi koraci jednog ljevačkog proizvodnog procesa, od dobave i pripreme pijeska, njegove primjene za oblikovanje šupljine prema pramodelu i slično. Nadalje, prikazuje i spajanje kalupnih polovica, učvršćivanje istih te napokon izlijevanje metala pomoću uljevnog sustava i vađenja gotove tvorevine. Iako pješčani lijev daje relativno dobru površinu i točnost dimenzija, najčešće se u tom proizvodnom lancu dodaju i procesi dodatne obrade površine u vidu brušenja, bušenja, poliranja i sličnih postupaka. [19]



Slika 5.2. Proizvodni proces u ljevaonici – pješčani lijev [19]

### 5.1.1. Veziva u pijesku

Najčešća vezivna struktura trenutno u primjeni za pješčani lijev jest glina – voda s dodacima. Pijesak se miješa s bentonitnom glinom kako bi prilikom procesa lijevanja, kalup zadržao željeni oblik, ali isto tako, kako bi bio temperaturno postojan i dimenzijski

stabilan, pogotovo imajući na umu činjenicu da se sama kalupna šupljina izrađuje s nešto većim dimenzijama zbog stezanja metala tokom hlađenja. Dvije su vrste bentonita u primjeni - natrijev i kalcijev. [20]

Natrijevom je bentonitu zadaća kalupu dati čvrstoću, tvrdoću i visoku temperaturnu izdržljivost, dok je zadaća kalcijevog bentonita dati tom istom pijesku određenu razinu fleksibilnosti, kako bi po stvrdnjavanju metala bilo omogućeno što lakše odvajanje modela i pijeska. [20]

Iz tog se razloga spajaju ove dvije vrste bentonita s pijeskom kako bi cjelokupan proces bio što jednostavniji, praktičniji, a posljedično omogućio dobivanje što bolje kvalitete željene tvorevine. [20]

Osim veziva, za pješčane se ljevove primjenjuju i smole, i to prilikom izrade jezgri koje imitiraju željenu tvorevinu. Tako se pod utjecajem temperature i određenih kemijskih reakcija ostvaruje sloj smole oko pijeska, a kemijske reakcije se odvijaju prilikom međusobne interakcije dviju komponenti smole. Takav način stvrdnjavanja jezgre karakterističan je za postupke gdje nema izlaganja visokim temperaturama i za *cold-box* postupke (slika 5.3.). [20]



Slika 5.3. Primjer umetnutih jezgri prije nasipavanja pijeska [21]

Dodavanjem katalizatora, reakcije se mogu dodatno ubrzati, a izabiru se prema vrsti metala koji se lijeva. Smole su tipično fenol formaldehidi i urea formaldehid, a od katalizatora su najčešće u primjeni sumporna i fosforna kiselina. Najčešći pijesak koji se primjenjuje za pješčani lijev jest silikatni pijesak koji se prije primjene pročišćuje od nepotrebnih nečistoća i dodataka. [22]

Važno je za primijetiti da postoje tri vrste oblike pijeska te ih je potrebno razlikovati kako bi se mogla dodati odgovarajuća količina veziva u smjesu. Tako postoje pješčana zrna okruglog oblika koje zbog prirode svoje površine zahtijevaju najmanju količinu veziva, zrna kutno spojenih bridova koje traže više veziva, ali bolje ulaze jedna u drugo te time omogućuju stvaranje bolje površine i zaglađenosti iste. Treća vrsta su pješčana zrna koja su djelomično zaobljena i djelomično oštih bridova te idealno objedinjuju ta dva ekstrema. [22]

Nadalje, iako su mogućnosti 3D ispisa praktički neograničene i mogući su svi oblici, završeci i ostali konstrukcijski dijelovi, treba imati na umu da se, ukoliko je moguće, izbjegavaju rebra. Na pregibima, odnosno spojevima rebra i ostatka odljevka, vrlo lako nastanu mjesta slabe popunjenosti talinom, nastanak poroznosti i drugih oštećenja koja u eksploataciji rezultiraju određenom vrstom zaribavanja ili pucanja, što je vidljivo na tvorevinama sa slike 5.4. [4]



Slika 5.4. Prikaz mogućih nepravilnosti na spoju rebra i ostatka modela [23]

## 5.2. Aditivna proizvodnja pramodela za precizni lijev

Da bi ovakav spoj mogao biti moguć, pažnju treba posvetiti materijalima izrade tvorevina u pisaču, to jest izabrati smolu s točno određenim svojstvima. Tu se prije svega misli na toplinska svojstva jer je poznato da ovaj tip materijala na određenim temperaturama lakše sagorijeva nego se tali pa se zbog toga problemu mora pristupiti drugačije nego li je to slučaj kod klasičnog preciznog lijeva (slika 5.5.) pomoću voštanih jezgri. Ispis tvorevina smolama omogućuje kasnije da se izgaranje, odnosno razgradnja, odvije malo po malo, čime se smanjuje mogućnost pucanja kalupa kod preciznog lijeva uslijed naglog širenja plina iz polimerne tvorevine. [24]

S obzirom na taj plin koji može ostati zarobljen u kalupnoj šupljini, svi napori da se protok plinova poboljša mogu imati izrazito pozitivan efekt na ukupan proces. Dodani kanali ventilacije, ispuha ili jednostavno ispuhivanje kalupnog modela kad god je to moguće svakako doprinose kvaliteti lijevanog modela. [24]

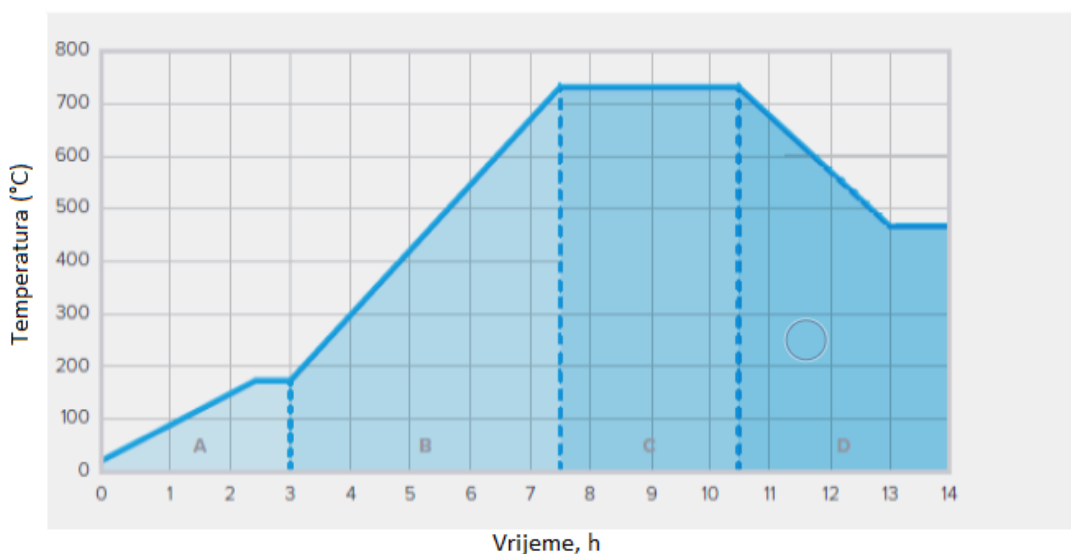


Slika 5.5. Primjer 3D ispisanih tvorevina spojenih na uljevni sustav za precizni lijev [24]

S obzirom na prirodu materijala, to jest smole za 3D ispis, ona je izložena umreživanju već prilikom samog procesa izrade, a dodatno se mogu ojačati naknadnim izlaganjem svjetlosti od 405 nm. Takva tvorevina može biti nešto tvrđa i teže oblikovljiva, ali isto

tako za očekivati je bolje ponašanje prilikom lijevanja i poboljšani mehanički integritet. [24]

Proces koji započinje sagorijevanjem tvorevine po ulijevanju metala u kalupnu šupljinu opisan je grafom prema kojem se tom prilikom odvijaju 4 faze. Prva je faza zagrijavanje koja je vrlo važna zbog toga što može doći do pucanja kalupa i nejednolikog sagorijevanja ukoliko se to sagorijevanje dogodi na jednom (slika 5.6.). [24]



Slika 5.6. 4 faze temperiranja polimernog materijala prilikom lijevanja metala A – zagrijavanje, B – gorenje, C – držanje na određenoj temperaturi, D – hlađenje [24]

Na dijagramu je vidljivo da je prije bilo kakvih radnji, potrebno odrediti vrijeme zagrijavanja tvorevine čime će, kako je već napomenuto, mogućnost oštećenja kalupa biti svedena na minimum. Zagrijavanje treba biti odrađeno na temperaturu do 200 °C. [24]

Nakon faze zagrijavanja (faza A), slijedi faza glavnog gorenja (faza B) koja treba biti prilagođena debljini materijala, vremenu ekspozicije i slično. Nakon toga slijedi još faza držanja na maksimalnoj temperaturi (faza C) i završna faza hlađenja (faza D). [24]

Prilikom samog ispisa tvorevine, treba obratiti pažnju na procese nakon inicijalnog umreživanja, pritom misleći na dodatno umreživanje na 405 nm, ali uz napomenu da naknadno umreživanje može trajati i do 4 sata, ukoliko se za to primjenjuje običan UV izvor svjetlosti. Proces može biti kraći ukoliko se primjenjuju velike industrijske UV peći te u tom slučaju traje do 2 sata. [24]

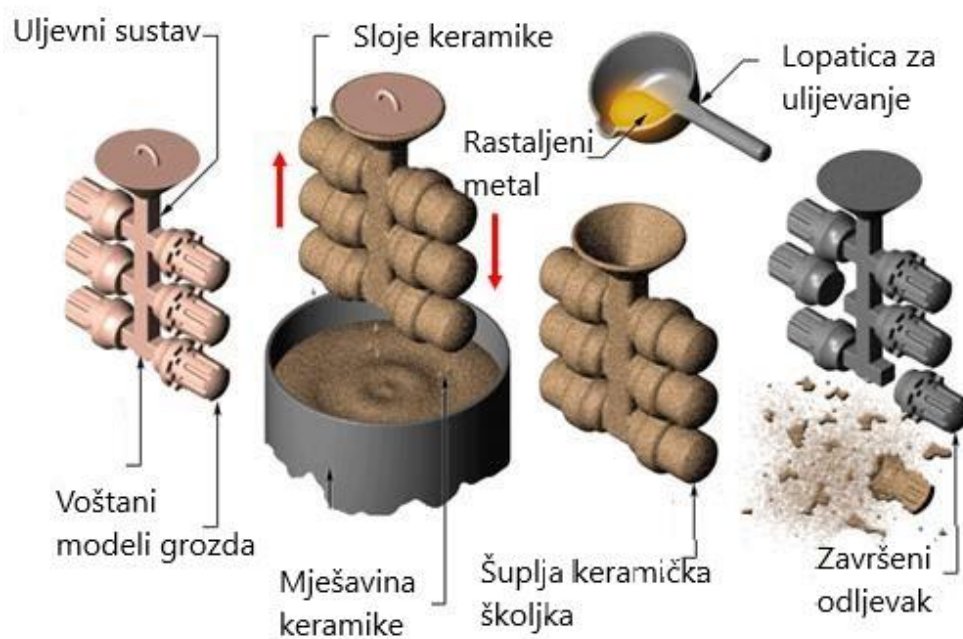
Također, prilikom dodatnog umreživanja, dobro je ostaviti potporu zajedno s tvorevinom jer se na taj način izbjegava mogućnost vitoperenja uslijed pojave zaostalih naprezanja. Ipak, u tom slučaju treba imati na umu da će i sama potpora postati težom za uklanjanje pa postupci uklanjanja postaju drugačiji, a i moguća je potreba za naknadnim poliranjem (slika 5.7.). [24]



Slika 5.7. Naknadne operacije nakon DLP-a i skidanja potporne strukture [24]

Dodatna prednost ovakvog načina pripreme modela za lijevanje leži u činjenici da je moguće istovremeno ispisati i model i uljevni sustav koji, ukoliko postoji određena razina rukovanja CAD alatima, može bolje odgovarati uvjetima lijevanja. Kako bi mogao funkcionirati, potrebno je imati na umu činjenicu da sve što se izlije u pijesak, mora biti lako za izvaditi van jer se u protivnom riskira integritet odljevka. [24]

Osnovna ideja postupka jest nanošenje slojeva keramike na pripremljeni model prema kojem će se opet oblikovati kalupna šupljina. To je postupak koji traje duže u odnosu na precizni lijev jer svaki sloj keramike zahtjeva sušenja od nekoliko sati, a najčešće je to 3 ili više slojeva (slika 5.8). [24]



Slika 5.8. Shematski prikaz postupka preciznog lijeva [25]

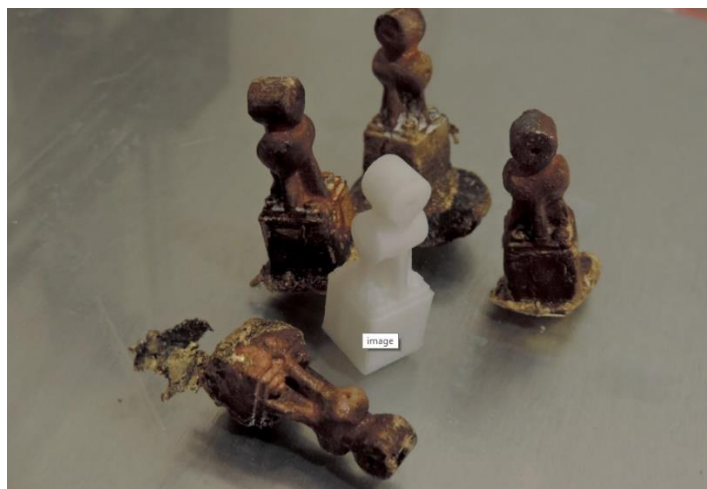
Materijal modela za precizni lijev je najčešće vosak koji je u potpunosti taljiv već i pri malom povišenju temperature i takav, lako taljiv, je idealna opcija za postupak u kojem pramodel kalupne šupljine može biti maknut jedino taljenjem ili gorenjem (slika 5.9.).





Slika 5.9. Zatvorene čahure kod preciznog lijevanja mogu biti jedino uklonjene razbijanjem keramičkog sloja [26]

Precizni lijev može biti odrađen u jednostavnijoj varijanti u odnosu na klasičnu gdje se na tvorevinu nanosi nekoliko slojeva keramike koja može prilično poskupjeti ukupan proces. Jeftinija je varijanta ona gdje se tvorevina ulaže u još nestvrdnuti gips. Iako je krajnji rezultat nešto lošiji od klasičnog preciznog lijevanja, i dalje je dovoljno dobar da se uzme u obzir. Dobar primjer preciznog lijeva gdje je model izrađen 3D ispisom jest ispis figurice od materijala PLA. To je materijal sa relativno niskom temperaturom tališta te ga je relativno jednostavno istaliti iz gipsa kako bi ostala željena kalupna šupljina (slika 5.10.). [23]



Slika 5.10. PLA 3D ispisana tvorevina i izliveni modeli nastali prema njoj [23]

Postupak je prilično jednostavan te je ustvari jedino potrebno odabrati dobru konzistenciju gipsa u koju se nakon toga polaže, također gipsom obložena, 3D tvorevina (slika 5.11.). Potom se sve zajedno ubacuje u peć gdje materijal izgara i za sobom ostavlja željenu kalupnu šupljinu. Greška koja se tom prilikom događa je stavljanje cijelog kalupa u peć prije nego je on do kraja ohlađen, čime dolazi do nejednolikog taljenja materijala, poroznosti, ali i pukotina u kalupu, a potom i na lijevanom modelu. [23]



Slika 5.11. Zagrijani kalup u kojem je polimerna tvorevina rastaljena i kalupna šupljina napunjena rastaljenom mjedi [23]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

Važnost, praktičnost i mogućnosti ovakvog načina aditivne proizvodnje opisane su u dosadašnjem, teoretskom dijelu projekta, dok će se ostatak uglavnom baviti praktičnom primjenom u realnim uvjetima.

Eksperimentalni je dio osmišljen kao provjera mogućnosti MSLA postupka za potrebe izrade pramodela i kalupnih šupljina. Prije toga, potrebno je odrediti parametre obrade 3D pisača. Kod postupka MSLA najbitniji parametar je vrijeme ekspozicije i naknadno umreživanje. Kao što je već ranije napomenuto, veliku prepreku aditivnoj proizvodnji i lijevanju predstavlja debljina stijenke. Stoga je u planu pokusa određena početna i konačna debljina pločice koja će poslužiti kao referenca prilikom provođenja eksperimenta. Prema planu pokusa u programskom paketu Design Expert određena su stanja pokusa prema tablici 6.1. Određena su 3 ponavljanja u centru pokusa (stanje 1, 2 i 7).

Predmetna tvorevina jest pločica dimenzija 60x20, sa tri različite debljine – 1, 1,5 i 2 milimetra. Tako ispisani će poslužiti lijevaonici da odrede da li ovakva izrada kalupa ima praktičnu upotrebu i na koji je to način najbolje odraditi. Pločice nisu naknadno umrežene, upravo iz razloga što je poanta pokusa odrediti na koji način duljina izlaganja tvorevine izvoru svjetlosti utječe na izradu tankih stijenki te da li one uopće mogu imati primjenu kao pramodeli u lijevanju metala.

Tablica 6.1. Plan pokusa

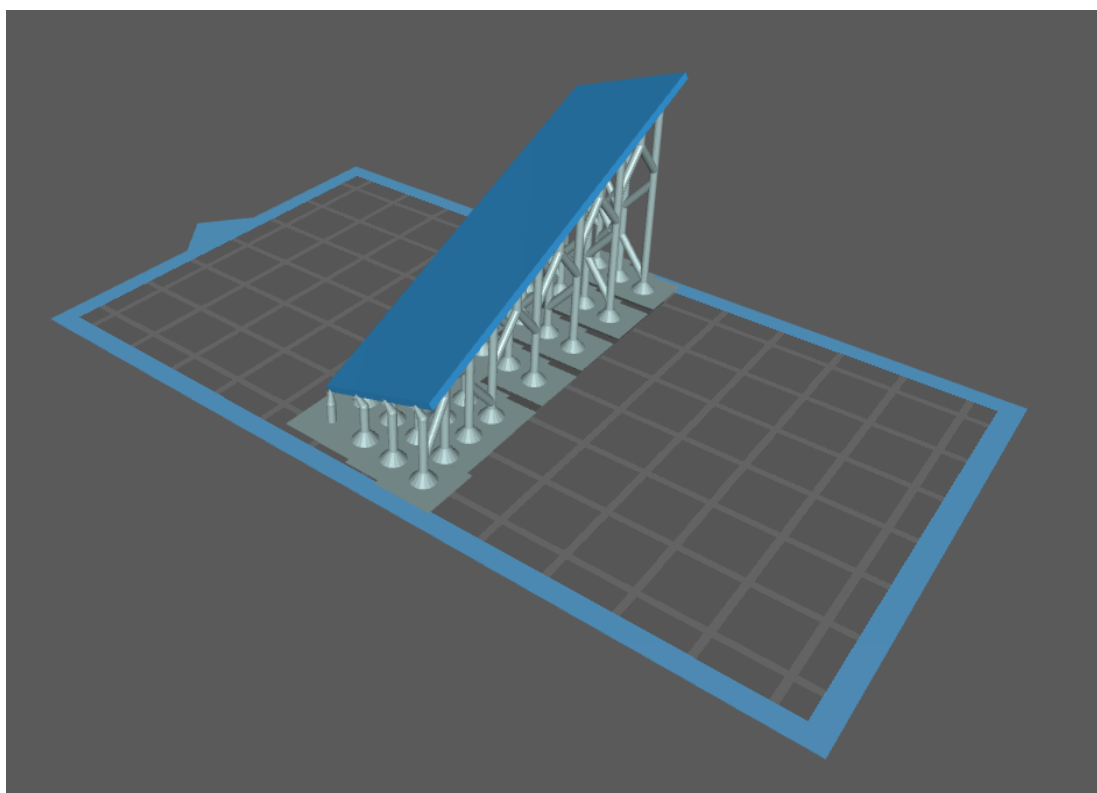
R. br.	Vrijeme ekspozicije	Debljina pločice	Trajanje 3D ispisa
1	11,5	1,5	1 h 42 min
2	11,5	1,5	1 h 42 min
3	8	1	1 h 30 min

Tablica 6.1. Plan pokusa - nastavak

4	15	1	1 h 57 min
5	15	2	1 h 57 min
6	10	2	1h 38 min
7	11,5	1,5	1 h 42 min

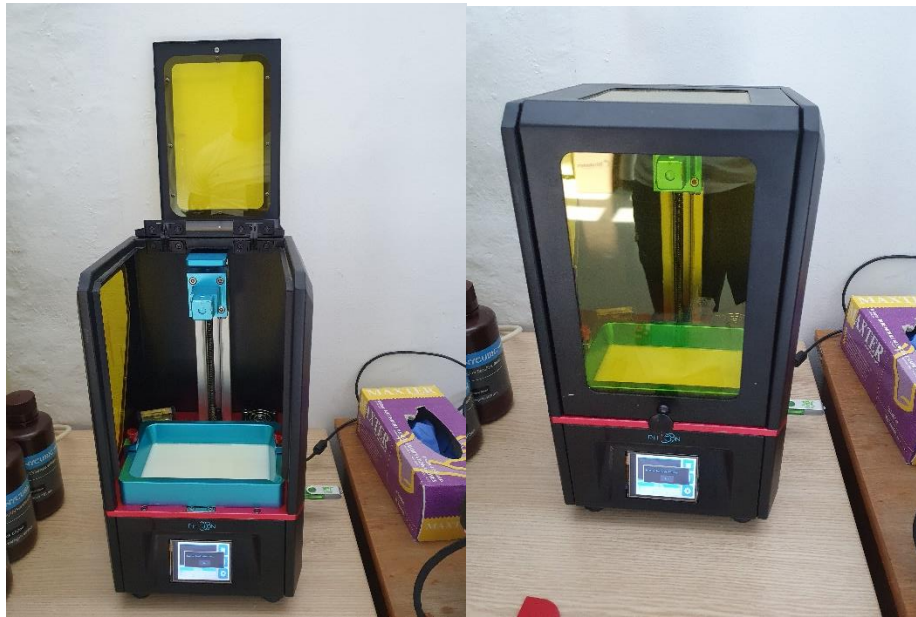
### 6.1. Izrada pramodela postupkom MSLA

Nakon izrade 3D CAD modela u softveru *Fusion*, potrebno ga je učitati u neki od softvera za *slicing* u kojem će taj model biti prebačen u STL datoteku (slika 6.1.) Također, u takvom se softveru mogu dodati i odrediti parametri potrebni za sam ispis, poput vremena ekspozicije, potrebne potporne strukture, i slično. Nakon što je izrađena STL i CAD datoteka, pločica se izrađuje na 3D pisaču *Photon* proizvođača *Anycubic* (slika).



Slika 6.1. Pripremljen model pločice s potpornom strukturom u softveru *Chitobox*

Neke od osnovnih specifikacija navedenog 3D pisača su u svakom slučaju brzina koja iznosi 20 mm/h, što je bilo sasvim zadovoljavajuće za potrebe ovog rada. Nadalje, kao materijal je korištena smola koja umrežuje na valnim duljinama od 405 nm. Veličina baze, to jest, prostor na kojem je moguć 3D ispis jest 115x65x15 mm, što je bilo dovoljno za potrebe pokusa.



Slika 6.2. 3D pisač Anycubic Photon

Prilikom izrade pločica neki od parametara ispisa postavljeni su na početku pokusa i ostali su konstantni tokom čitavog izvođenja pokusa, izuzev vremena ekspozicije slojeva.

Parametri su sljedeći:

- Visina sloja (0,1 mm)
- Broj umreženih slojeva baze (3)
- Vrijeme ekspozicije slojeva
- Vrijeme ekspozicije slojeva baze (60)
- Stanka prije početka umreživanja sloja (1 s)
- Podizanje radne podloge od dna spremnika prilikom umreživanja slojeva baze (5 s)

- Podizanje radne podloge od dna spremnika prilikom umreživanja ostalih slojeva tvorevine (5 s)
- Brzina podizanja radne podloge prilikom umreživanja slojeva baze (35 s)
- Brzina podizanja radne podloge prilikom umreživanja ostalih slojeva tvorevine (65 s)
- Brzina spuštanja radne podloge (150 mm/min)

Pločice su izrađene od bijele akrilne smole koja umrežuje na valnoj duljini od 405 nm. S obzirom da prilikom aditivne proizvodnje dolazi do određenih pitanja oko samih parametara obrade, prije glavnog pokusa je napravljen niz predpokusa sa debljinama i rezultatima prema tablici. Rezultati su navedeni uz napomenu orijentacije pločice na radnoj podlozi, debljine pločice i vremenu ekspozicije.

Tablica 6.2. Rezultati predpokusa

R. broj	Debljina pločice, mm	Napomena	Vrijeme ekspozicije, s	Rezultat ispitivanja
1	1	Nagib x i y osi od 20	4	Pločica se odvojila od potporne strukture tijekom prerade
2	1	Bez nagiba tvorevine, teška potporna struktura	5	Pločica se odvojila od potporne strukture tijekom prerade
3	1	Nagib x i y osi od 20°, srednja debljina potporne strukture	5	Pločica se odvojila od potporne strukture tijekom prerade
4	1	Nagib x i y osi od 20°, srednja debljina potporne strukture	7	Pločica se odvojila od potporne strukture tijekom prerade - djelomično uspješna prerada, odvojena tvorevina tek u posljednjoj trećini duljine
5	1	Nagib x i y osi od 20°, srednja debljina potporne strukture	8	Uspješno ispisana pločica - dobra kvaliteta površine

Tablica 6.2. Rezultati predpokusa - nastavak

6	1,5 i 2	Nagib x i y osi od 20°, srednja debljina potporne strukture	8	Pločica se odvojila od potporne strukture tijekom prerade, sloj materijala zalijepljen za dno spremnika sa smolom
7	1 i 1,5 mm	Nagib x i y osi od 20°, srednja debljina potporne strukture	9	Uspješno ispisana pločica - dobra kvaliteta površine
8	2 mm	Nagib x i y osi od 20°, srednja debljina potporne strukture	9	Pločica se odvojila od potporne strukture tijekom prerade, sloj materijala zalijepljen za dno spremnika sa smolom
9	1, 1,5 i 2 mm	Nagib x i y osi od 20°, srednja debljina potporne strukture	11	Uspješno ispisana pločica - dobra kvaliteta površine
10	1 mm	Nagib x i y osi od 20°, srednja debljina potporne strukture	15	Uspješno isprintana pločica - dobra kvaliteta površine, prilikom savijanja vidi se povećanje krutosti što treba uzeti u obzir prilikom daljnjeg ispitivanja



Slika 6.3. Pločica uz vrijeme ekspozicije od 5 sekundi, prema tablici 6.2.

Iz tablice 6.2. je utvrđeno da su dobri rezultati, što vezano uz kvalitetu površine, što uz ravnost, ostvareni samu u rasponu od 8 do 15 sekundi za debljinu pločice od 1 mm. Svi dobiveni rezultati ispod zahtijevanih 8 sekundi bili su neuspješni i nisu osigurali pločicu koja bi mogla biti korištena u daljnjem dijelu eksperimenta.

Problemi koji su nastajali prilikom 3D ispisa sa malim (manjim od 8 s) uglavnom su se pojavili zbog nedovoljno umreženog materijala koji nije pružao dovoljnu čvrstoću konstrukcije potporne strukture, te se tvorevina uopće nije „zalijepila“ na nju. Zbog toga je dolazilo do slučaja u kojem se 3D ispis odvijao na podlozi VAT spremnika, umjesto na radnoj podlozi.

Na slici 7.4. je također vidljiva pločica odvojena na početnom dijelu potporne strukture, što je uzrokovalo njezino uvijanje i narušenost kvalitete površine. Nakon nekoliko novih slojeva, tvorevina se zalijepila, te je ostatak bio dobro napravljen.



Slika 6.4. Pločica koja se uslijed nedovoljnog vremena ekspozicija odlijepila na početku ispisivanja



Na slici 6.5. je prikazana pločica izrađena pri vremenu ekspozicije od 7 sekundi gdje se vidi da je tijekom ekspozicije slojeva, u jednom dijelu došlo do pojave trganja materijala.

Razlog može biti u činjenici da je materijal nakon umreživanja postao previše krhak, a premalo žilav i zbog toga je došlo do pucanja.

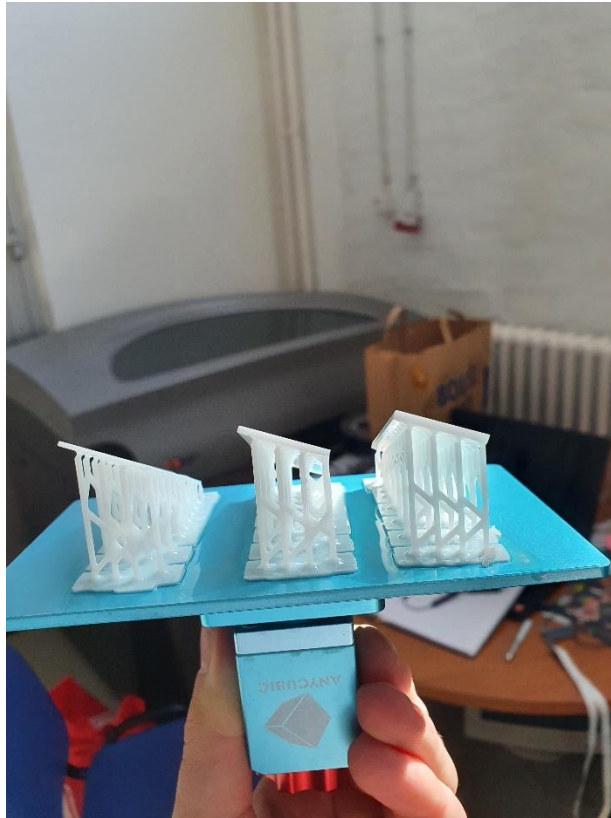
S obzirom na to da manje vrijeme umreživanja može značiti slabije prijanjanje tvorevine na potpurnu strukturu, za očekivati je da će to svakako značiti i odljepljivanje potpurne strukture. S druge strane, ukoliko uzmemo u obzir činjenicu da povećanjem vremena ekspozicije, riskiramo daljnju smanjenu žilavost materijala i kao takvog još podložnijeg pucanju i nastanku nepravilnosti poput ovih sa **slike**.



Slika 6.5. Prikaz okrhnutе tvorevine

Veća je količina nepravilnosti uočena u slučajevima kada su u 3D pisači izrađivane više od jedne tvorevine. Tako je na primjer, sa vremenom ekspozicije od 8 i 9 sekundi dolazilo i do pojave pucanja pločica, i do odljepljivanja tvorevine sa strukture.

U istom su se trenutku ispisivale pločice svih debljina, dakle od 1 mm, od 2 mm te također od 1 mm. Povećanje vremena ekspozicije na 15 sekundi je rezultiralo time da su pločice svih triju debljina ostale netaknute i sa vrlo dobrom kvalitetom površine (slika 6.6.)



Slika 6.6. Ispisane tvorevine na vremenu ekspozicije od 15 sekundi

Nakon inicijalnih testnih pločica napravljenih u svrhu određivanja granica vremena ekspozicije, određene su granice od 8 – 15 s, a prema tablici 6.1. Takve izrađene pločice upotrebljavaju se kao pramodeli za dobivanje kalupne šupljine u pješčanom lijevu.

## 6.2. Postupak lijevanja u pješčane kalupe u ljevaonici *IMPK*

Tijekom izrade pločica za ljevaonicu, vidljive su bile prednosti i nedostaci aditivne proizvodnje. Nedostatak je uglavnom u tome što je prije konačnih parametara potrebno

napraviti nekoliko iteracija kako bi tvorevine mogle biti dalje upotrijebljene u praktičnom dijelu rada.

Demonstracija pješčanog lijeva (slika 6.7.) odrađena je u ljevaonici IMPK u Ivanić Gradu gdje je u kontroliranim uvjetima izvedeno lijevanje rastaljenog metala u kalupnu šupljinu sa pločicama.



Slika 6.7. Postupak pješčanog lijeva u ljevaonici IMPK

U donju su se kalupnu šupljinu posložile pločice (slika 6.8.a.), sve istovremeno te se na njih sipao pijesak upotrijebljen kako bi površine dobivenih odljevaka bila što bolje kvalitete. Pločice su izravno spojene na uljevni sustav, i suprotno klasičnom postupku pješčanog lijeva, one nisu izvađene iz pijeska već su ostavljene da izgore pod utjecajem visoke temperature rastaljenog metala. Na slici 6.8.b prikazan je gotovi kalup sa testnim pločicama u koji se potom ulijeva rastaljeni metal GGG40, pri temperaturi 1630 °C.



Slika 6.8.a., 6.8.b Pripremljena kalupna polovica za lijevanje testnih tvorevina

Dodatno treba naglasiti činjenicu da je prilikom lijevanja, pramodel ostao u pijesku i nije se vadio iz kalupa, kao što je to uobičajeno za takvu vrstu postupka. Pretpostavka je da će, s obzirom na temperaturu uljevne mase – čelika, polimerni pramodel izgorjeti, a dim i spaljeni materijal moraju izaći iz kalupa u atmosferu kako bi gotov model mogao biti izliven.

Kao što je sa slike 6.8.a. vidljivo, sve pločice su poredane jedna do druge i svaka će od njih započeti proces spaljivanja u isto vrijeme.

Rastaljeni metal uliven je direktno na polimerne pramodele. Iako je na početku objašnjeno da je karakteristike pješčanog lijeva ta da se model po kojem treba napraviti kalupnu šupljinu vadi iz pijeska, u ovom je slučaju pločica koja ostavljena u pijesku jer je za očekivati da bi ona morala izgorjeti prilikom ulijevanja metala. Time je stvorena kombinacija preciznog lijeva i pješčanog lijeva.

Suprotno inicijalnoj pretpostavci, prilikom ulijevanja rastaljenog materijala u kalupnu šupljinu, nije došlo da sagorijevanja polimernog materijala pramodela. Rastaljeni metal

sagorio je tek vrh tvorevine, a šupljina je gotovo u potpunosti ostala neispunjena metalom (slika 6.9.a. i 6.9.b.).



Slika 6.9.a. Nakon lijevanja metala i hlađenja



Slika 6.9.b. Rezultat ostvaren nakon hlađenja i skrućivanja metala

Kao što je napomenuto, a i sa slika 6.9.a. i 6.9.b. vidljivo, rezultat lijevanja metala nije u skladu sa očekivanjem. Razlog za takvo ponašanje polimerne 3D tiskane pločice, moguće

je pronaći u činjenici da zbog vrlo male debljine tvorevine, metal nije mogao proći kroz čitavu šupljinu te je zbog toga do stvrdnjavanja došlo već na samom ulazu. Nadalje, iako je predviđeno sagorijevanje tvorevine u potpunosti, također je moguće zaključiti da i zbog samog materijala, koji je čvršći nego je očekivano, to nije moguće. S obzirom da je prema literaturi primijenjen polimerni materijal za ostale primjene aditivnih tehnologija, taljiv pri temperaturi od otprilike 260 °C što znači da je trebao u potpunosti sagorjeti, razloge za povećanu temperaturnu otpornost treba tražiti u jačem umreživanju prilikom svjetlosne ekspozicije.

## 7. ZAKLJUČAK

Kao što je na početku rada bilo napomenuto, osnovna ideja je bila objasniti i razraditi osnovne aditivne postupke kod kojih se tvorevina izrađuje direktno iz spremnika polimernog materijala izloženog nekoj vrsti svjetlosnog izvora. Zraka svjetlosti može biti generirana pomoću UV lasera kao što je to kod stereolitografije, običnog projektor kao kod DLP-a i LCD izvora kao što je to kod LCD 3D pisača.

Prikazane su prednosti i nedostaci pojedinih postupaka te njihove moguće nadogradnje odnosno prilagodbe kako bi tvorevine bile što točnijih dimenzija i izgleda.

Detaljno je pojašnjeno u kojim uvjetima i sa kakvim parametrima će MSLA dati najbolje tvorevine, odnosno na koji će način dati najoptimalnije rješenje. Tako je važno poznavati kritičnu energiju fotopolimerizacije i dubinu te vrijeme umreživanja, ali i valne duljine na kojima je to umreživanje, također, optimalno.

Iz provedenog se eksperimentalnog dijela zaključuje da ovaj materijal i postupak, što ujedno znači i parametri prerade ne mogu poslužiti za izradu pramodela za postupak lijevanja.

Važno je, dakle, u daljnja istraživanja uključiti i druge materijale i druge postupke aditivne proizvodnje, ali i druge postupke lijevanja metala.

## 8. LITERATURA

1. Devine, Declan M. *Polymer-Based Additive Manufacturing* Springer International Publishing, Cham, 2019.
2. <https://www.instructables.com/id/5-Settings-to-Improve-Your-SLADLPLCD-3D-Print-Qual/>, 22.02.2021.
3. <https://www.stratasys.com/fdm-technology>, 22.02.2021.
4. <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/additive-manufacturing-processes/>
5. Fatkullin, Nail, et al. *NMR· 3D Analysis· Photopolymerization*. Vol. 170. Springer Science & Business Media, 2004.
6. Sangermano, Marco, Ignazio Roppolo, and Annalisa Chiappone. "New horizons in cationic photopolymerization." *Polymers* 10.2 (2018): 136.
7. Xiao, P., et al. "*Photoinitiation mechanism of free radical photopolymerization in the presence of cyclic acetals and related compounds.*" *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* 48.24 (2010): 5758-5766.
8. Mishra K, M, Yagci Y. *Handbook of radical vinyl polymerization*. New York: Marcel Dekker, 1998.
9. Pilipović, Ana: Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa, doktorski rad , Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
10. <https://www.youtube.com/watch?v=yQMJA45gFE>; 25.02.2021.
11. Mu, Q., Wang, L., Dunn, C. K., Kuang, X., Duan, F., Zhang, Z., ... & Wang, T. (2017). Digital light processing 3D printing of conductive complex structures. *Additive Manufacturing*,
12. Horvath, Joan, and Rich Cameron. *Mastering 3D printing*. Berkeley, CA: Apress, 2014.
13. <https://www.3dsystems.com/materials/accura-bluestone>; 30.11.2021.
14. <https://theorthocosmos.com/laser-sla-vs-dlp-vs-masked-sla-3d-printing-technology-compared/>; 30.11.2021.
15. <https://www.youtube.com/watch?v=ihR9SX7dgRo>; 17.02.2021.



16. Tumbleston, J. R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Januszewicz, R., Johnson, A. R., Kelly, D., ... & DeSimone, J. M. (2015). Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*
17. <https://amfg.ai/2019/08/06/expert-interview-photocentric-paul-holt/>;  
20.02.2021.
18. <https://www.3dsourced.com/3d-printing-technologies/sla-vs-dlp-3d-printing/>;  
8.4.2021.
19. Titan FSB; <http://titan.fsb.hr/~dzezeli/Dizajn-2013-12/2020-21/Prezentacije/LIJEVANJE.PDF>
20. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier Science, 2001.
21. <https://craftmach.com/everything-about-cores-in-metal-casting-process/>;
22. *FormLabs application guide: Recommended burnout process and casting guide*, Formlabs, 2021, 4.11.2021.
23. Wyatt M., N. *3D Printing for Model Engineers: A Practical Guide*. Wiltshire: The Crowood Press Ltd., 2018.
24. *FormLabs application guide: Recommended burnout process and casting guide*, Formlabs, 2021,
25. [http://www.jinlogic.com/investment\\_casting\\_process.php](http://www.jinlogic.com/investment_casting_process.php); 4.11.2021.