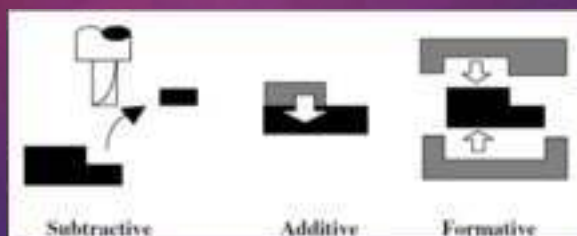


# ADITIVNE PROIZVODNE TEHNOLOGIJE

PRINCIPI APT

## 6. PRINCIPI ADITIVNE PROIZVODNJE SLOJ PO SLOJ

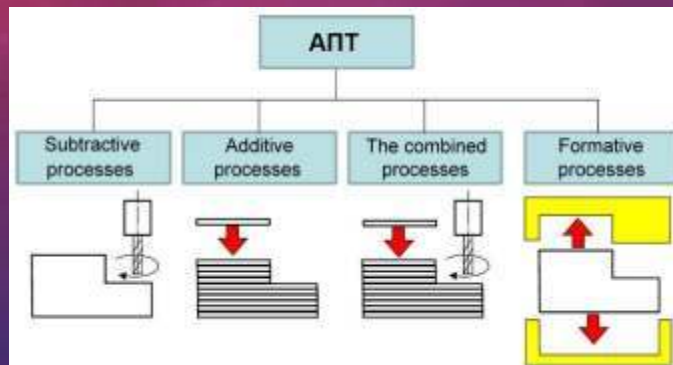
- Upotrebom postupaka APT proizvod nastaje dodavanjem materijala sloj po sloj.
- Ovakav princip suprotan je od primera klasičnim postupcima odvajanja materijala (subtraktivno) koji pripadaju metodama obrade rezanjem (struganje, goldanje, brušenje i sl.)



a) odvajanje materijala, b) dodavanje materijala, c) oblikovanje materijala

## 6. PRINCIPI ADITIVNE PROIZVODNJE SLOJ PO SLOJ

- Osnovna klasifikacija tehnologija - proširena



a) odvajanje materijala, b) dodavanje materijala, c) kombinovano d) oblikovanje materijala

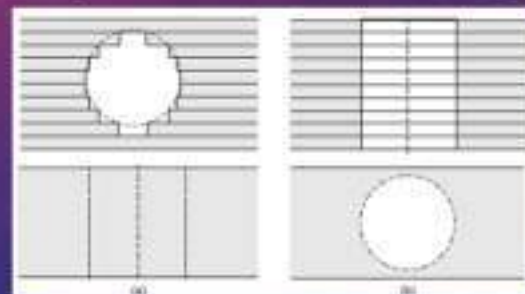
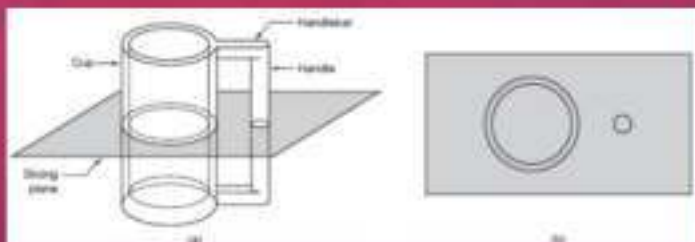


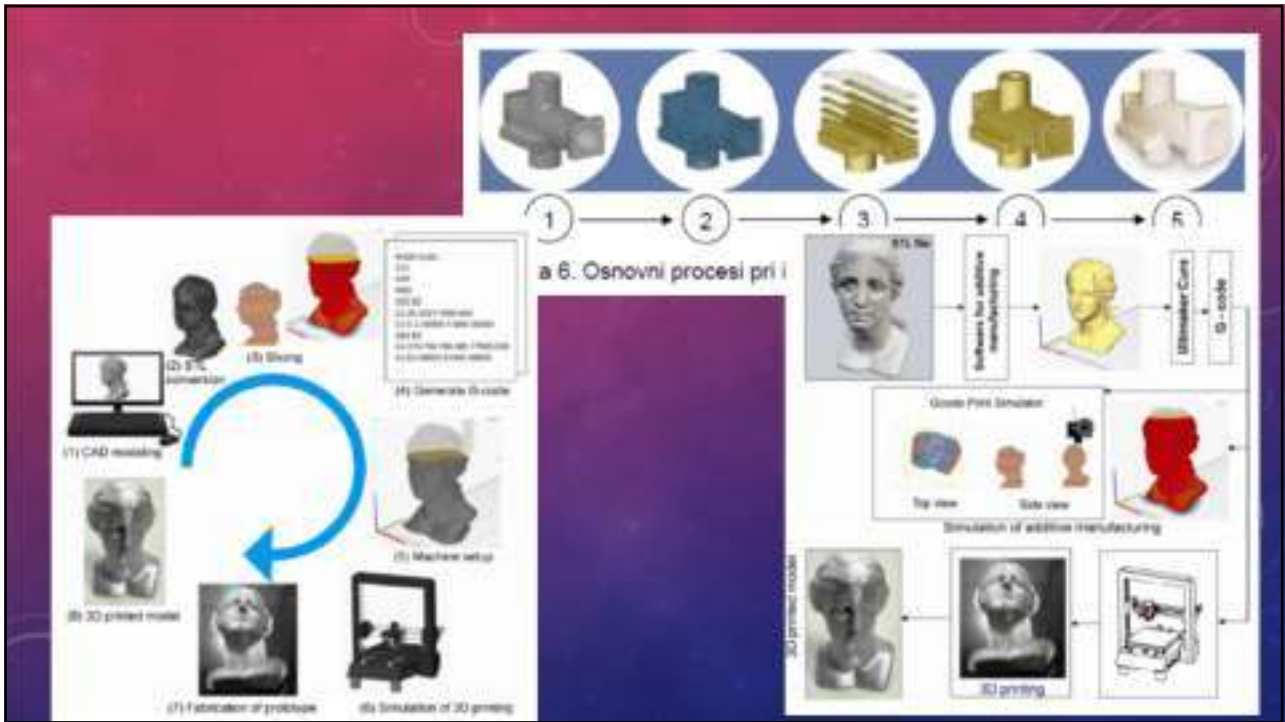
Princip tehnologije slojeva, na primeru slagalice HASBRO

Iako se postupcima APT formiraju vrlo komplikovani geometrijski 3D oblici proizvoda, u principu je reč o 2.5D postupcima pri kojima se 2D slojevi slažu jedan na drugi i tako se dolazi do treće dimenzije proizvoda. Kao rezultat ovakvog načina izrade dobijaju se trodimenzionalni proizvodi velike tačnosti u ravni X-Y, dok tačnost u smeru ose z zavisi od debljine slojeva – što su slojevi tanji, veća je tačnost proizvoda.



Slaganje 2D slojeva u 3D proizvod: a) kompjuterski 3D model izratka, b) slaganje 2D slojeva, c) izradak dobijen sloj po sloj





### Formiranje 3D modela

- Modeliranjem (klasično 3D modeliranje pomoću CAD programa)
- Reverzno inženjerstvo
- Iz oblaka tačaka.

Element of CAD Elements	Element	Type of CAD Model
0D	Point	Point Model
1D	Line	Edge Model
2D	Surface	Surface Model
3D	Solid Volume	Solid or Volume Model

Figure 2.7 CAD elements and model types

# АДИТИВНЕ ПРОИЗВОДНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ

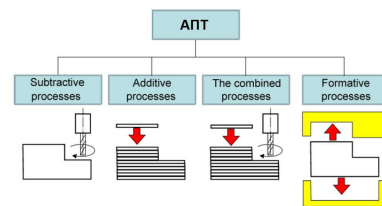
ПОДЕЛА  
ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈА У КАДИ  
СТЕРЕОЛИТОГРАФИЈА

1

Подсећање са прошлог часа!

## Подела технологија

- методе уклањања материјала (резање, неконвенционалне обраде) (*Subtractive*)
- методе обликовања материјала (пластично деформисање) (*Formative*)
- методе додавања материјала - Адитивне технологије (АТ) (ливење, синтеровање, ...) (*Additive*)
- комбиноване/хибридне методе



Основна класификација технологија

CNC tehnologije	HIBRIDNI PROCESI OBRADЕ	Aditivne tehnologije
+ Ponovljivost		+ Manje otpada
+ Preciznost		+ Složena geometrija
+ Kvaliteta površine		+ Raspon materijala
+ Produktivnost		- Dugo vrijeme obrade
- Odvojena čestica		- Loša kvaliteta nastale površine

2

## 7. Подела АПТ

Подсећање са прошлог часа!

Према примени адитивних технологија:

**rapid prototyping** (производња концептуалних модела и функционалних прототипова),

**rapid tooling** (производња алата и уметака),

**rapid manufacturing** (производња готових делова)

Материјали производа:

Полимерни материјали

Метални материјали

Други материјали (керамика, композит)

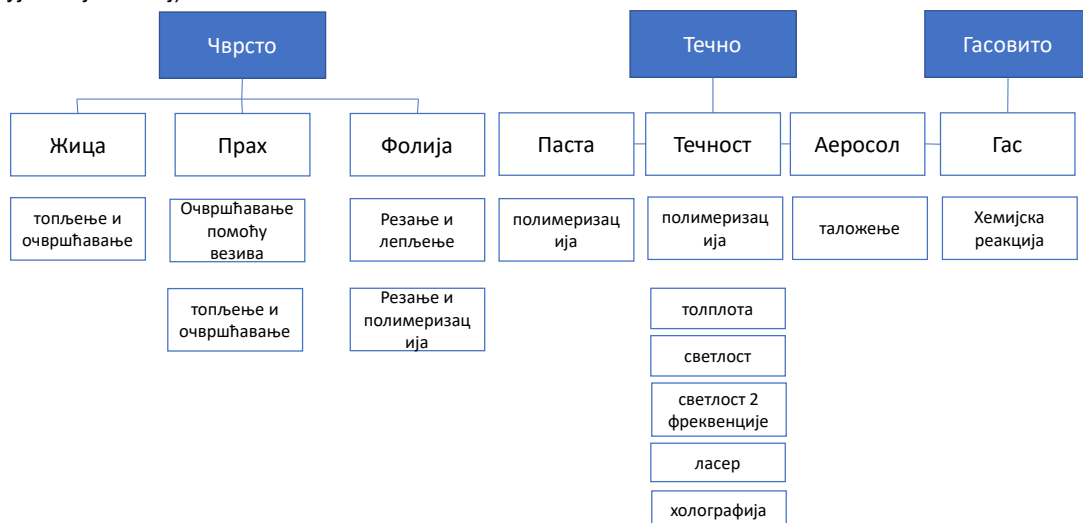
Према методи формирања изратка:

фото-очвршћавањем,  
екструдирањем,  
замрзавањем,  
заваривањем,  
електроплатирањем,  
распрскавањем,  
синтеровањем,  
штампањем,  
топљењем,  
сечењем,  
лепљењем или  
ливењем.

3

Стање почетног материјала:

**течно** (течни мономери који се стврдњавају слој по слој у чврсте полимере), **чврсто** (у облику листова/лимова или филаменти), **на бази праха** (прах/прашкasti материјали који се сједињује и везује слој по слој) и **гасовити**.



4

Oblik polaznog materijala	Način građenja fizičkog objekta	Metoda	Proizvođač	Moguća primena u industriji pneumatika
TEČNOST (FOTOČVRŠĆAVAJUĆA)	Očvršćavanje pomoću svetla kroz masku	Solid Ground Curing (SGC)	Cubital Inc.	KP, MP, FP, MA, KPA
	Očvršćavanje UV laserom	Stereolithography (SLA)	3D Systems	KP, MP, FP, MA, KPA
	Kombinacija INK JET teh. i očvršćavanja UV lampom	Objet 3D-printer	Object Geometries Ltd.	KP, MP, FP, MA, KPA
PRAŠAK	Sinterovanje sa laserskim zagrevanjem	Selective Laser Sintering (SLS)	DTM Corporation	PA
		Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	EOS	PA
	Topljenje sa laserskim zagrevanjem	Laser Engineered Net Shaping (LENS)	Optomec / Sandia National Lab. (now-DMDS Direct Mat. Deposition System)	PA
		Lasform	AeroMet	PA
	Vezivanje praška lepkom (baziran na MIT-ovoj 3D printing teh.)	3D-Printing	Z Corporation	KP, MP, KPA
ČVRSTI MATERIJALI	Ektruzija plastike	Fused Deposition Modeling (FDM)	Stratasys	KP, MP, FP, MA, KPA
		Multi Jet Modeling (MJM)	3D SysteMS	KP, MP, KPA
	INK JET tehnika	3D Plotting	Solidscape Inc (ex. Sanders Prototype Inc.)	KP, MP, KPA
LISTOVI	Laminacija sa predhodnim lepljenjem (Sečenje materijala laserom)	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Helisys Inc.	KP, MP, FP, MA, KPA

Tabela 1. Podela komercijalnih RP tehnologija i mogućnost njihove primene za izradu pojedinih vrsta

5

## Категорије процеса

### 1. Фотополимеризација у кади (Vat photopolymerization) /

стереолитографија, Stereolithography (SLA)

процес адитивне производње (АП) током које течни фотополимер у кади селективно очвршћава полимеризацијом која је активирана светлошћу.

### 2. Директна 3D штампа / Бризгање материјала (Material jetting) / Polyjet / Inkjet Printing

процес АП током којег се капљице градивног материјала (фотополимер или восак) селективно таложу.

### 3. Везивна 3D штампа / Бризгање везива (Binder jetting) / Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)

процес АП током којег се течно везивно средство селективно наноси ради спајања прашкастог материјала.

6

#### Категорије процеса - наставак

**4. Фузија нанетог праха (Powder bed fusion) –/ Selective Laser Sintering (SLS); Direct Metal Laser Sintering (DMLS); Selective Laser Melting (SLM); Electron Beam Melting (EBM)**

процес АП током којег топлотна енергија селективно топи и спаја нанети прашкасти материјали

**5. Екструдирање материјала (Material extrusion) / Fused Deposition Modeling (FDM); Contour Crafting**

процес АП током којег се материјал селективно дозира кроз млазницу или отвор

**6. Спајање усмеравањем енергије / Таложење под директним дејством енергије (Directed energy deposition) / Laser Engineered Net Shaping (LENS); Electronic Beam Welding (EBW)**

процес АП током којег се фокусирана топлотна енергија (ласер, сноп електрона, плазмин лук) користи тако да топљењем споји материјал док се таложи.

**7. Ламинација фолија / листова (Sheet lamination) / Laminated Object Manufacturing (LOM)**

процес АП током којег се фолије материјала спајају како би формирале део.

7

#### Главне групе процеса (за прераду метала)

- [Fused Deposition Modeling \(FDM\)](#)
- [Laser Powder Bed Fusion \(LPBF\) / Selective Laser Melting \(SLM\)](#)
- [Electron Beam Melting \(EBM\) / Powder Bed Fusion with Electron Beam](#)
- [Metal Binder Jetting](#)
- [Wire Arc Additive Manufacturing \(WAAM\)](#)
- [Directed Energy Deposition with laser \(DED\)](#)
- [Directed Energy Deposition with electron beam \(DED eBeam\)](#)
- [Metal Lithography](#)
- [Cold Spray](#)
- [Micro 3D Printing](#)



*Metal 3D printed parts span industries and applications: [MX3D's 3D printed steel bridge in Amsterdam](#), [Cobra's 3D printed putter](#), [Lufthansa's 3D printed de-icing gear component](#), [RamLab's 3D printed ship propeller](#)*

8



### Главне групе процеса (за прераду полимера)

Поступци екструдирања/таложења/депоновања (FDM – Fused Deposition modelling) – чврсто/отопљено

Стереолитографски поступци (SL – Stereolithography) – течно (у форми пасти)

Поступци штампања материјала (MJ – Material Jetting) – течно

Поступци штампања уз везива (BJ – Binder jetting) – прах/везиво

Поступци ласерског синтеровања (SLS – Selective Laser Sintering) – прах

Поступци ламинирања (LOM – Laminated Object Manufacturing) – лим – фолије/везиво

Поступци таложења аеросол (m3D – Aerosol deposition) – aerosol

#### Остале поделе:

према радној запремини,  
квалитету обраде (према дебљини слоја),  
брзини,  
обрада са више материјала...

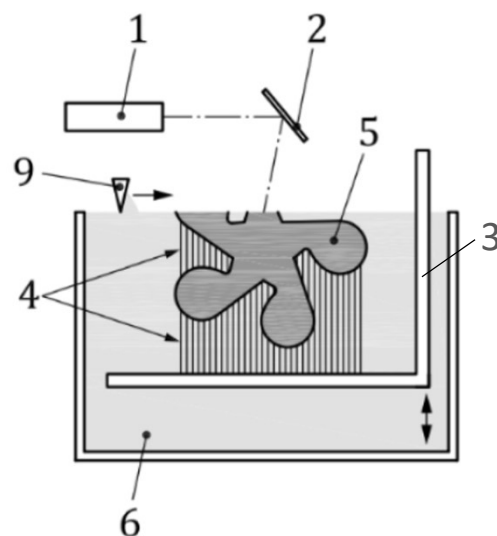
9

### 8а. Фотополимеризација у кади (Vat photopolymerization)

Дефиниција према стандарду ISO 17296-1:

Процес адитивне производње (АП) током које течни фотополимер у кади селективно очвршћава полимеризацијом која је активирана светлошћу.

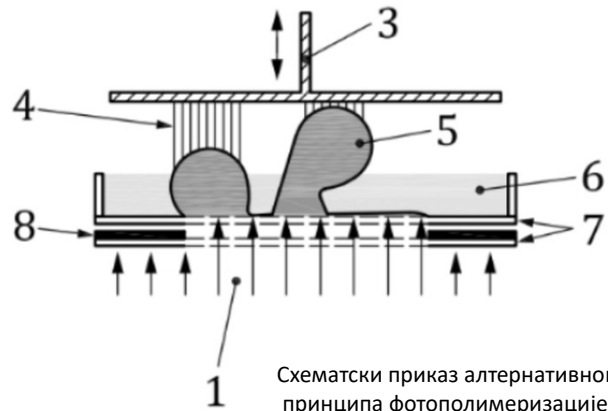
1. Извор светлосне енергије (ласерски извор светлости)
2. Закрнуто огледало са фокусом
3. Платформа за градњу и управљање кораком
4. Потпора
5. Производ
6. Посуда (кадица) са течном фотоосетљивом смолом
9. Механизам за пресвлачење и поравнавање површине



Схематски приказ принципа фотополимеризације у кади - ласерски извор светлости <sup>10</sup>

## 86. Фотополимеризација у кади (Vat photopolymerization)

1. Извор светлосне енергије (контролисана површ снопа светлости)
3. Платформа за градњу и управљање кораком
4. Потпора
5. Производ
6. Посуда са течном фотоосетљивомсмолом
7. Прозирне плоче
8. Фото маска



Схематски приказ алтернативног принципа фотополимеризације у кади – контролисана површ снопа светлости

**Полазни материјал:** течан или у облику пасте – фотореактивне смоле .

**Механизам везивања:** хемијска реакција.

**Активација:** типично зрачење ласера или лампи.

**Постпроцесирање:** чишћење, уклањање потпоре, даље ојачавање UV лампама.

11

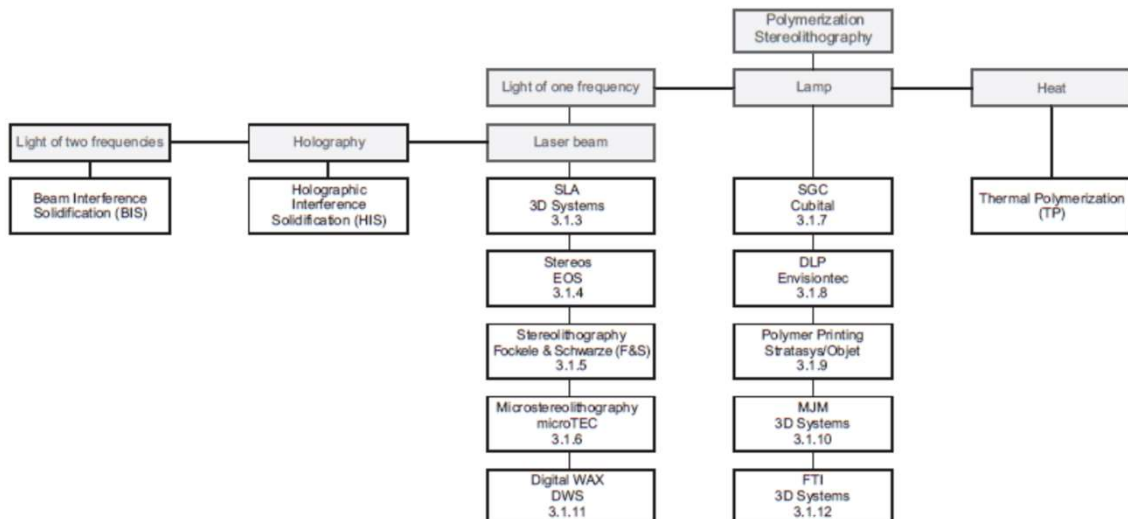


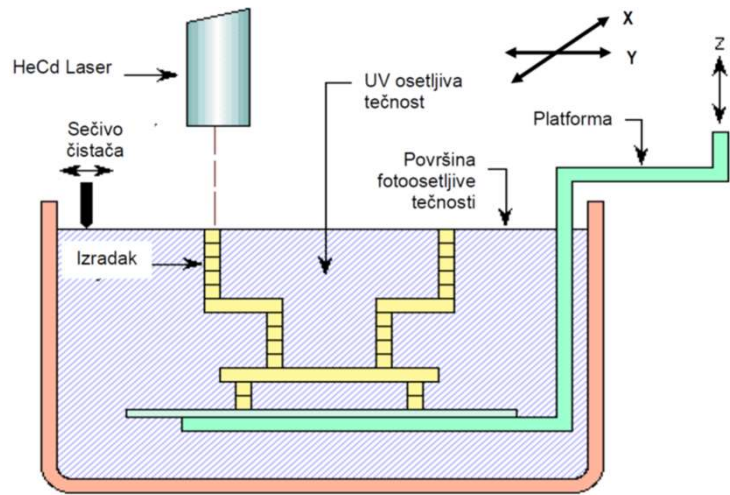
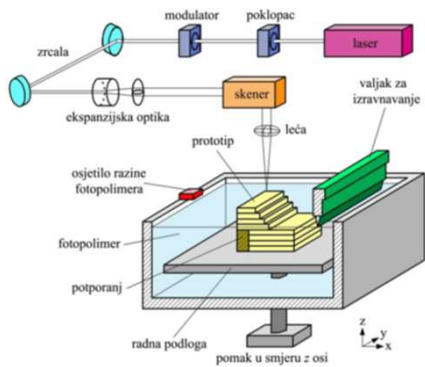
Figure 3.8 Polymerization and stereolithography process, overview in continuation of Fig. 2.38

12

## 9. Стереолитографија

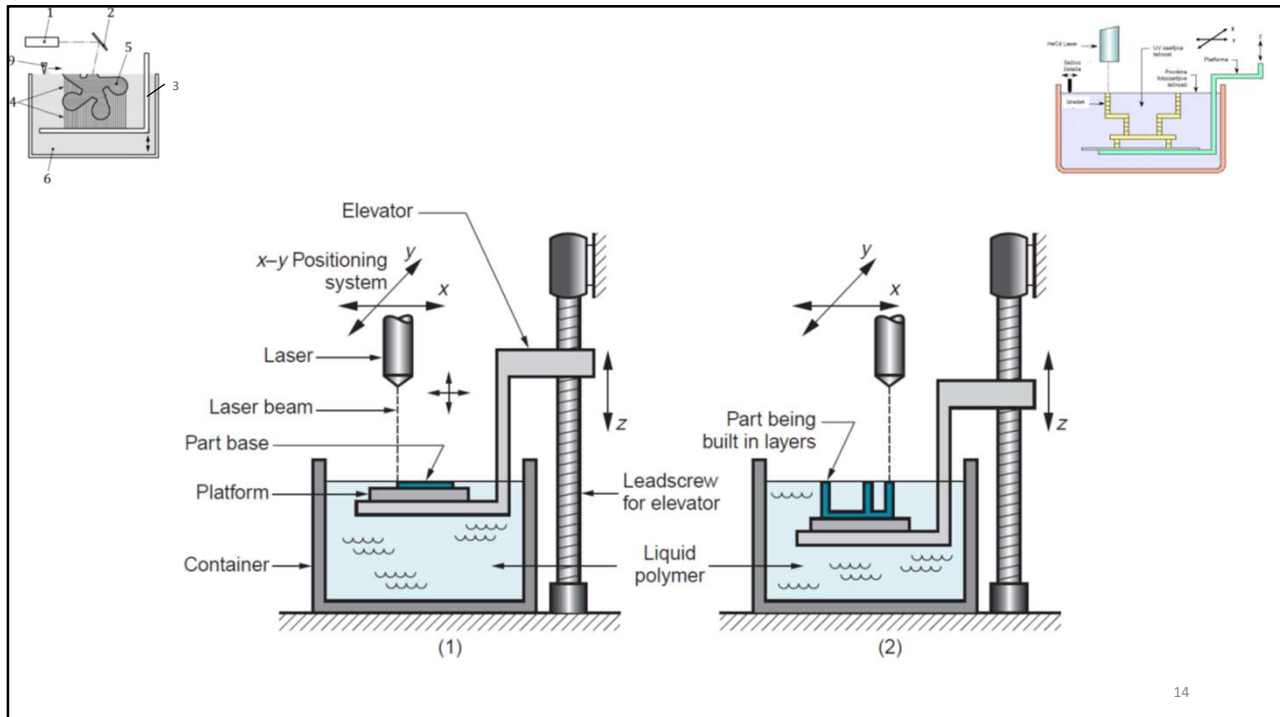
### Stereolithography (SLA)

Стереолитографија је прва комерцијална адитивна технологија која се појавила на тржишту.



Шема процеса стереолитографије (SL)

13

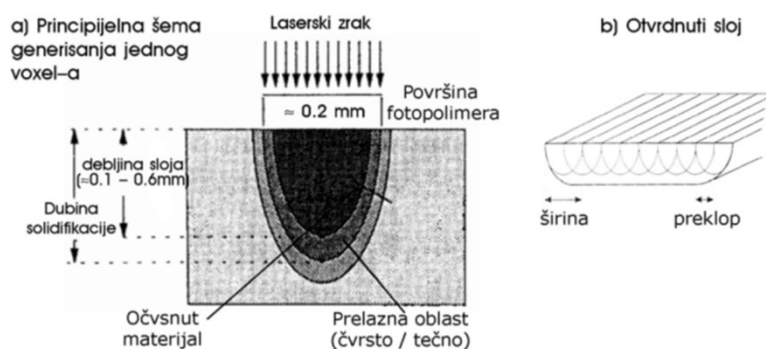


14

## Поступци на бази солидификације флуида

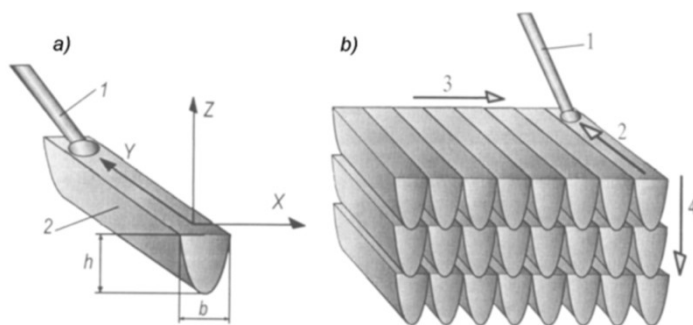
Сви поступци стврдњавања течних материјала темеље се на принципу фотополимеризације (*photopolymerisation* н). Ако се такве течности осветле ултраљубичастом лампом или ласерском светлошћу, долази до њиховог отврдњавања. Извор светлости је најчешће ласер. Преко одговарајућих уређаја ласерски зрак усмерава се на полимер, при чему је путања зрака управљана рачунаром, у складу са креираним геометријским подацима за сваки слој понаособ. Само отврдњавање полимера по дубини под утицајем ласерског зрака остварује се у виду полуцилиндра (тзв. *voxela*).

Солидификација (очвршћавање) радног флуида (полимера)– одвија се на следећи начин: када се флуид изложи УВ или ласерској светлости, он одмах отврдне због ниске енергије апсорпције. Отврдњавање се обавља у виду *voxela* (мала запремина отврднутог флуида у облику полуцилиндра –



Процес полимеризације – очвршћавања фотополимера

15



### Формирање структуре слојева

a) појединачни очврснути слој ( $h$  – висина,  $b$  – ширина очврснуте линије, 1 – ласерски сноп, 2 – очврснута линија),  
 б) међусобна констелација појединих очврснутих слојева, 1 – ласерски сноп, 2 – смер померања ласерског снопа, 3 – корачни посмак ласерског снопа, 4 – корачно спуштање радног стола

16

### **Области примене стереолитографије**

Стереолитографија има бројне примене како у индустрији тако и у другим гранама људске делатности. Неке од основних области примене СЛ су:

- Израда нултих серија делова
- Пробни алати пре процеса производње
- Модели који се користе у медицинске сврхе
- Израда обликованих електрода за електроерозиону обраду
- Провера налегања и односа делова у склопу
- Израда прототипова делова из аутомобилског, авионског и свемирског програма
- Израда калупа и матрица за ливење како метала и легура тако и пластике.

Неки од најпознатијих произвођача машина и уређаја за стереолитографију су:

- 3D Systems, SAD
- Electro Optical Systems, Nemačka
- Fockele&Schwarze, Nemačka
- Mitsubichi, Japan
- Mitshui, Japan
- Teijin Seiki Co., Japan...

## Стереолитографија - предности и недостаци

### Предности:

- Израда делова које није могуће изградити само једним комерцијалним поступком
- Могућност непрекидног рада без надзора 24 сата
- Нема ограничења по питању геометријских облика
- Поједини делови се могу користити за употребу без накнадне обраде
- Могућа је израда модела различитих боја у зависности од фотополимера који се користи
- Израда делова које је немогуће или врло тешко и компликовано изградити другим конвенционалним поступцима.
- Брза и ефикасна израда
- Могућност брзих измена модела

### Недостаци:

- Захтевна и компликована анализа редоследа обраде
- Неопходна потпорна структура код модела са испустима, конзолама...
- Прецизност је нижа него код конвенционалних поступака
- Ограничена је примена због својстава коришћених материјала
- Неопходне су додатне обраде попут чишћења, уклањања потпора и помоћних делова који служе за учвршћивање и укрупњавање делова...
- Релативно скупа опрема и материјал од кога се израђују прототипови
- Скупо одржавање
- Неопходна је високообразована стручна радна снага

19

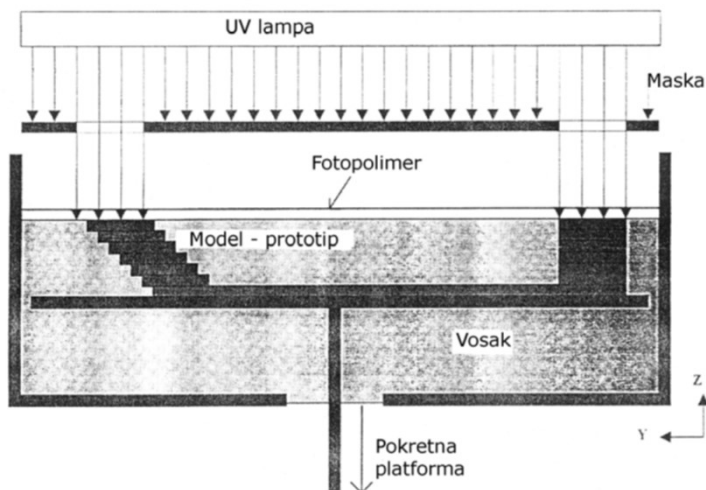
## Стереолитографија – Fockele & Schwarz

**Fockele & Schwarz (Немачка) – исти принцип као 3D Systems**

**Предност је у интеграцији са CAD програмом Pro/Engineer у ком израда појединих слојева се изводи директно у оригиналном 3D моделу производа, а не на STL датотеци (где при конвертовању може доћи до грешака)**

20

## 10. Топографски поступак Solid Ground Curing (SGC)



Принцип Solid Ground Curing поступка

### Генерисање маске

Јонографија, слична Херох поступку „Развијање“ плоче – електрстатичко пуњење тонером.

### Генерисање слоја

Одстрањивање течног полимера  
Восак за испуну шупљина који се охлади.  
Вишак воска са првог слоја се уклања поступком сличном глодању.

21

### Предности овог поступка:

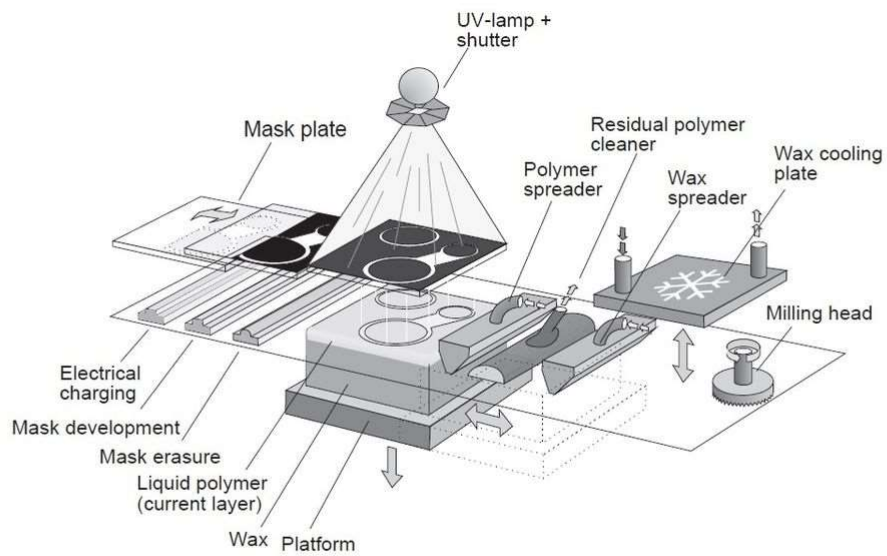
- Цео слој отврдњава у исто време. На тај начин се скраћује време процеса.
- Време осветљавања не зависи од комплексности геометрије слоја у  $x$ - $z$  равни.
- Због истовременог осветљавања модела не појављују се унутрашњи напони у моделу, па се остварују висока тачност и квалитет модела.
- Не постоји потреба за ослоњцима/потпорама на моделу, јер ту улогу преузима восак.
- Нема ограничења с аспекта геометрије модела.
- Нема штетних испаравања фотополимера или је оно сведено на најмању меру и то због тога што је фотополимер за време процеса веома кратко време у течном стању.
- Уз мале измене процес се може примењивати и за израду воштаних модела за ливење.

Поље примене СГЦ слично је као и код СЛ, с тим што ова технологија омогућава и израду веома малих уреза/жлебова (и до 0.1 мм). На тај начин могуће је креирати и покретне делове модела или мале механизме, зупчанике и сл. Могуће је израдити делове веома комплексних конфигурација. Нема ограничења у смислу израде, на пример, дубоких отвора, великих испуста, танких зидова и сл.

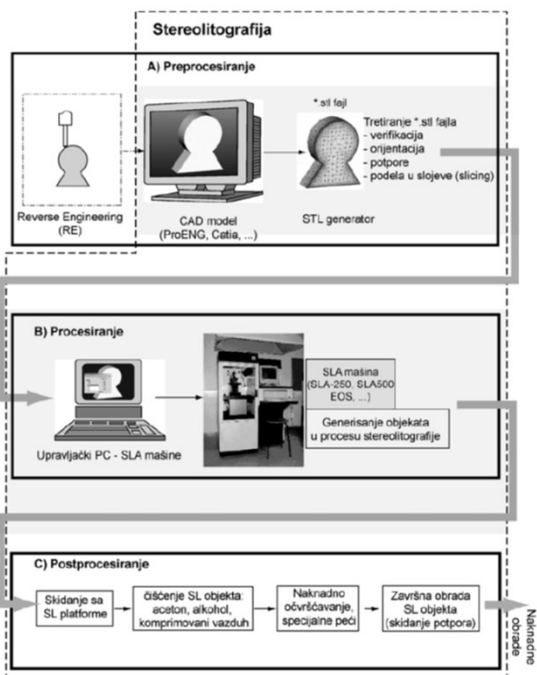
### Недостаци поступка:

- Комплексност процеса, уређаја и машина. Потребно је веома обучено особље.
- Бучност у раду.
- Велика потрошња воска који не може бити рециклиран.
- Скидање воска на крају циклуса генерисања сваког појединачног слоја релативно је сложено и скупо.
- Далеко најскупљи РП поступак, те је стога пре примене потребно извршити техно-економску анализу и испитати оправданост примене.

22



Schematic\_Diagram\_of\_Solid\_Ground\_Curing\_Process\_wiki



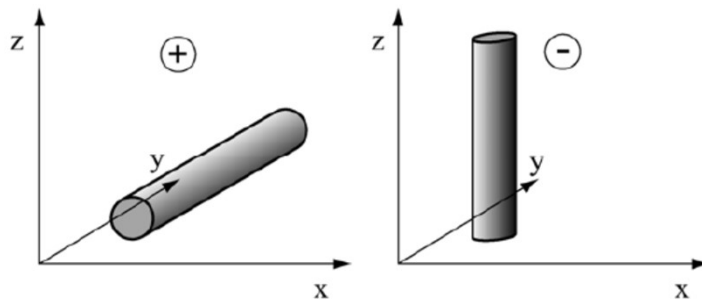
Блок-шема комплетног процеса стереолитографије



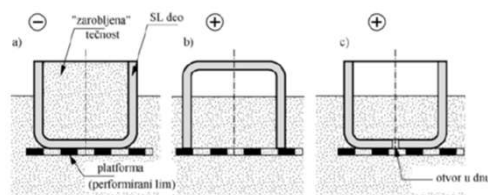
## A – Preprocesiranje

To je faza u kojoj se odvija sledeće:

- Kreiranje CAD modela. Ovaj model može se generisati na više načina: postupkom Reverse Engineeringa, direktnim CAD postupkom, koristeći neki od postojećih softvera (Catia, ProEng,...). Pored toga mogu se koristiti i matematički podaci, medicinski ili podaci o poprečnim presecima (više o tome u poglavlju 8). Objekat o kome je reč mora biti reprezentovan zatvorenim površinama. Podaci o modelu treba da specifikuju unutrašnje i spoljašnje površine kao i granice modela. Na taj način se obezbeđuje da su svi horizontalni preseki prikazani zatvorenim krivim linijama.
- Aproksimacija CAD modela u model čija je spoljna površina u obliku diskretne mreže trouglova. CAD datoteka (na primer tipa \*.prt (ProENGINEER)) pretvara se u \*.stl datoteku (Stereolithography file). Za to se koristi specijalni softver ili poseban CAD interfejs. Generisanje \*.stl datoteke se naziva tesaliranje ili facetiranje. Tako generisana datoteka se zatim verifikuje.
- Obrada \*.stl pomoću specijalnog softvera.

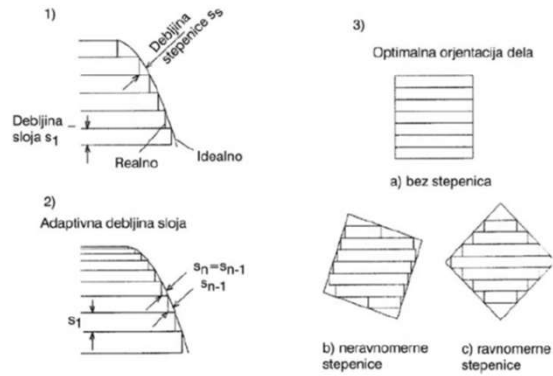


25



Sl. 3.8. »Zarobljena« tečnost (zatvorene zapremine)

26



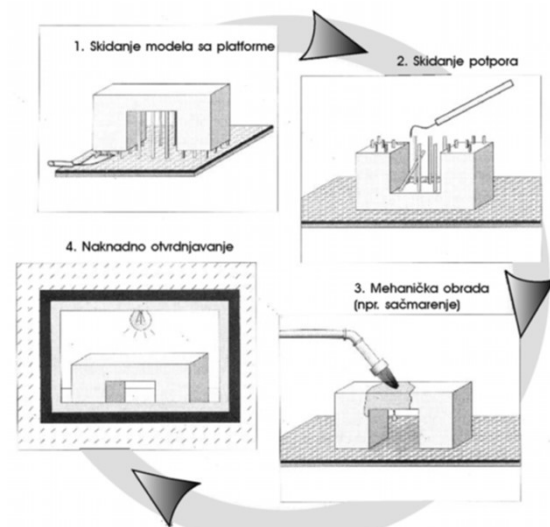
Sl. 3.9. Stepeničastost modela

### Постпроцесирање

Стереолитографском полимеризацијом модел не очврсне стопостотно. Дефинитивну чврстоћу модел добија тек у тзв. фази постпроцесирања.

Фаза постпроцесирања обухвата следеће (сл.3.16):

- скидање објекта са платформе
- чишћење објекта
- накнадно очвршћавање објекта
- завршну обраду објекта, са скидањем потпора



## Reference

1. Gibson I, Rosen W.D, Stucker B, Additive Manufacturing Technologies - Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, 2010.;
2. Gebhardt A, Heotter J.S, Additive Manufacturing, 3D Printing for Prototyping and Manufacturing, Hanser Gardner Publications, 2016.;
3. Godec D, Šercer M, Aditivna Proizvodnja, Fakultet Strojarsva i Brodogradnje, Zagreb, 2015.
4. Lužanin O, 3D Štampa, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2019.
5. Plančak M, Brza Izrada Prototipova Modela i Alata, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2014.
6. Stritesky O, Prusa J, Bach M, Basics of 3D Printing with Josef Prusa, Prusa REsearch, Prague 2019.;