

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 таложе.

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.

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.

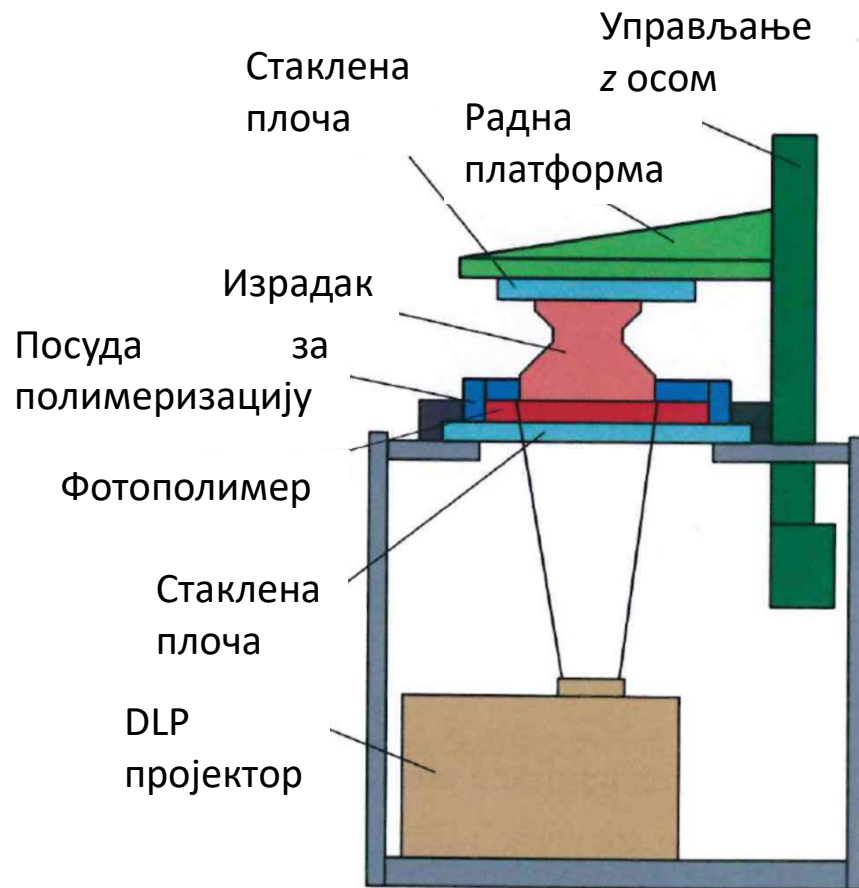
КАТЕГОРИЈЕ ПРОЦЕСА

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.

11. ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈА У КАДИ (Vat photopolymerization) / Perfactory/Direct Light Processing (DLP)

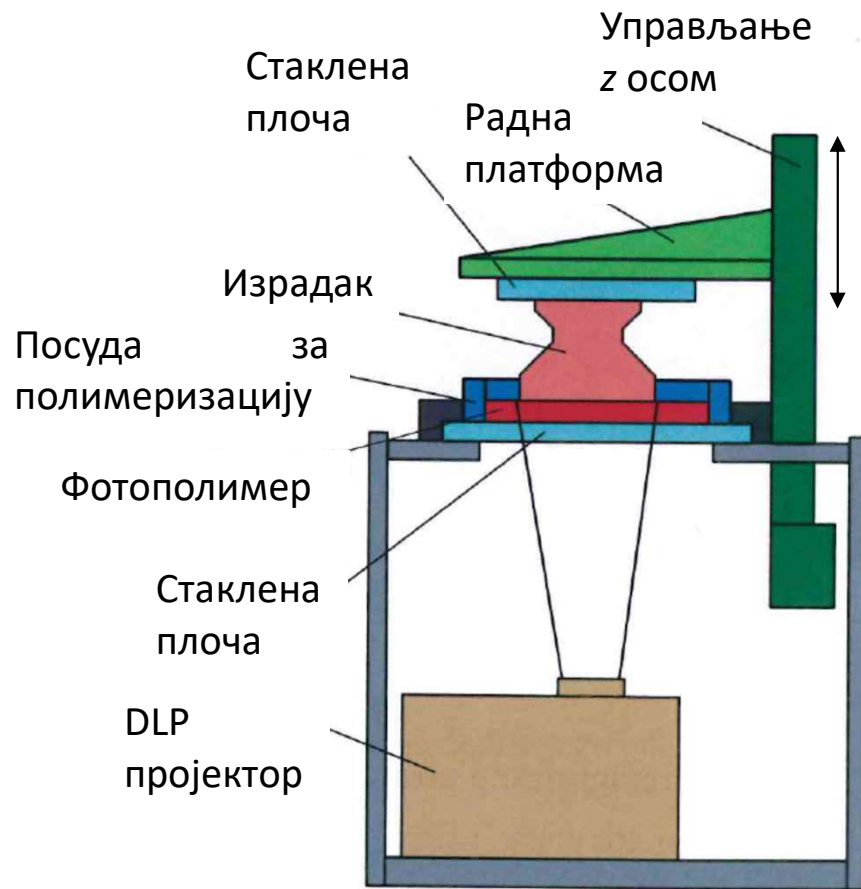


Процес очвршћавања фотополимера остварује се помоћу такозваног DLP пројектора који пројектује UV светлост на радну површину.

Фотомаска слике слоја формира се унутар пројектора, и може се разликовати између слојева. Фотомаска пропушта светлост на тачно дефинисаним местима, чиме се постиже контролисано очвршћавање фотополимера.

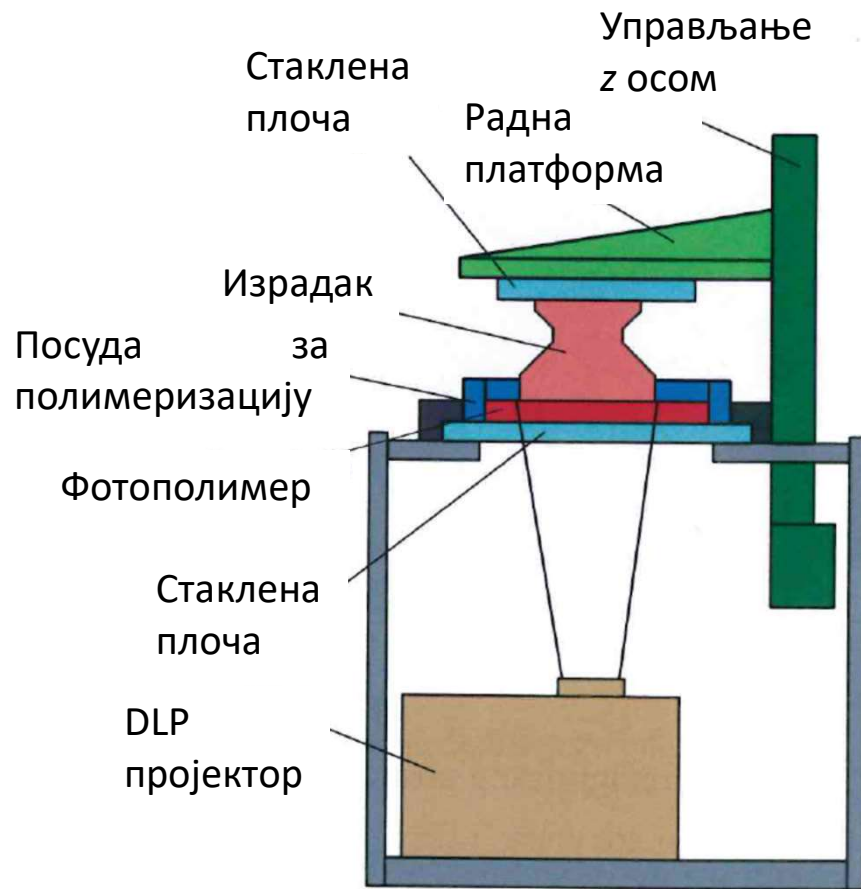
Очвршћавање читавог слоја се одвија симултано.

11. ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈА У КАДИ (Vat photopolymerization) / Perfactory/Direct Light Processing (DLP)

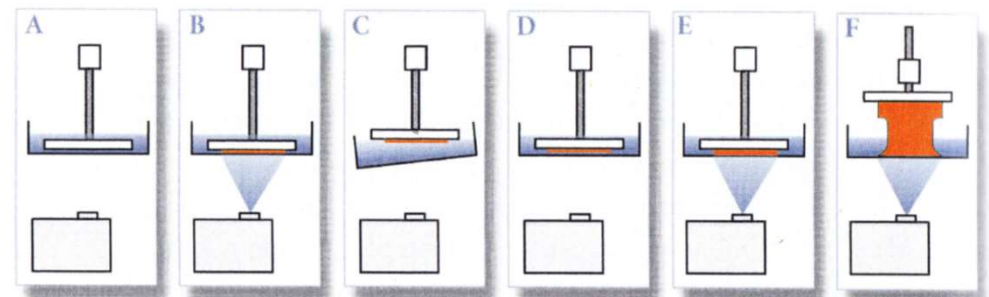


Радна подлога се састоји од две брушене стаклене плоче. Горња је повезана са осом z, и на њој се врши формирање првог слоја обратка, док доња има улогу данца посуде за фотополимеризацију.

11. ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈА У КАДИ (Vat photopolymerization) / Perfactory/Direct Light Processing (DLP)

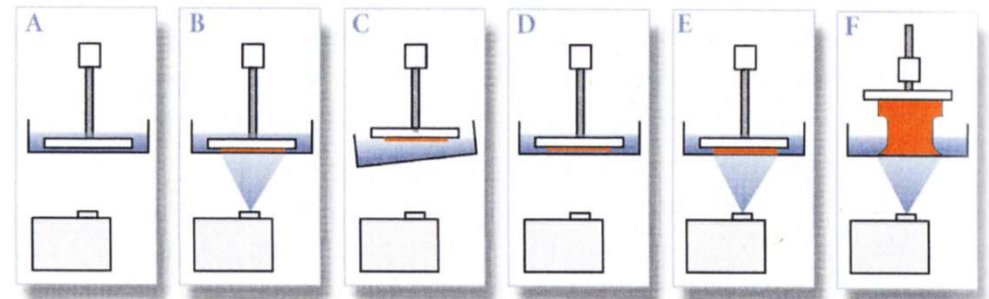
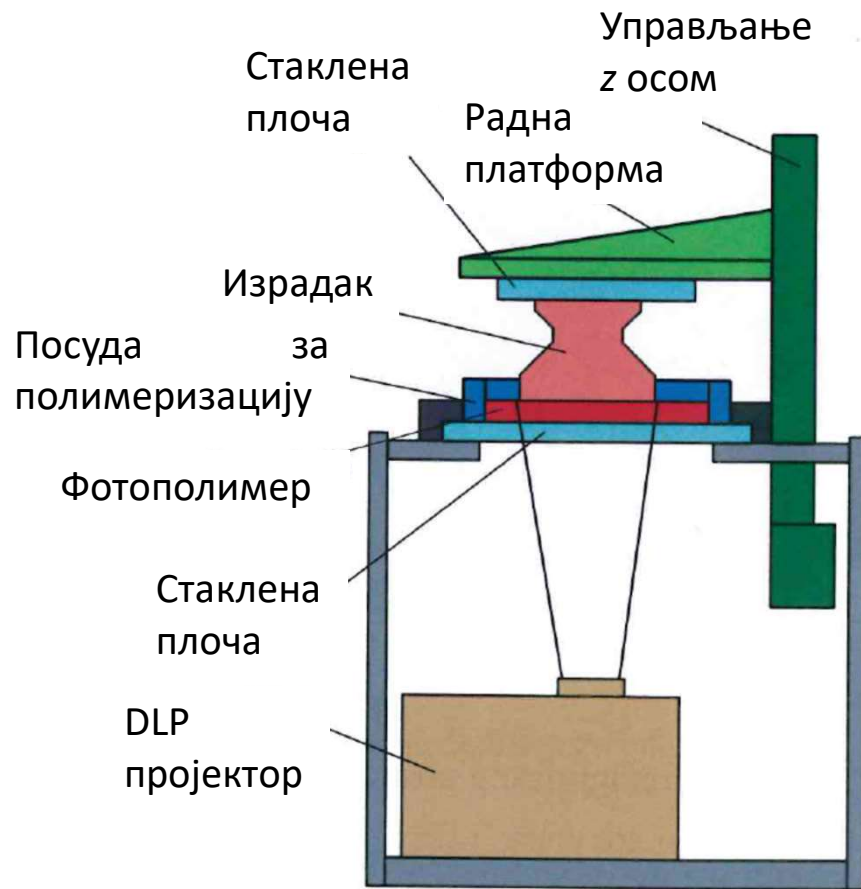


Истискивањем вишка фотополимера, слој жељене дебљина остаје између плоча. Под дејством UV зрачења, иницијални слој се горњом својом страном повезује са горњом стакленом површином. Доња страна иницијалног слоја такође се повезује са доњом плочом. Међутим, уз помоћ вакуумског дифузора и софистицираног механизма за савијање плоче и искретање, у одређеном тренутку слој се одваја од доње стаклене плоче.

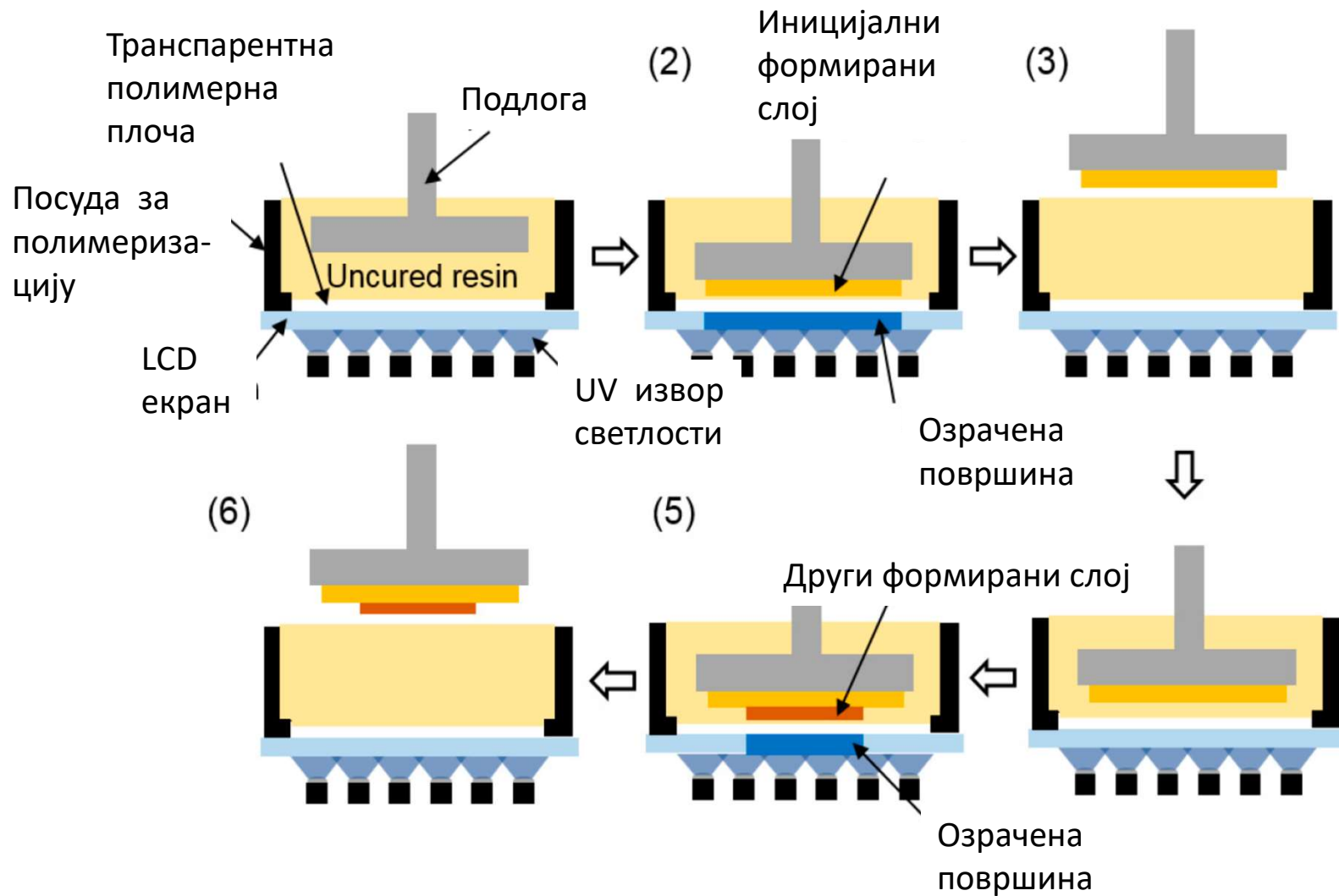


11. ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈА У КАДИ (Vat photopolymerization) / Perfactory/Direct Light Processing (DLP)

Подизањем горње стаклене плоче уз помоћ платформе на оси z, омогућава се продирање новог слоја фотополимера, након чега се процес понавља. Дебљине слојева могу ићи од 0,02 mm.



12. ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈА У КАДИ (Vat photopolymerization) / mSLA ("Masked SLA")



13. ИНТЕРАКЦИЈА ИЗМЕЂУ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА И ФОТОПОЛИМЕРА У ПРОЦЕСУ ОЧВРШЋАВАЊА

Енергија фотона коју обезбеђује UV ласер, као спољашњи извор зрачења, покреће ланчану реакцију у виду фотополимеризације. Са становишта интеракције ласер/фотополимер, два параметра имају кључан утицај на квалитет процеса очвршћавања:

- Дубина продирања (D_p);
- Критична актиничка експозиција (E_c).

14. ИНТЕРАКЦИЈА ИЗМЕЂУ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА И ФОТОПОЛИМЕРА У ПРОЦЕСУ ОЧВРШЋАВАЊА

Дубина продирања и критична експозиција

За актинички ласерски сноп који се праволинијски креће по слободној површини течног фотополимера, константном брзином v_s , важе следеће три полазне хипотезе:

- Апсорпција актиничног ласерског зрачења у фотополимеру одвија се на основу *Ламбер-Беровог* закона;
- Расподела укупне снаге електромагнетног зрачења по јединици површине, $H [W/m^2]$, одвија се по *Гаусовој* расподели;
- Прелазак фотополимера из течног у чврсто стање одвија се у транзиционој тачки.

На основу *Ламбер-Беровог* закона, укупна снага ЕМ зрачења слаби са порастом дубине, тј. са порастом удаљености од слободне површине фотополимера, мерено у правцу z осе. На основу тога следи:

$$H(x, y, z) = H(x, y, 0) \cdot e^{-z/D_p} ,$$

14. ИНТЕРАКЦИЈА ИЗМЕЂУ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА И ФОТОПОЛИМЕРА У ПРОЦЕСУ ОЧВРШЋАВАЊА

Дубина продирања и критична експозиција

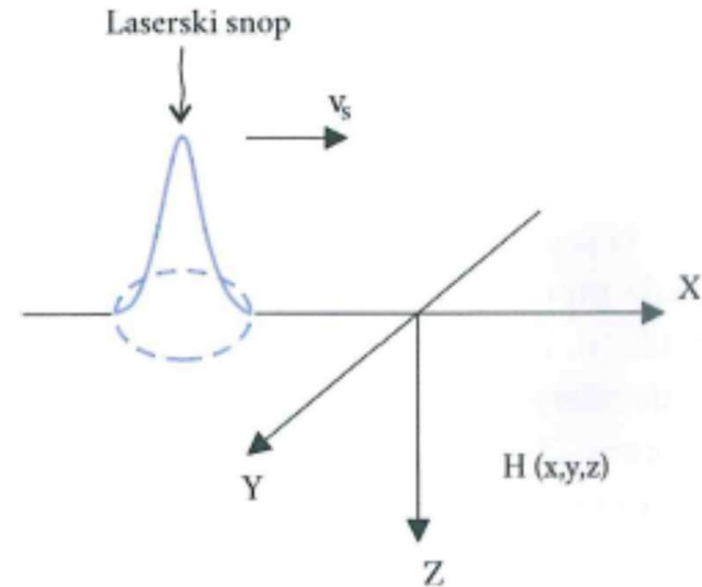
$$H(x, y, z) = H(x, y, 0) \cdot e^{-z/D_p},$$

где је :

$H(x, y, z)$ – укупна снага ЕМ зрачења свих таласних дужина у произвољној тачки;

$H(x, y, 0)$ – укупна снага ЕМ зрачења на слободној површини течнок фотополимера ($z=0$);

D_p – дубина продирања – карактеристика фотополимера при датој таласној дужини ласерског зрачења, која се дефинише као дубина на којој је укупна снага упадног зрачења сведена на $1/e$ (37%) од снаге на површини, тј. износи $H=0,37H_0$.



14. ИНТЕРАКЦИЈА ИЗМЕЂУ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА И ФОТОПОЛИМЕРА У ПРОЦЕСУ ОЧВРШЋАВАЊА

Критична експозиција

У судару ласерског зрака и слободне површине фотополимера долази до очвршћавања мале запремине фотополимера, која се може идеализовано представити у облику параболоида, који се још назива и воксел (voxel). Поред тога, што течни фотополимер апсорбује енергију упадног ласерског зрачења према *Бер-Ламбертовом* експоненцијалном закону, квалитет фотополимеризације зависи и од броја актичних фотона који су апсорбовани по јединици запремине. Ова величина је директно пропорционална актиничној експозицији, која се изражава ка енергија по јединици површине, E [mJ/cm²]. Уколико у изразу за укупну снагу ЕМ зрачења, H заменимо са E , добија се:

$$E(z) = E_0 \cdot e^{-z/D_p},$$

при чему је:



z – растојање од слободне површине течног фотополимера до посматране тачке;

E_0 – актинична експозиција на слободној површини течног фотополимера [mJ/cm²];

$E(z)$ – актинична експозиција на растојању z од слободне површине;

D_p – дубина продирања – дефинише се као дубина, мерена од слободне површине течног фотополимера, до оне тачке у којој актинична експозиција ослаби на вредност од приближно $(1/e) E_0$.

14. ИНТЕРАКЦИЈА ИЗМЕЂУ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА И ФОТОПОЛИМЕРА У ПРОЦЕСУ ОЧВРШЋАВАЊА

Критична експозиција

С обзиром да, на основу израза за $E(z)$, актинична експозиција ласерског зрачења слаби са повећањем дубине течног фотополимера, фотополимеризација ће се одвијати само до оне дубине на којој је још увек обезбеђена критична вредност E_c . На овај начин се дефинише максимална дубина очвршћавања, C_d , испод које, због недовољне актиничне експозиције више не долази до очвршћавања течног фотополимера. На основу овога, E_c се може дефинисати као:

$$E_c = E_{max} \cdot e^{-C_d/D_p} ,$$

одакле следи израз за максималну дубину очвршћавања:

$$C_d = D_p \cdot \ln \frac{E_{max}}{E_c} .$$



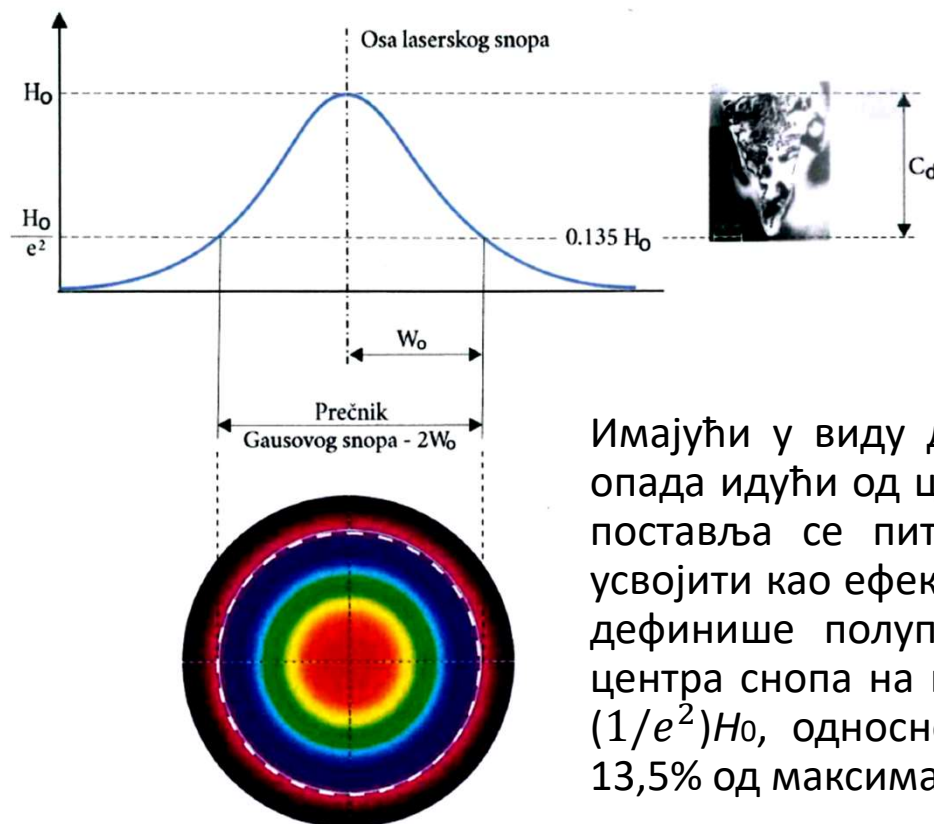
E_{max} се може изразити преко средње снаге ласера (P_L), брзине скенирања, тј. кретања ласерског зрака по површини фотополимера (v_s) и ширине ласерског снопа/полупречника Гаусовог снопа (W_0):

$$E_{max} = \frac{P_L}{v_s W_0}$$

15. ИНТЕРАКЦИЈА ИЗМЕЂУ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА И ФОТОПОЛИМЕРА У ПРОЦЕСУ ОЧВРШЋАВАЊА

Полупречник Гаусовог снопа

С обзиром на чињеницу да ласерска тачка на слободној површини фотополимера нема апсолутно оштру контуру, већ је дифузна, ефективни пречник/полупречник ласерског снопа може бити процењен на различите начине.



На слици је шематски приказана расподела густине снаге [W/mm^2] Гаусовог ласерског снопа. Прстенаста поља у бојама представљају зоне са различитим густинама снаге ласера, док бела, испрекидана кружница означава измерени Гаусов пречник.

Имајући у виду да укупна густина снаге ЕМ зрачења постепено опада идући од центра, тј. од осе ласерског снопа, ка периферији, поставља се питање који полупречник ласерског снопа треба усвојити као ефикасан, тј. технички употребљив. Из тог разлога се дефинише полупречник Гаусовог снопа (W_0) као удаљење од центра снопа на које је укупна густина снаге ЕМ зрачења једнака $(1/e^2)H_0$, односно, удаљење на које је вредност H сведена на 13,5% од максималне вредности енергије зрачења.

16. ИНТЕРАКЦИЈА ИЗМЕЂУ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА И ФОТОПОЛИМЕРА У ПРОЦЕСУ ОЧВРШЋАВАЊА

Минимална очврсла запремина и радна крива фотополимера

На основу израза за E_{\max} може се констатовати:

- да је максимална актинична експозиција (E_{\max}) пропорционална средњој снази ласерског снопа P_L .
- Да је E_{\max} обрнуто пропорционална производу полупречника Гаусовог ласерског снопа и брзине скенирања, тј. брзине кретања ласера.

Даље следи да се израз за максималну дубину очвршћавања може записати као:

$$C_d = D_p \cdot \ln\left(\frac{P_L}{v_s W_0 E_c}\right)$$

С обзиром да се P_L и W_0 као карактеристика машине, и E_c и D_p као карактеристика фотополимера могу сматрати константним, следи да се дубином очвршћавања (C_d) за дату формулацију фотополимера може управљати на основу промене брзине ласерског скенирања (v_s).

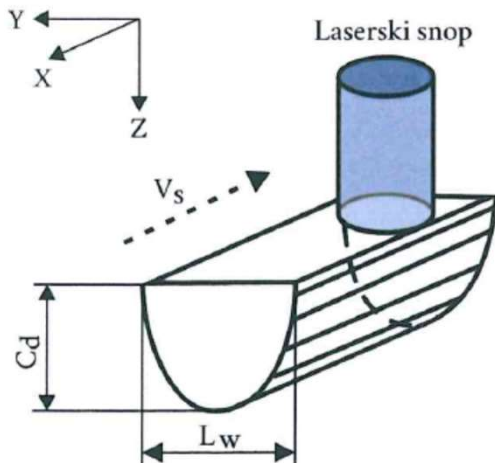
16. ИНТЕРАКЦИЈА ИЗМЕЂУ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА И ФОТОПОЛИМЕРА У ПРОЦЕСУ ОЧВРШЋАВАЊА

Минимална очврсла запремина и радна крива фотополимера

Када у процесу ласерског скенирања описани воксели очвршћавају тако да дође до њиховог делимичног преклапања, добија се очврсла стаза, која се у стереолитографији назива **стринг**. Ширина овакве стазе, L_w , може се израчунати на основу:

$$L_w = W_0 \sqrt{\frac{2C_d}{D_p}}$$

- Ширина очврслог слоја (L_w) директно је пропорционална полупречнику Гаусовог снопа (W_0) на слободној површини фотополимера;
- Ширина L_w такође је директно пропорционална квадратном корену количника дубине очвршћавања (C_d) и дубине продирања (D_p), из чега следи да стрингови који имају већу дубину, морају имати и већу ширину (L_w), која, међутим, не расте линеарно са порастом дубине;
- Чак и када се вредност W_0 и C_d одржавају на константним вредностима, ширина очврслог стринга (L_w) зависи од дубине продирања (D_p) која је карактеристика фотополимера. Самим тим, о овоме потребно је водити рачуна при увођењу новог типа фотополимера у процес производње.



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 таложе.

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.

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.

КАТЕГОРИЈЕ ПРОЦЕСА

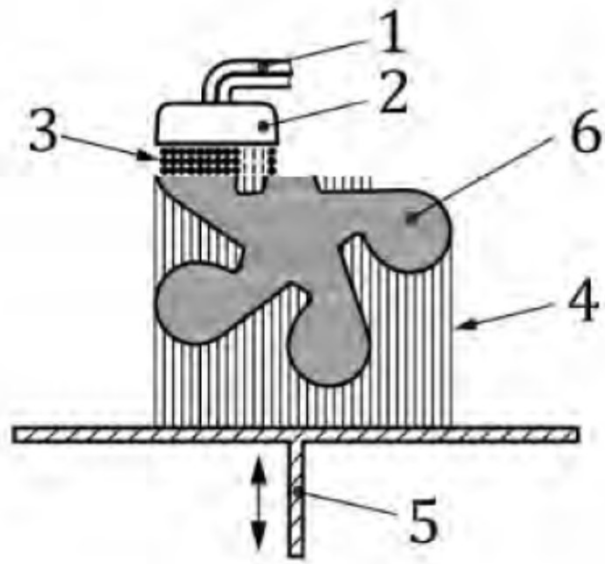
5. **Екструдирање материјала (Material extrusion) / Fused Deposition Modeling (FDM); Contour Crafting**
 - процес АП током којег се материјал селективно дозира кроз млазницу или отвор.

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.

17. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting)

Дефиниција према ISO 17296-1 гласи да је директна 3D штампа / бризгање материјала (Material jetting) процес АП током којег се капљице градивног материјала (фотополимер или восак) селективно таложе.



1. Систем за довод градивног и помоћног (потпорног) материјала (опционо у зависности од одређеног процеса),
2. Системи за наношење (светло ЕМ зрачења или извор топлоте),
3. Капљице градивног (потпорног) материјала,
4. Потпора,
5. Подлога са системом за дефинисање корака,
6. Обрадак.

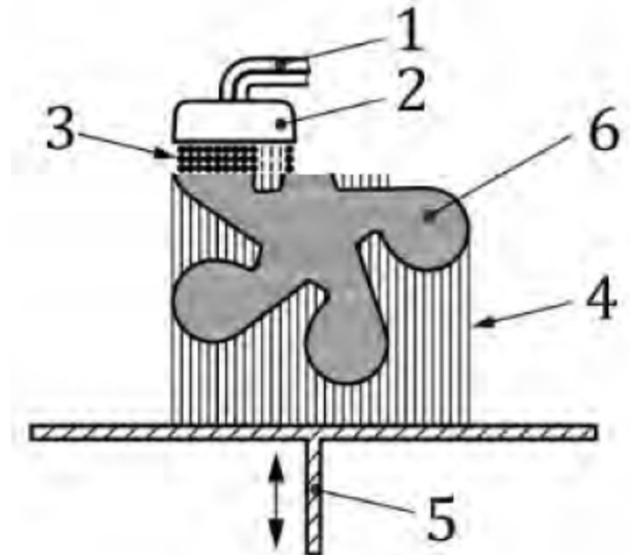
17. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting)

Полазни материјал: течни фотополимер или растопљени восак, са или без адитива.

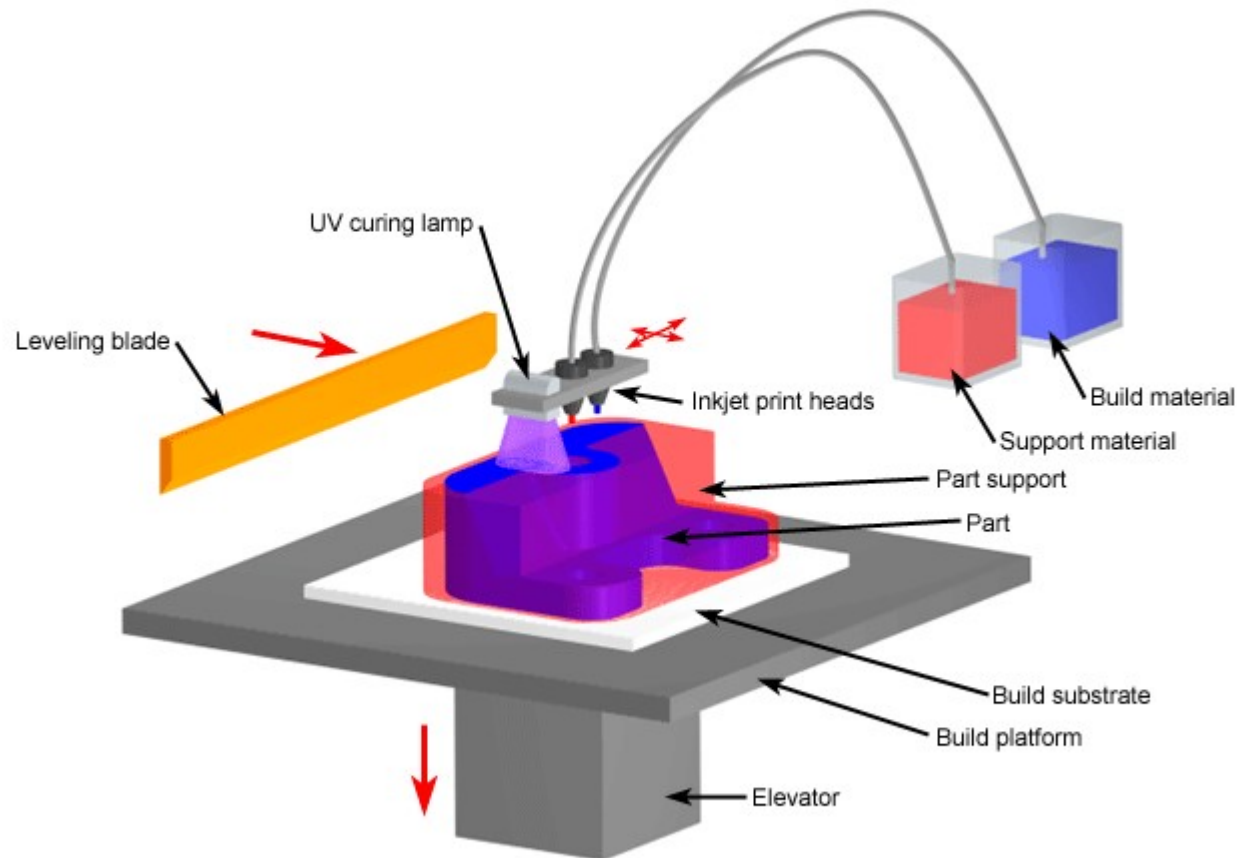
Механизам везивања: **везивање хемијским реакцијама** или **адхезија очвршћавањем** растопљеног материјала.

Извор активације: извор светлосног зрачења за везивање хемијским реакцијама.

Накнадна обрада: уклањање потпорног материјала, накнадно очвршћавање даљим излагањем зрачењу.

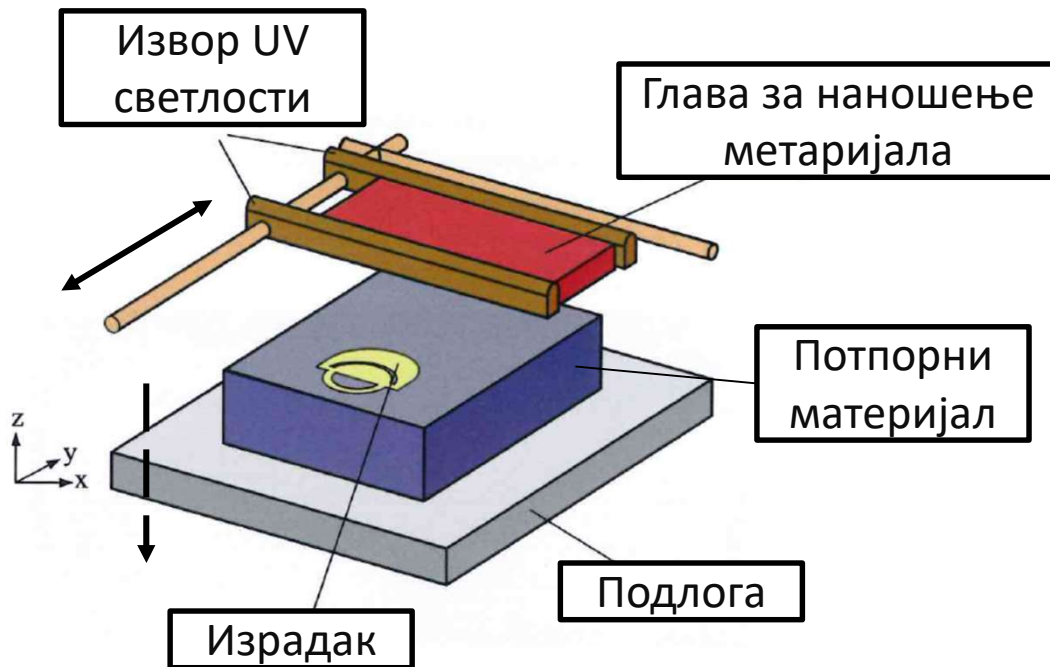


18. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting) / Polyjet - Multyjet



Copyright © 2008 CustomPartNet

18. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting) / Polyjet

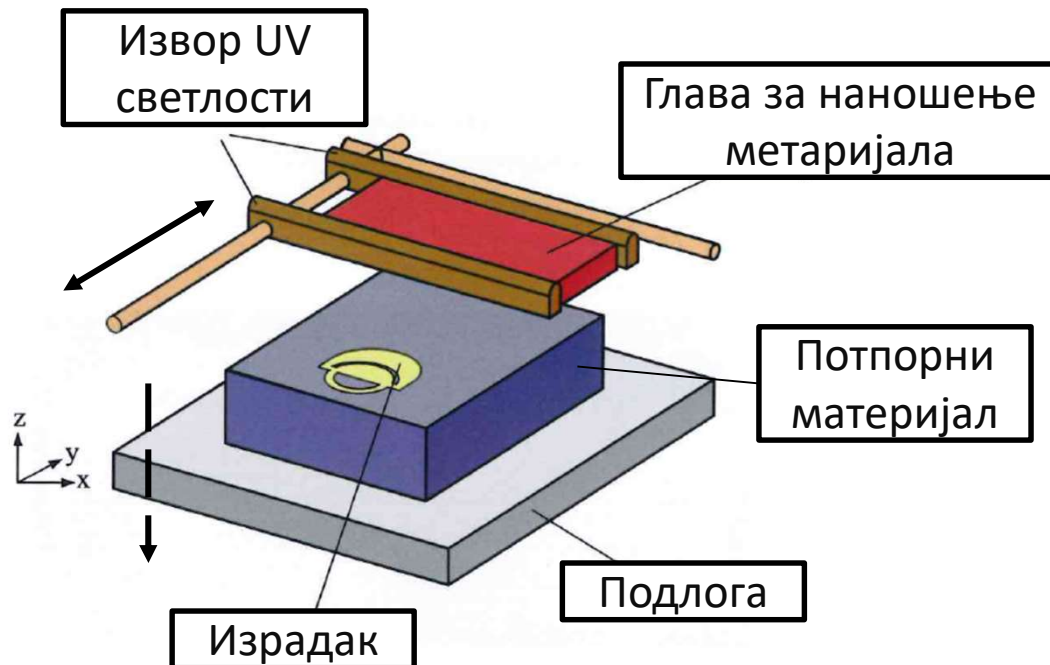


Наношење слоја фото осетљивог полимерног материјала врши се уз помоћ специјалне главе која у себи садржи мрежу млазница кроз које се врши довод материјала.

Поред основног градивног материјала, кроз главу се моће доводити и потпорни материјал.

Нанети слој материјала очвршћава уз помоћ UV светлости.

18. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting) / Polyjet

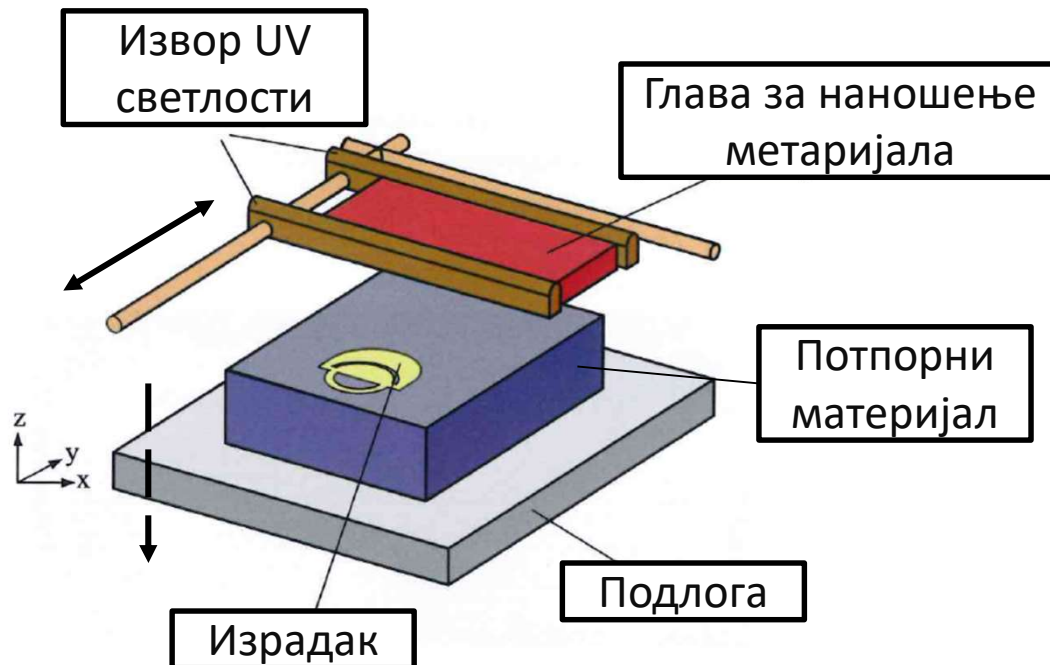


Главна предност у односу на ласерско очвршћавање код SLA поступка огледа се у томе што код Polyjet поступка читав слој очвршћава истовремено, а не селективно.

Пре сваког почетка формирања новог слоја, подлога у односу на главу за nanoшење заузима нову висину које је у функцији дебљине слоја.

Сваки претходни слој бива потпуно очврснут пре почетка nanoшења новог слоја.

18. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting) / Polyjet

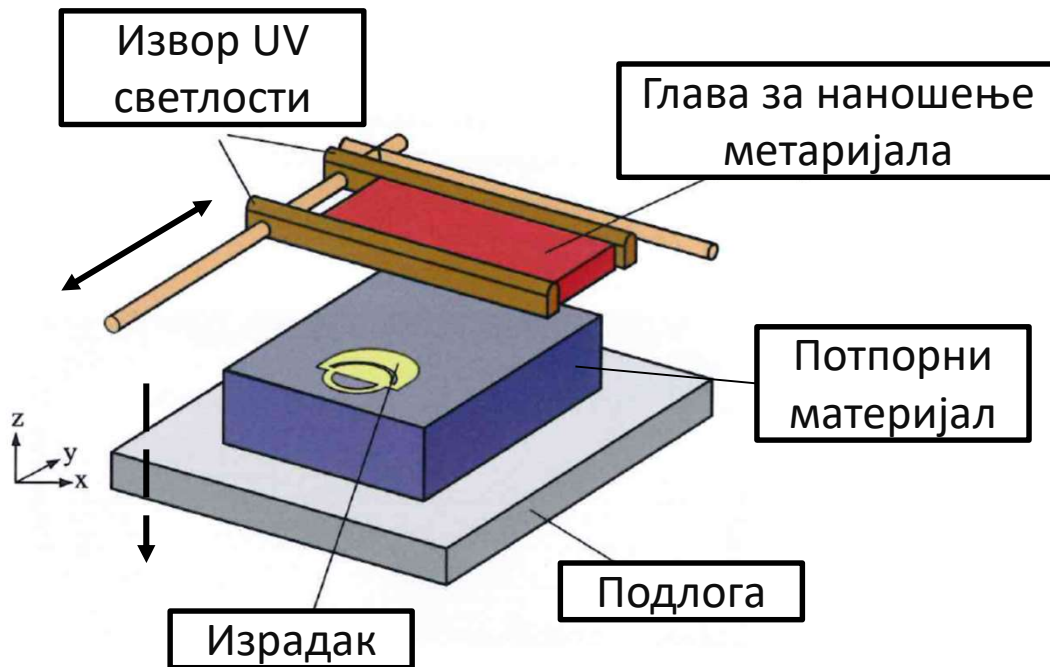


Polyjet поступак карактерише висока тачност, потребе за накнадном обрадом су веома мале.

Накнадно очвршћавање изратка под извором UV светлости или сазревање топлотним третирањем није неопходно.

Дебљина слојева креће се од 16 μm , док нове генерације уређаја имају могућност израде дела састављеног од више различитих типова материјала, па чак и мешање материјала по жељеној рецептури.

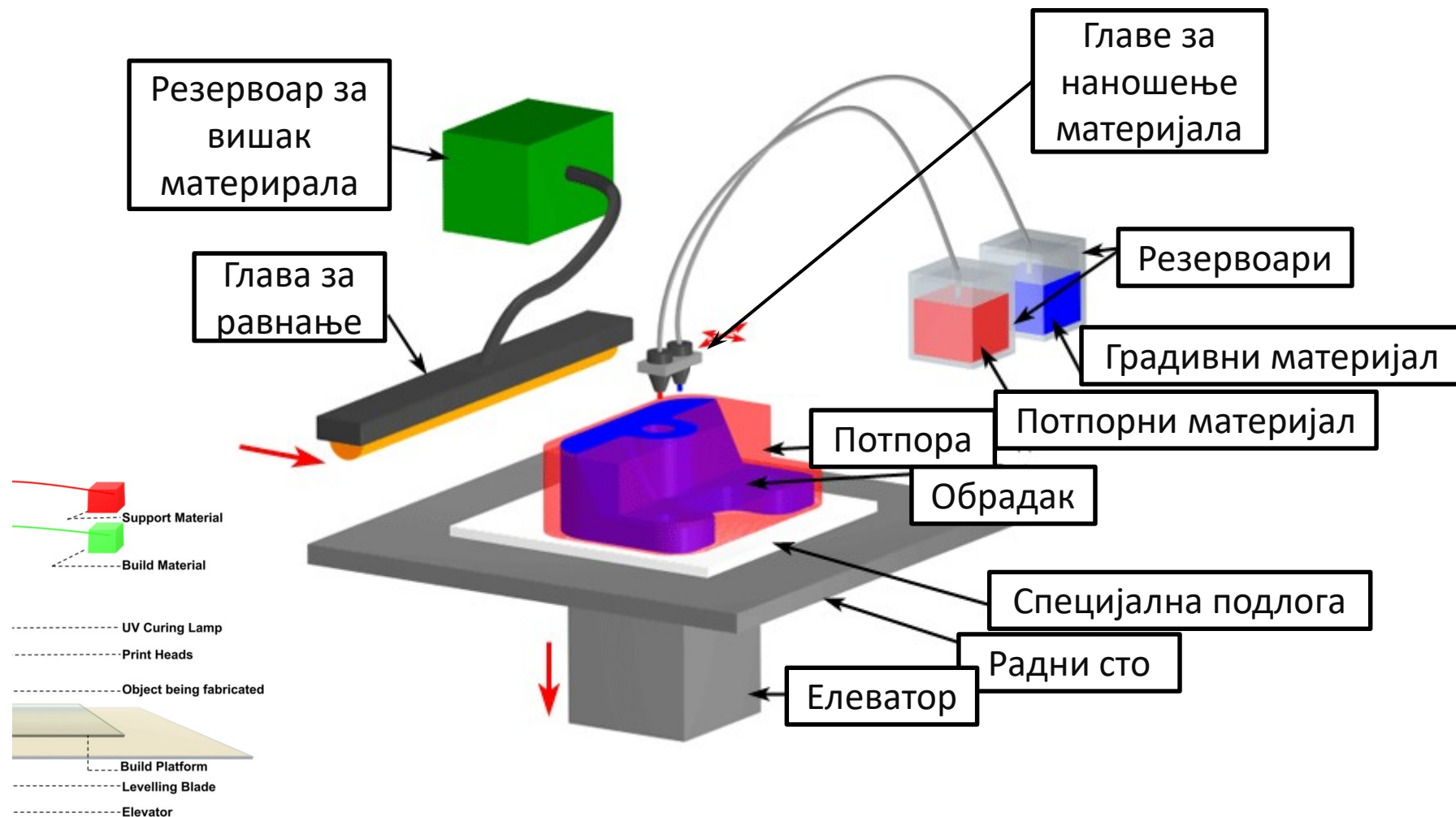
18. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting) / Polyjet



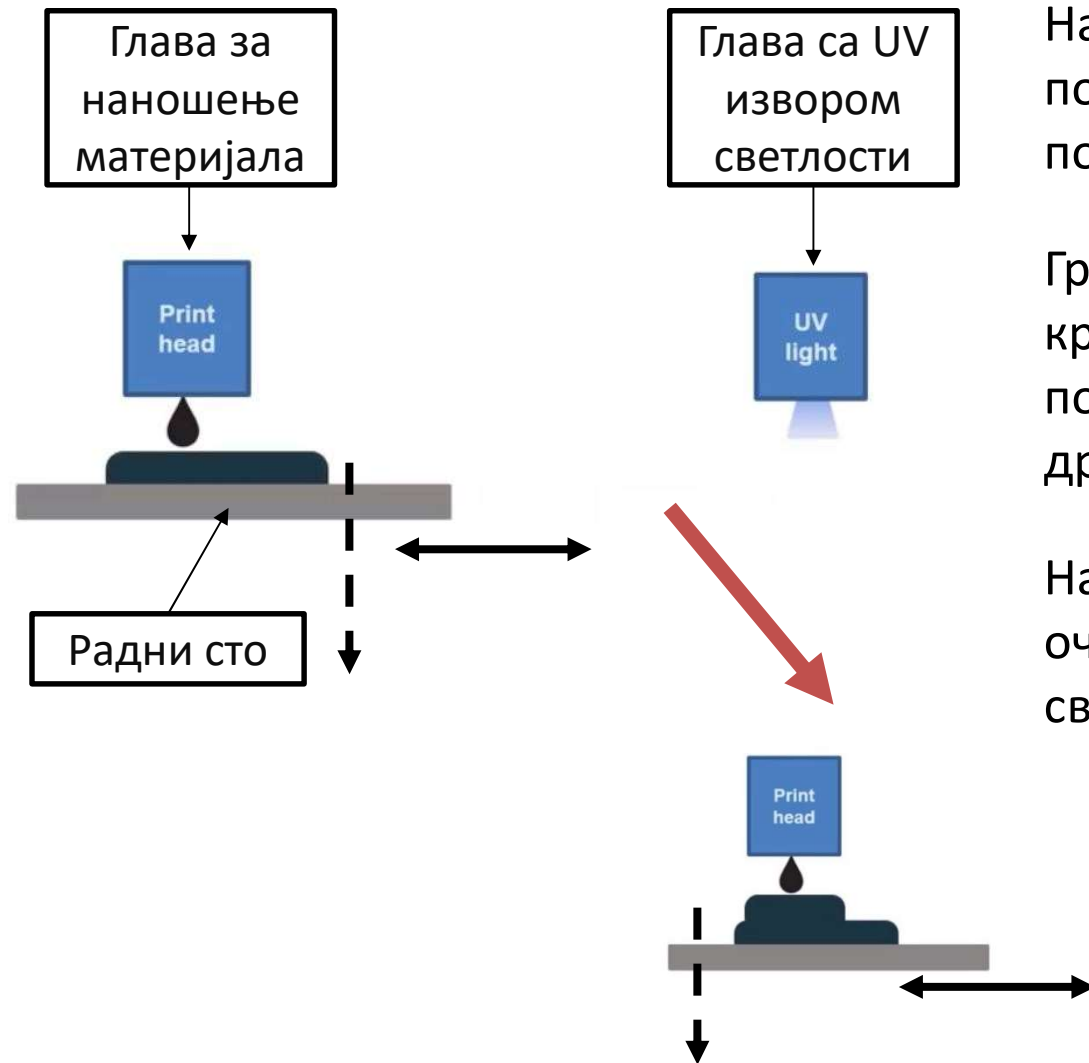
Велику примену имају при изради делова чија се својства материјала изједначавају са композитним.

Поред наведеног, велику примену имају и код израде елемената алата за ињекционо бризгање пластике.

19. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting) / Inkjet Printing



19. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting) / Inkjet Printing

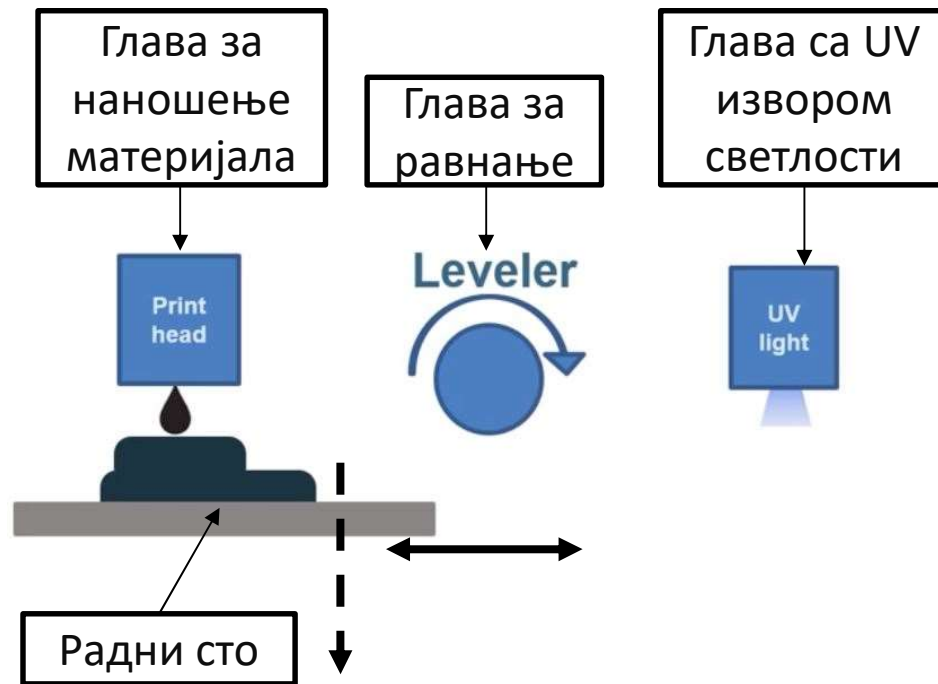


Наношење слоја фотоосетљивог полимерног у виду капљица уз помоћ специјалне главе.

Градивни материјал се доводи кроз једну млазницу, док се потпорни материјал доводи кроз другу.

Нанети слој материјала очвршћава уз помоћ UV светлости.

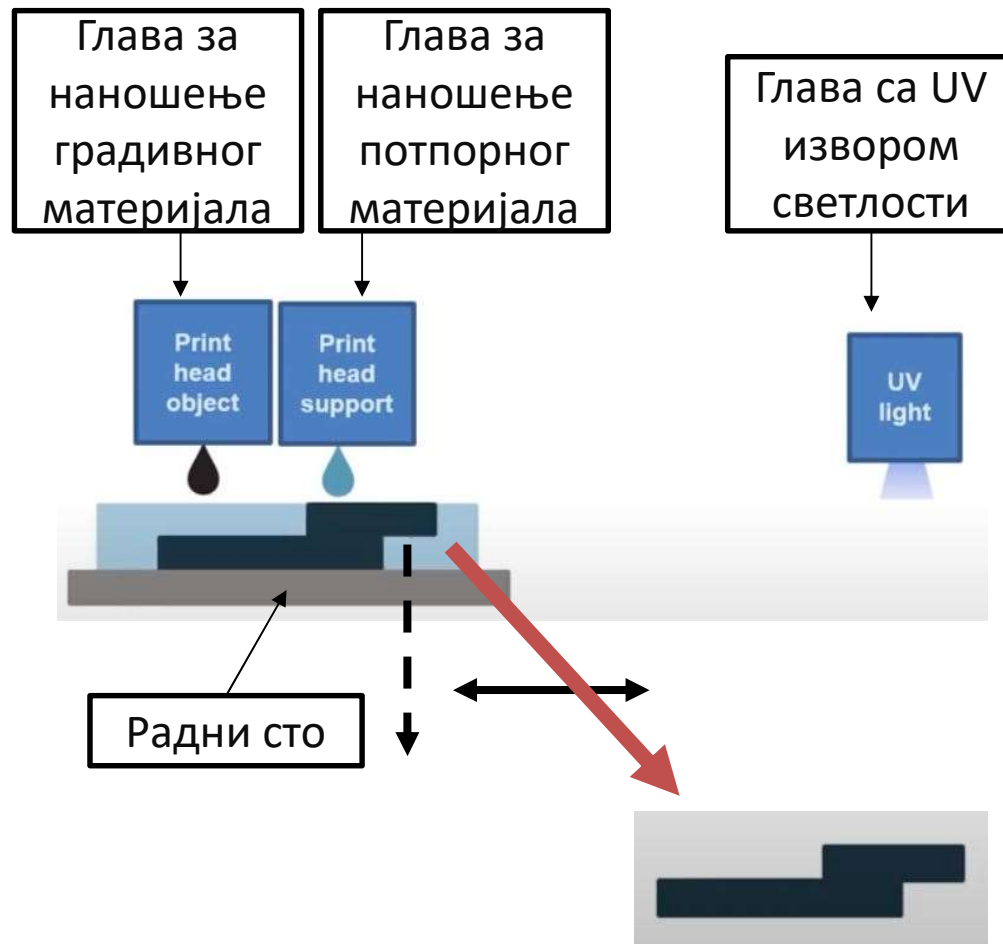
19. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting) / Inkjet Printing



Како би се избегли мањи дефекти на површини материјала у виду деформација, као и да би се остварила оптимална равност површине за наношење наредног слоја, неопходно је коришћење главе за равнање.

Равнање слоја се врши пре његовог очвршћавања.

19. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting) / Inkjet Printing

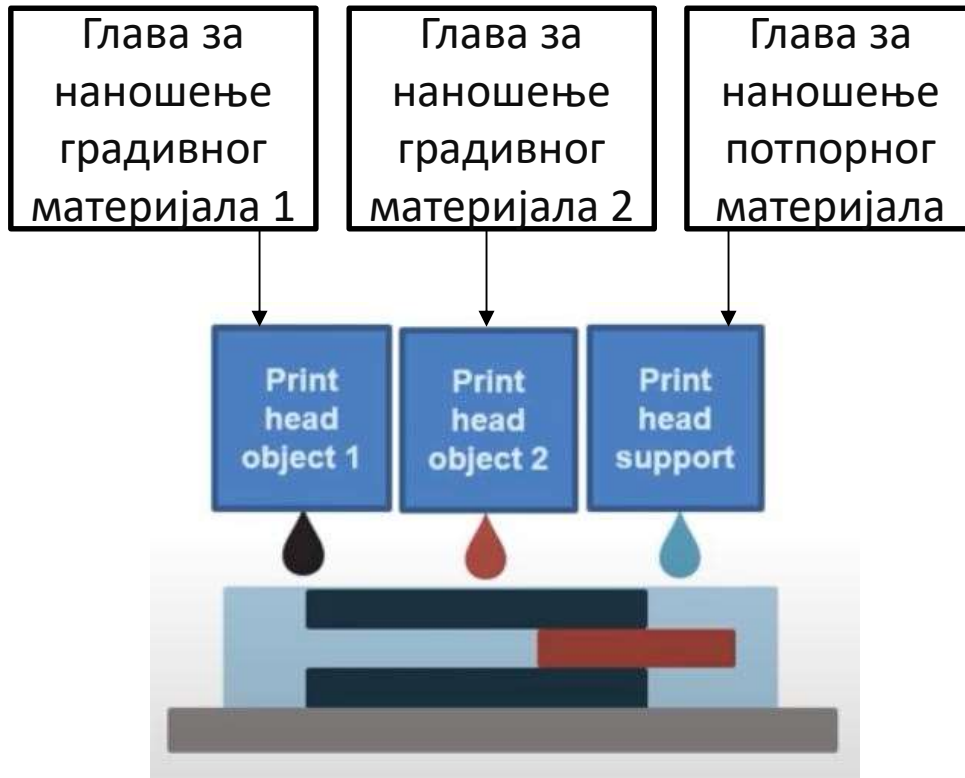


Градивни и потпорни материјал се наносе симултано кроз две одвојене млазнице. Као и наношење, очвршћавање уз помоћ UV светлости се одвија симултано.

Коришћењем потпорног материјала омогућава се формирање делова комплексног облика и оштријих ивица.

Након израде дела, потпорни материјал се уклања или физичким путем или се врши његово растварање у води.

19. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting) / Inkjet Printing



У зависности од потреба, могуће је користити и више различитих материјала. Додавањем новог додатног материјала захтева нову млазницу за довод истог.

Предност је добијање делова састављених од више различитих типова материјала.

19. ДИРЕКТНА 3D ШТАМПА/БРИЗГАЊЕ МАТЕРИЈАЛА (Material jetting) / Inkjet Printing

Предности:

- Велика резолуција,
- Једина метода адитивних технологија којом је могуће добити функционалне прозрочне делове без потребе за накнадном обрадом (сочива),
- Коришћење широког спектра материјала,
- Релативно висока продуктивност.



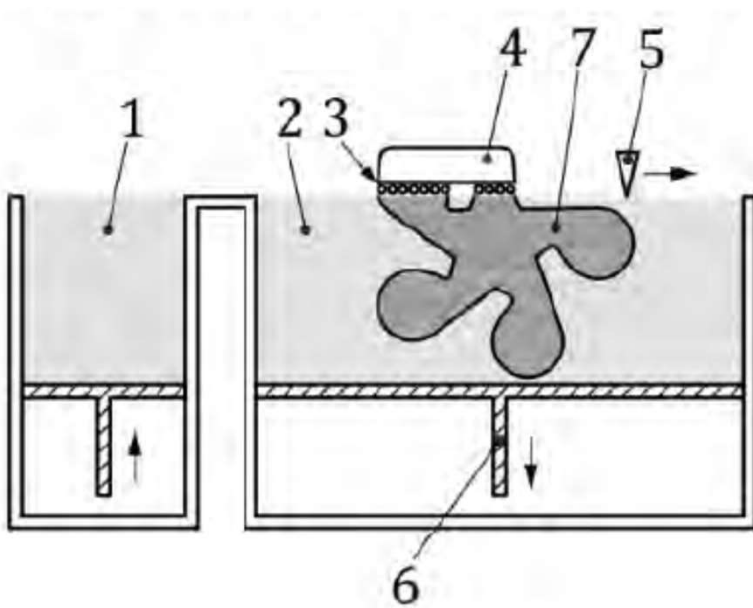
Ограничења:

Вискозност полимера отежава наношење слоја.

Највећа примена је код Брзе израде готових делова (*Rapid Manufacturing*), а не код Брзе израде прототипова (*Rapid Prototyping*).

20. ВЕЗИВНА 3D ШТАМПА / БРИЗГАЊЕ ВЕЗИВА (Binder jetting)

Дефиниција према ISO 17296-1 гласи да је везивна 3D штампа (Binder jetting) процес АП током којег се течно везивно средство селективно наноси ради спајања прашкастог материјала.



1. Систем додавања праха,
2. Материјал у виду праха распоређен на подлогу (радни сто),
3. Капљице везивног средства,
4. Системи за наношење укључујући и везу са системом за довод везивног средства,
5. Систем за равномерно распоређивање праха,
6. Подлога са елеватором,
7. Обрадак.

20. БРИЗГАЊЕ ВЕЗИВА / ВЕЗИВНА 3D ШТАМПА (Binder jetting)

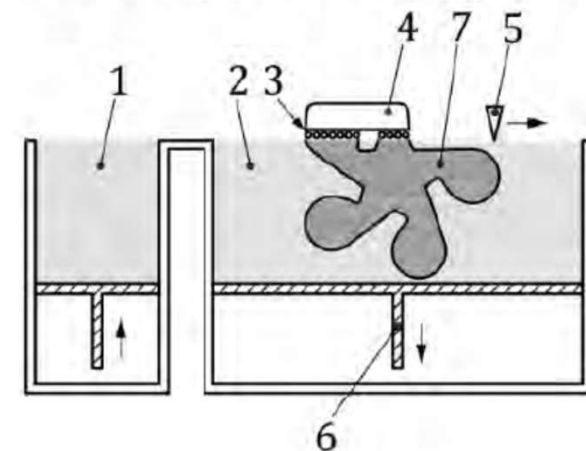
Полазни материјал: широк спектар материјала у виду праха, мешавине праха или крупнијих зрна материјала, као и течни лепак / везивно средство.

Механизам везивања: везивање хемијским и/или термичким реакцијама.

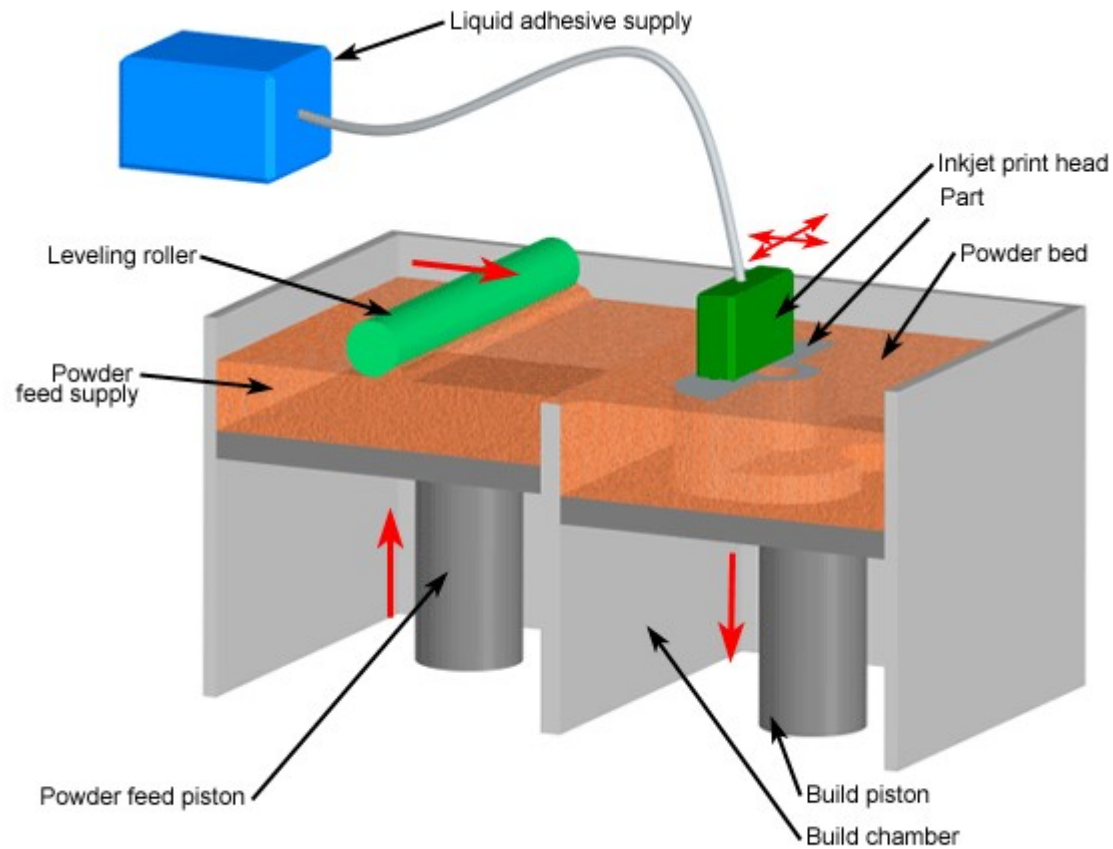
Извор активације: у зависности од везивног средства: хемијска реакција.

Накнадна обрада: уклањање растреситог/слободног праха, импрегнација или инфилтрација одговарајућег течног материјала у зависности од материјала праха и предвиђене примене.

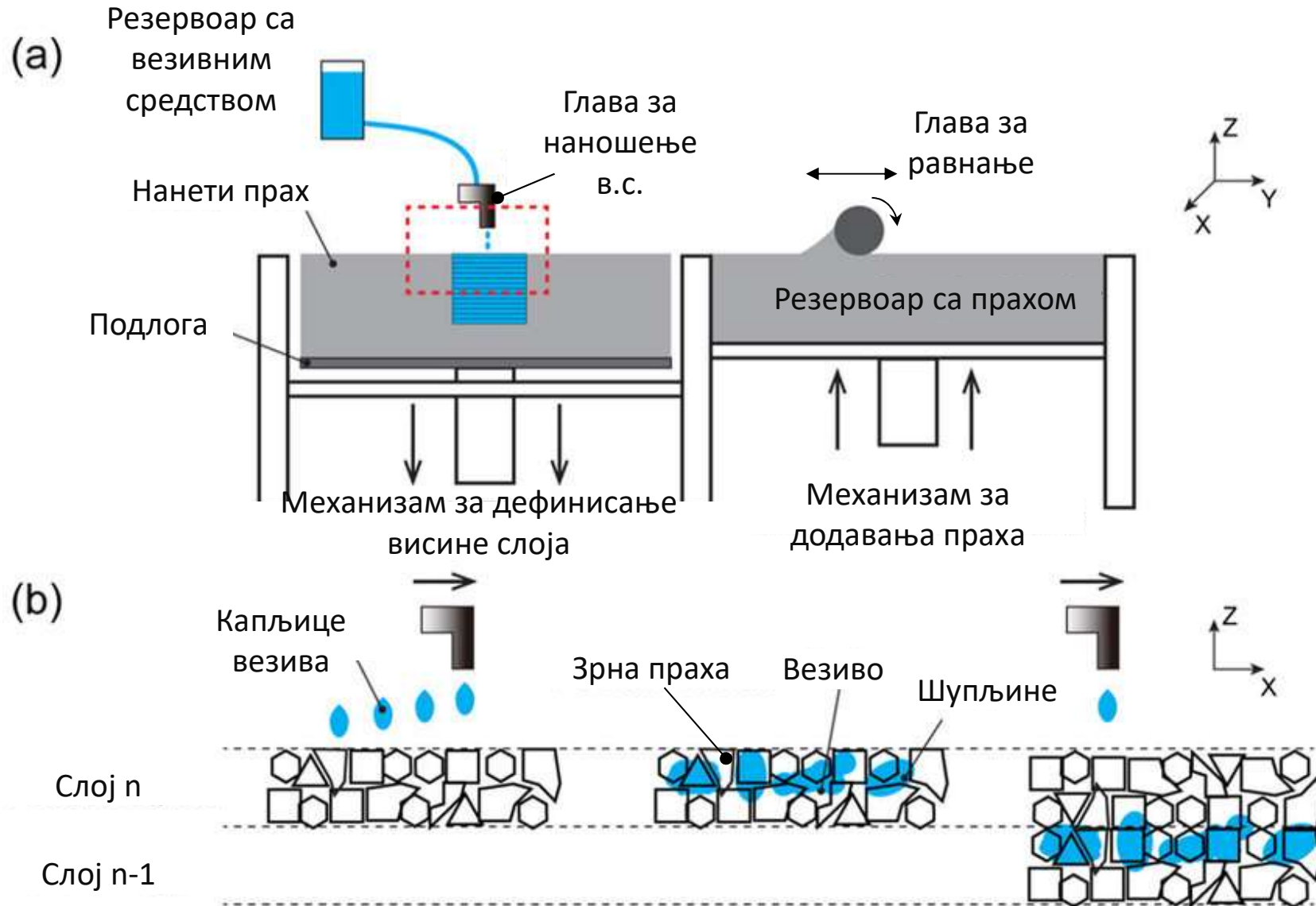
Напомена: воскови, епоксиди и друга лепкови користе се за полимерне материјале, док се метали и керамика обично учвршћују/везују синтеровањем и инфилтрацијом растопљеног материјала.



21. ВЕЗИВНА 3D ШТАМПА / БРИЗГАЊЕ ВЕЗИВА (Binder jetting) / Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)

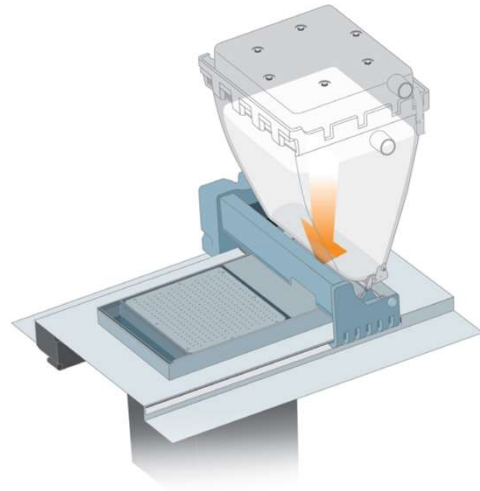


21. ВЕЗИВНА 3D ШТАМПА / БРИЗГАЊЕ ВЕЗИВА (Binder jetting) / Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)

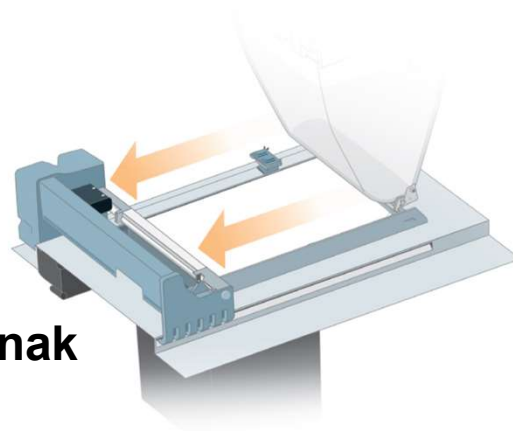


ZPrinter inkjet tehnologija

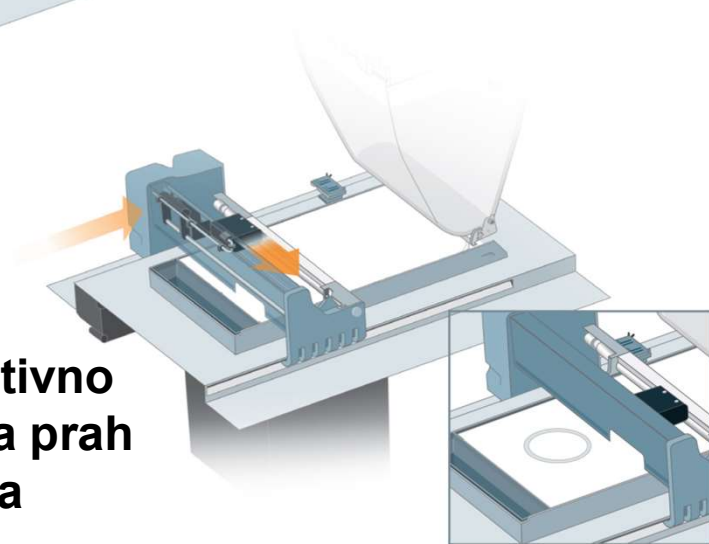
Kako funkcioniše



**Komora sa prahom
ispunjava volumen**



**Nanosi se tanak
sloj praha**



**Print-glave selektivno
nanose vezivo na prah
radi očvršćavanja**

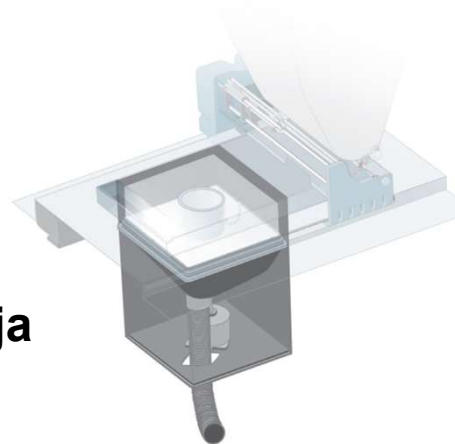
ZPrinter inkjet tehnologija

Kako funkcioniše

Build komora se spušta radi pripreme za sledeći sloj



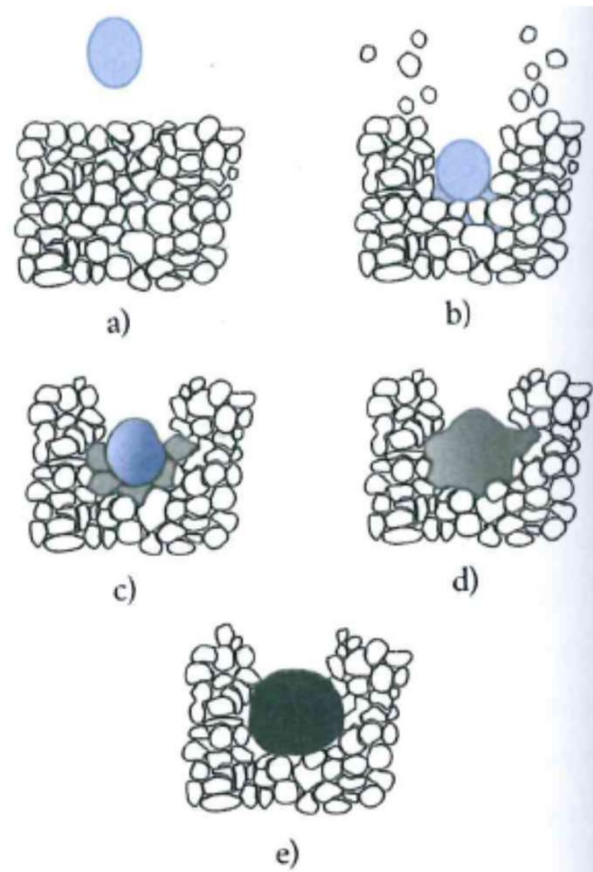
Proces se ponavlja



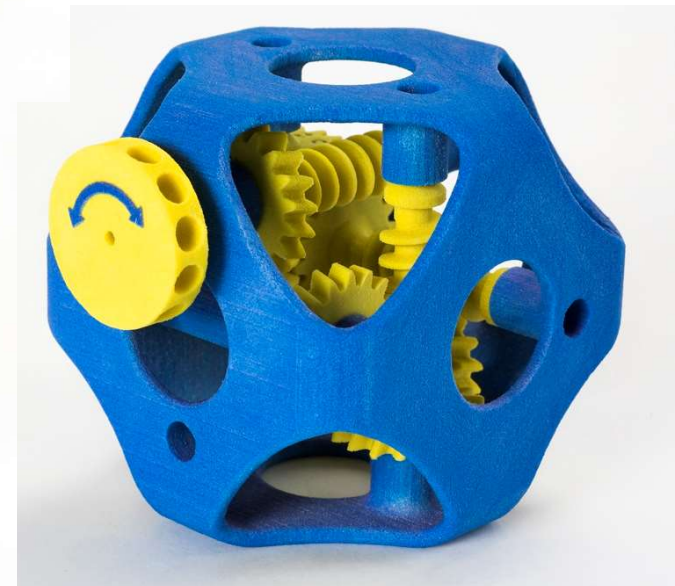
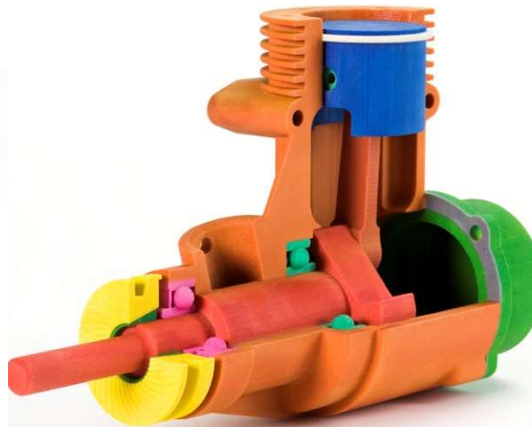
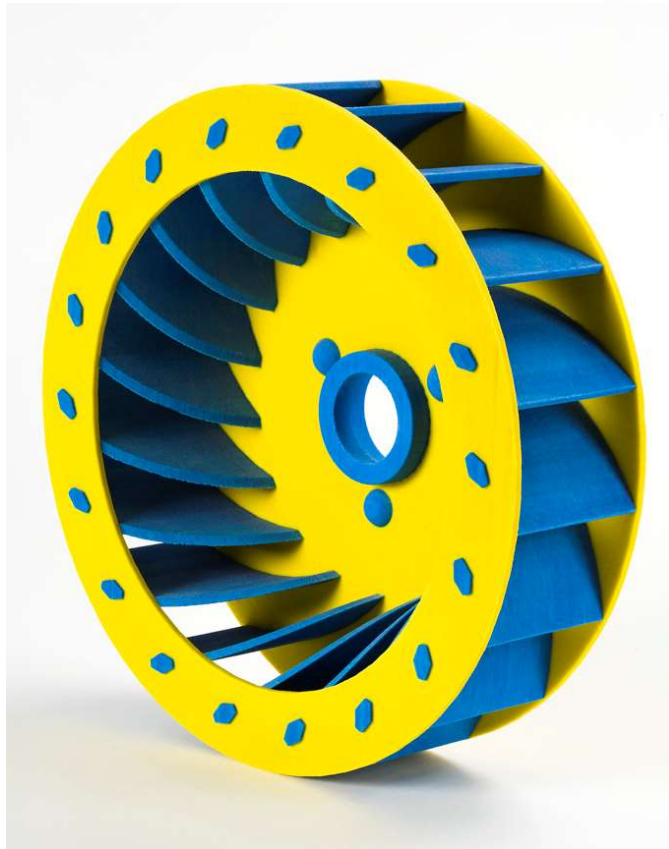
Build komora se prazni ostavljajući završen deo



Slika 8.6 Faze formiranja 3DP primitiva:
(a) kapljica vezivnog sredstva u slobodnom padu,
(b) balistički udar, (c) migracija i rearanžiranje čestica, usled dejstva kapilarnog efekta, (d) ukrupnjavanje aglomerata, (e) finalni oblik aglomerata koji približno odgovara sferi.



Primeri izrađenih 3D modela (štampa u boji)



Reference

Gibson I, Rosen W.D, Stucker B, Additive Manufacturing Technologies - Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, 2010.;

Gebhardt A, Heotter J.S, Additive Manufacturing, 3D Printing for Prototyping and Manufacturing, Hanser Gardner Publications, 2016.;

Godec D, Šercer M, Aditivna Proizvodnja, Fakultet Strojarsva i Brodogradnje, Zagreb, 2015.

Lužanin O, 3D Štampa, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2019.

Stritesky O, Prusa J, Bach M, Basics of 3D Printing with Josef Prusa, Prusa REsearch, Prague 2019.;

Plančak M, Brza Izrada Prototipova Modela i Alata, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2014.