

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.

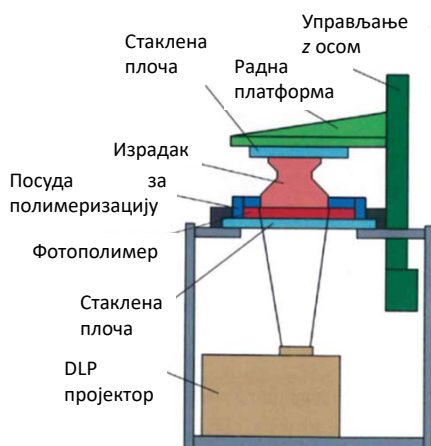
6. Депоновање применом усмерене енергије (Directed energy deposition) / Laser Engineered Net Shaping (LENS); Electronic Beam Welding (EBW)

- 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.

12a. ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈА У КАДИ (Vat photopolymerization) / [Perfactory/Direct Light Processing \(DLP\)](#)

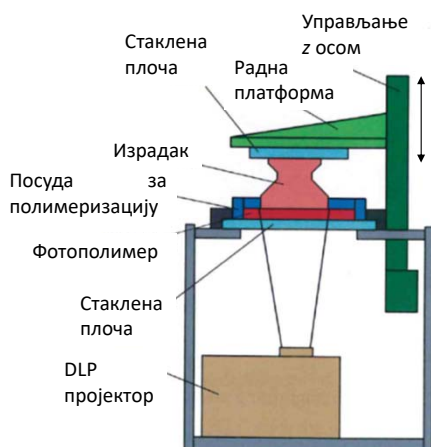


Процес очвршћавања фотополимера остварује се помоћу такозваног DLP пројектора који пројектује UV светлост на радну површину.

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.

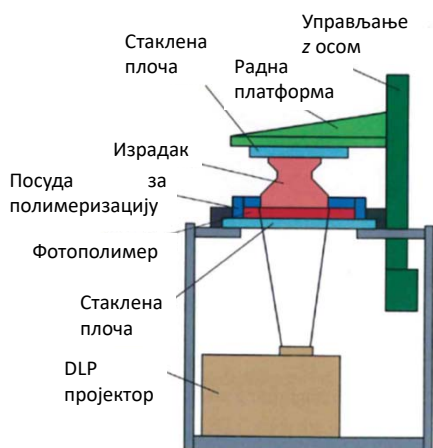
Очвршћавање читавог слоја се одвија симултано.

12a. ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈА У КАДИ (Vat photopolymerization) / [Perfactory/Direct Light Processing \(DLP\)](#)

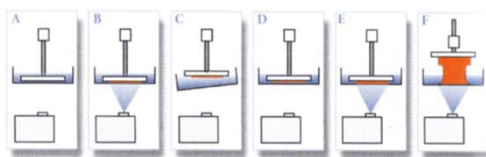


Радна подлога се састоји од две брушене стаклене плоче. Горња је повезана са осом z, и на њој се врши формирање првог слоја обратка, док доња има улогу данца посуде за фотополимеризацију.

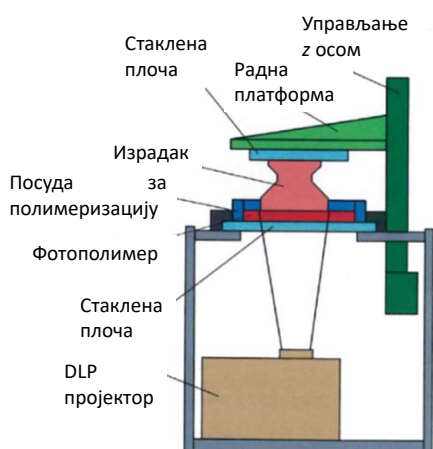
12a. ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈА У КАДИ (Vat photopolymerization) / [Perfactory/Direct Light Processing \(DLP\)](#)



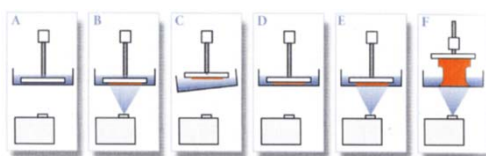
Истискивањем вишка фотополимера, слој жељене дебљина остаје између плоча. Под дејством UV зрачења, иницијални слој се горњом својом страном повезује са горњом стакленом површином. Доња страна иницијалног слоја такође се повезује са доњом плочом. Међутим, уз помоћ вакуумског дифузора и софистицираног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



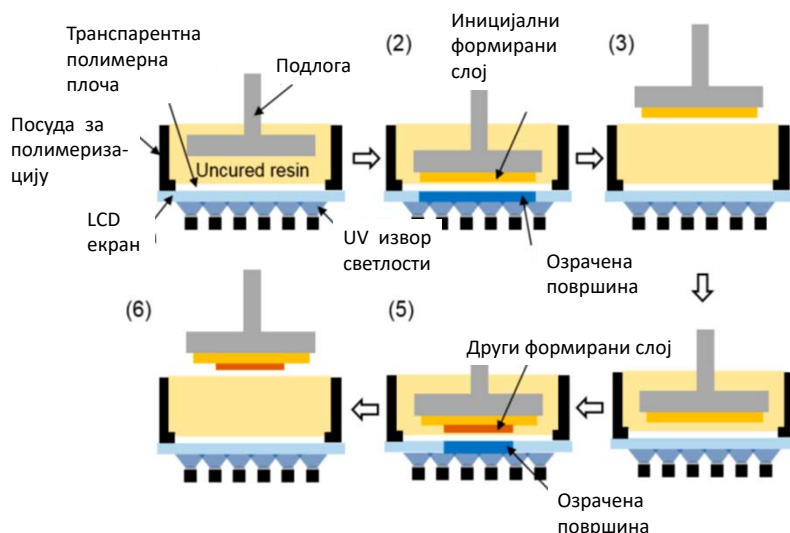
12a. ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЈА У КАДИ (Vat photopolymerization) / [Perfactory/Direct Light Processing \(DLP\)](#)



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.



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



13. Фотополимеризација у кади - 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. Фотополимеризација у кади -

Дубина продирања и критична експозиција

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

- Апсорпција активничног 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. Фотополимеризација у кади -

Дубина продирања

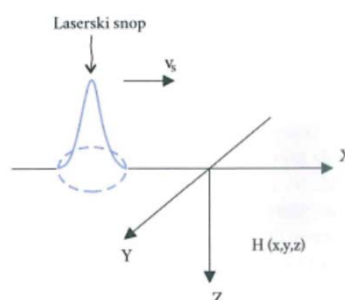
$$H(x, y, z) = H(x, y, 0) \cdot e^{-z/D_p},$$

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 течног 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. Фотополимеризација у кади -

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 активних фотона који су апсорбовани по јединици запремине. Ова величина је директно пропорционална активничној 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 – активнична експозиција на слободној површини течног фотополимера [mJ/cm²];

$E(z)$ – активнична 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 активнична експозиција ослаби на вредност од приближно $(1/e) E_0$.



14. Фотополимеризација у кади -

Критична експозиција

С обзиром да, на основу израза за $E(z)$, активнична 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 активничне 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):

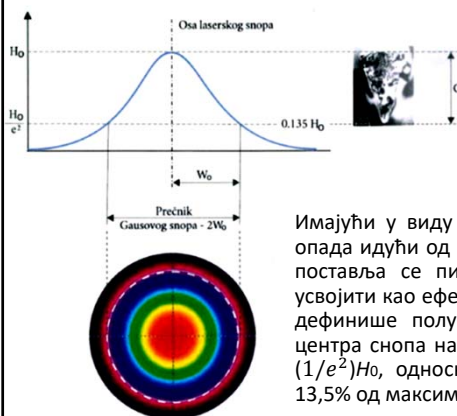
$$E_{max} = \frac{P_L}{v_s W_0}$$



15. Фотополимеризација у кади -

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 ефективан, 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 $(1/e^2)I_0$, односно, удаљење на које је вредност I сведена на 13,5% од максималне вредности енергије зрачења.

16. Фотополимеризација у кади -

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:

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

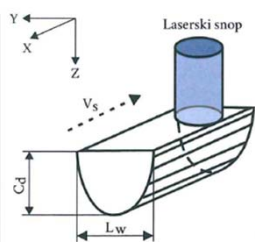
С обзиром да се P_L и W_0 као карактеристика машине, и E_c и D_p као карактеристика фотополимера могу сматрати константним, следи да се дубином очвршћавања (C_d) за дату формулацију фотополимера може управљати на основу промене брзине ласерског скенирања (v_s).

16. Фотополимеризација у кади -

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.

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.;