

КАТЕГОРИЈЕ ПРОЦЕСА

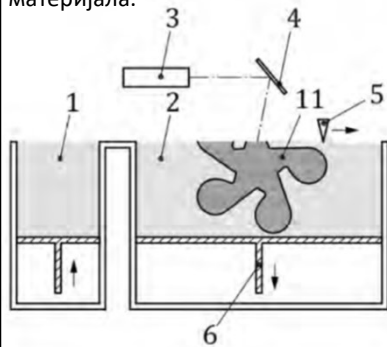
1. **Фотополимеризација у кади (Vat photopolymerization) / стереолитографија, Stereolithography (SLA)**
 - процес АП у коме се течни фотополимер у кадици селективно очвршћава светлосно активираним полимеризацијом.
2. **Директна 3D штампа / Бризгање материјала (Material jetting) / Polyjet; Inkjet Printing**
 - процес АП у коме се капљице материјала (фотополимер или восак) селективно таложе.
3. **Везивна 3D штампа / Бризгање везива (Binder jetting) / Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)**
 - процес АП у коме се течно везивно средство селективно наноси ради повезивања 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); Multi Jet Fusion (MJF)**
 - процес АП у коме се топлотном енергијом селективно топе и спајају прашкасти материјали на подлози

КАТЕГОРИЈЕ ПРОЦЕСА

5. **Екструдирање материјала (Material extrusion) / Fused Deposition Modeling (FDM); Contour Crafting**
 - процес АП у коме се материјал селективно дозира кроз млазницу или отвор
6. **Депонување применом усмерене енергије (Directed energy deposition) / Laser Engineered Net Shaping (LENS); Electronic Beam Welding (EBW)**
 - процес АП у коме се фокусирана топлотна енергија (ласер, сноп електрона, плазмин лук) користи за стапање топљењем материјала који се депонује.
7. **Ламинирање фолија (Sheet lamination) / Laminated Object Manufacturing (LOM)**
 - процес АП у коме се листови материјала спајају да би се оформио објекат.

22. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion)

Дефиниција према ISO 17296-1 гласи да је спајање прашкастог материјала (Powder bed fusion) поступак производних адитивних технологија у коме се помоћу топлотне енергије селективно спаја одређена запремина претходно нанетог прашкастог материјала.

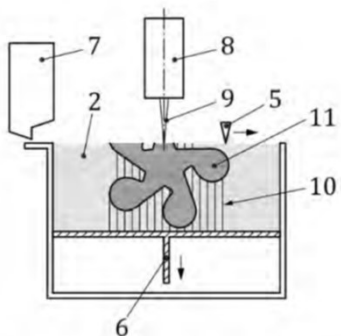


Спајање прашкастог материјала коришћењем ласерског зрака

1. Систем додавања праха (у неким случајевима као позиција 7),
2. Материјал у виду праха распоређен на подлогу (радни сто),
3. Ласер,
4. Нагнуто огледало са фокусом,
5. Систем за распоређивање праха,
6. Радни сто са елеватором,
11. Обрадак.

22. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion)

Дефиниција према ISO 17296-1 гласи да је спајање прашкастог материјала (Powder bed fusion) поступак производних адитивних технологија у коме се помоћу топлотне енергије селективно спаја одређена запремина претходно нанетог прашкастог материјала.



Спајање прашкастог материјала коришћењем снопа електрона

2. Материјал у виду праха распоређен на подлогу (радни сто),
5. Систем за распоређивање праха,
6. Радни сто са елеватором,
7. Посуда за прах,
8. Систем за сноп електрона,
9. Фокусирани сноп електрона,
10. Потпорни материјал,
11. Обрадак.

22. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion)

Потпора и додатна подлога обично су потребни за обраду металних материјала, док при обради полимерних материјала нису.

Материјал: разни прашкасти материјали: термопласти, чисти метали или легуре метала, структурна или индустријска керамика. Било који од прашкастих материјала може се користити са или без испуна и везива, у зависности од специфичног поступка.

Механизам спајања: везивање топлотном реакцијом.

Извор активације: топлотна енергија, чији је извор обично ласер, сноп електрона и/или инфрацрвене лампе.

Накнадна обрада: уклањање растреситог праха и, уколико је применљиво, потпорног материјала. Разне операције за побољшање квалитета храпавости добијених површина, тачности димензија и својстава материјала; на пример микро пескирање, завршно глодање, брушење, полирање и термичка обрада.

23. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion)

Основни принципи ласерског синтеровања

У кључне технолошке параметре ласерског синтеровања спадају:

- Снага ласера (P_L);
- Брзина скенирања/кретања ласера по слободној површини (v_s);
- Корак скенирања (H);

Квантитативни однос између наведених параметара изражава се као:

$$E_A = P_L / (v_s \cdot H) \text{ [J/m}^2\text{]}$$

E_A је површинска густина енергије, која се још назива и *Ендрјуов број (Andrew number)*. На основу израза за E_A произилази да се већа површинска густина енергије добија применом веће снаге ласера, при нижој брзини и краћем кораку скенирања. Важно је запазити да се пораст механичких карактеристика услед пораста E_A одвија само до једне тачке, после које даље повећање E_A доводи до деградације материјала.

24. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion)

Апсорпција ласерског зрачења

Поред густине ласерске енергије, квалитет процеса ласерског синтеровања зависи и од термо-физичког параметра који се назива апсорпција. Апсорпција ласерског зрачења (A) неког материјала дефинише се као количник апсорбованог и упадног зрачења. Међутим, из практичних разлога, мери се рефлексија зрачења (R). Рефлексија се изражава као количник одбијеног и упадног зрачења, те се апсорпција израчунава као:

$$A = 1 - R$$

Апсорпција зависи од таласне дужине упадног зрачења (λ), као и од својстава материјала, геометрије површине, састава окружујуће атмосфере, итд. За разлику од компактних материјала, површински омотач честица праха апсорбује само део упадног зрачења, док преостали део продире кроз поре између честица и остварује контакт са унутрашњим слојевима праха. Апсорпција пора у праху приближна је апсорпцији црног тела.

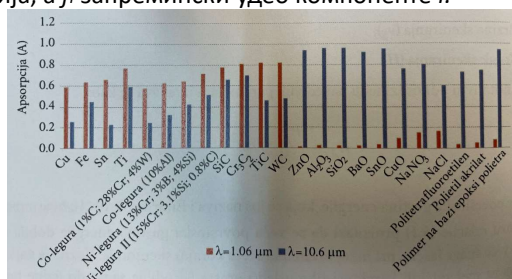
24. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion)

Апсорпција ласерског зрачења

Апсорпција метала и карбида опада са повећањем таласне дужине упадног зрачења, док код полимера и оксида апсорпција значајно расте са порастом λ . У принципу, материјали воље апсорбују ласерско зрачење у прашкастој него у чврстој форми. За мешавине праха, апсорпција се израчунава као:

$$A_{\text{mix}} = A_1 f_1 + A_2 f_2,$$

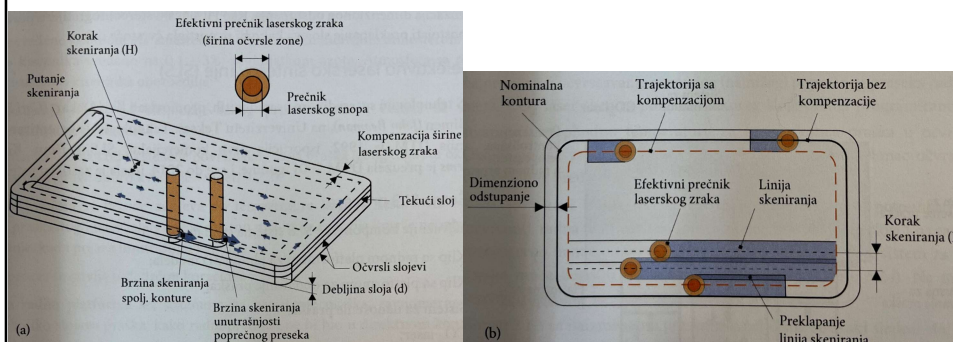
где је A_i апсорпција, а f_i запремински удео компоненте i .



25. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion)

Скенирање у процесу ласерског синтеровања

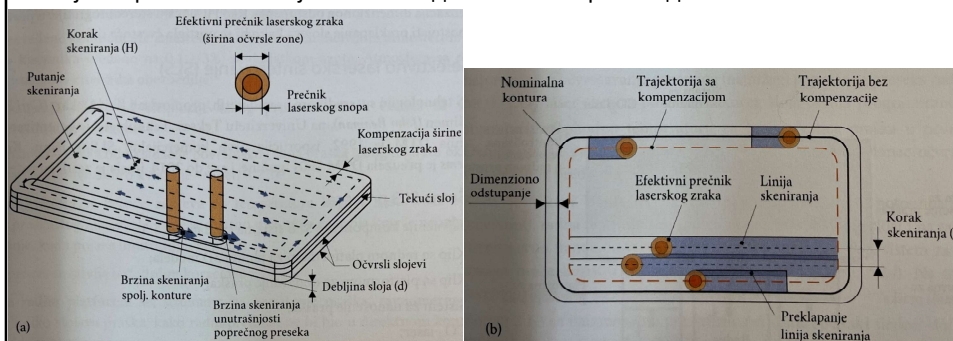
Приликом ласерског скенирања текућег слоја, најпре се очвршћава спољашња контура. С обзиром да је пречник очврсле зоне већи од номиналног пречника ласерског зрака, неопходно је извршити компензацију димензионог одступања тако што ће зрак бити померен за половину пречника очврсле зоне ка унутрашњости контуре.



25. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion)

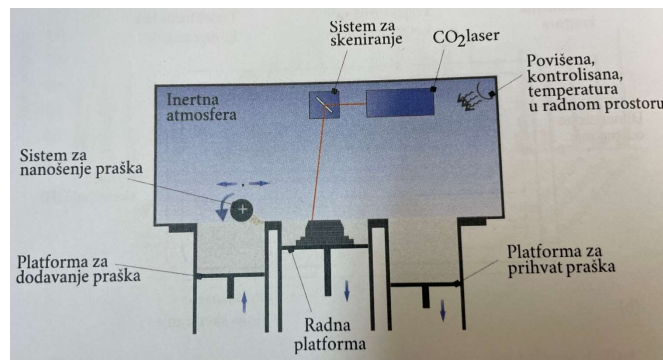
Скенирање у процесу ласерског синтеровања

Захваљујући компензацији, димензије реално очврснуле контуре попречног пресека одговарају задатим димензијама. Ова компензација се још назива и корективни офсет (*offset*). Након очвршћавања спољашње контуре, ласерски зрак очвршћава унутрашњост попречног пресека. Растојање између суседних линија скенирања представља корак скенирања (H – *hatch spacing*) и износи приближно једну четвртину пречника ласерског зрака. Приликом скенирања унутрашњости попречног пресека, такође се користи компензација димензионог одступања. У правцу z-осе мора постојати преклапање слојева како би се постигла чврстоћа дела.



26. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Selective Laser Sintering (SLS)

SLS технологија користи поступак ласерског синтеровања у присуству течне, уз примену угљен-диоксидног (CO_2) ласера за очвршћавање фино самлевоног праха. Снага CO_2 ласера инсталираних у комерцијалним SLS машинама креће се од 50-200 W. Средња вредност пречника честица креће се од 50 до 100 μm , али постоје и специјални поступци који користе прах са честицама испод 10 μm .



26. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Selective Laser Sintering (SLS)

Све наведене компоненте смештене су у комору са инертном атмосфером, где је присуство кисеоника сведено на 0.1 до 3%, са додатком азота. Атмосфера се редукованим присуством кисеоника обезбеђује:

- Смањење ризика од експлозије (због присуства ситних честица са великом површинском енергијом);
- Смањење ризика од оксидације површинског слоја праха.

Радна комора се такође загрева до температуре која је нешто нижа од тачке топљења прашкастог материјала, чиме се знатно умањује енергија која је неопходна за синтеровање, као и појава унутрашњих напона.

26. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Selective Laser Sintering (SLS)

SLS процес се одвија у следећим корацима:

- На радну платформу (радни сто) се, системом за наношење праха, равномерно наноси неколико слојева праха, како радни предмет (обрадак/израдак) не би био у директном контакту са радном платформом (радним столом);
- На основу управљачког програма који је генерисан у фази препроцесирања, најпре се врши очвршћавање основног (најнижег) попречног пресека радног предмета. CO₂ ласер скенира површину текућег слоја према програмираној контури, стварајући неопходну температуру за фузију честица праха у очврслу масу. Околни прах задржава својства, служећи као природни ослонац очврслим слојевима радног предмета;
- Када је текући попречни пресек радног предмета у потпуности скениран (очврснут), радна платформа се спушта за дебљину следећег слоја и на тај пресек се равномерно наноси нови слоја праха. У зависности од типа, систем за наношење праха може користити ротирајући ваљак или летву. На тај начин је извршена припрема за скенирање следећег слоја;
- Кораци 2 и 3 се наизменично понављају, при чему се сваки следећи слој у процесу фузије везује за претходни. Процес се понавља док се не заврши израда последњег (највишег) слоја радног предмета.

26. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Selective Laser Sintering (SLS)

Систем за наношење праха мора да задовољи следеће техничке критеријуме:

- Мора да омогући да са помоћне платформе на радну платформу буде нанета тачна запремина праха – тј. Количина која ће бити довољна да се прекрије претходно очврсли слој, без сувишног, заосталог материјала;
- Слој нанетог праха мора бити гладак и захтеване дебљине;
- У процесу наношења праха, не сме доћи до појаве сила смицања чије би дејство пореметило претходно завршене слојеве.

26. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Selective Laser Sintering (SLS)

По завршетку израде, модел се мора охладити у праху, јер се на тај начин обезбеђује равномерно и постепено хлађење, чиме се умањује појава унутрашњих напона и деформација. У зависности од габарита радног предмета и врсте материјала, хлађење може потрајати и неколико сати. Зато површина радног предмета остаје покривена неколико центиметара дебелим слојем праха, све док се не заврши процес хлађења.

Предмет се затим вади из коморе и неочврсли прах се одстрањује компримованим ваздухом. SLS не захтева посебно израђене ослоње, будући да неочврсли прах на радној платформи има улогу носеће подлоге. Завршни квалитет површине постиже се брушењем или пескарењем. У случају примене селективног ласерског синтеровања полимера и селективног ласерског топљења (SLM) метала, могуће је добити делове пуне густине без накнадног постпроцесирања. У осталим случајевима добијају се порозни делови и тада је неопходно обавити и постпроцесирање на један од следећих начина.

26. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Selective Laser Sintering (SLS)

У осталим случајевима добијају се порозни делови и тада је неопходно обавити и постпроцесирање на један од следећих начина:

Инфилтрацијом – овде се порозност дела најпре повећава, третманом у пећи, при чему се полимерно везиво у потпуности елиминише, топљењем и испаравањем. У наредној фази, радни предмет се, у пећи, инфилтрира металом/легуром са нижом тачком топљења (бакар/бронза), ради добијања пуне густине;

Постсинтеровањем – додатним вишесатним загревањем делова у контролисаној атмосфери на притиску који је близак атмосферском. Крајњи резултат зависи од почетне порозности дела;

Врућим изостатичким пресовањем (*Hot Isostatic Pressing* - HIP) – примењује се у случајевима када инфилтрација није пожељна, јер би тако дошло до увођења материјала са нижом тачком топљења или када постсинтеровање не може бити примењено због високе иницијалне порозности дела.

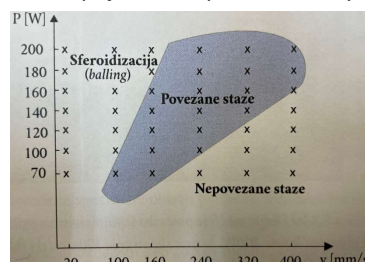
27. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Selective Laser Melting (SLM)

SLM је настао у намери да се омогући израда делова који су готово без присуства порозности, а која би по својим механичким особинама били блиски деловима који су израђени неком од конвенционалних технологија, нпр. ињекционим ливењем. Циљ је такође био да се елиминише временски захтевано постпроцесирање које је карактеристично за SLS технологију.

Иако ласерским зрачењем могу бити потпуно истопљени и полимери и метални материјали, термин SLM се односи само на металне материјале. У поређењу са полимерним материјалима, метални прах је знатно теже процесирати ласерским зрачењем. Разлог пре свега лежи у већој топлотној проводљивости метала, као и склоности ка оксидацији, високом површинском напону и ниској апсорпцији. Из тог разлога се за потребе SLM користе ласери чије су таласне дужине боље прилагођене апсорпцији металног праха. Уместо CO₂ ласера у прво време су коришћени Nd:YAG ласери, а данас савремене комерцијалне SLM машине користе фибер (*fiber*) ласере који су јефтинији, компактнији и имају већу енергетску ефикасност од Nd:YAG ласера.

27. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Selective Laser Melting (SLM)

Будући да нису сви метални материјали подједнако погодни за обраду применом SLM, пожељно је за сваки материјал експериментално утврдити прихватљиве границе процеса.

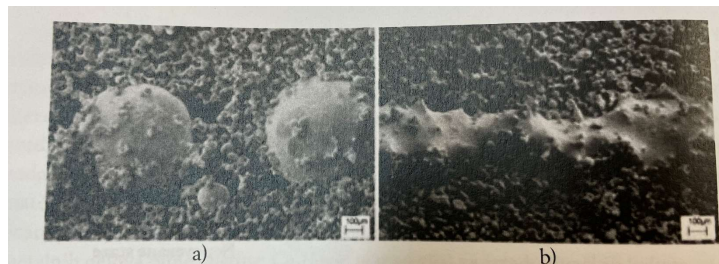


Важно је уочити да, поред очигледних предности, SLM карактеришу и два недостатка, што изискује врло прецизно управљање процесом:

- У току процесира јављају се високи температурни градијенти, праћени великом брзином згушњавања матрице, што доводи до појаве великих унутрашњих напона и изобличења геометрије дела;
- Услед сфероидизације долази до деградације квалитета површине.

27. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Selective Laser Melting (SLM)

Појава формирања дискретних очврсlih сфера уместо континуалне очврсле стазе у процесу ласерског скенирања – сфероидизација (*Balling*), посебно је изражена код процесирања једнородних металних материјала. До ове појаве долази услед тога што топљење изазвано дејством упадног ласерског зрачења узрокује степенаста температурни градијент, што за последицу има неравномерну расподелу површинског напона.



28. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Рани експерименти са ласерским синтеровањем једнофазних метала као што су олово, цинк и калај забележили у још рених дефедесетих година двадесетог века, али вез већег успеха. Директно ласерско синтеровање метала (*Direct Metal Laser Sintering* - DMLS) настало је као резултат ових напора.

DMLS технологија је настала на основама SLS технологије, а њена генерална намена јесте израда металних уметака који се користе у калупима за ињекционо ливење и ливење под притиском. DMLS је такође погодан за израду делова велике геометријске сложености, са комплексном унутрашњом структуром и финим детаљима.

Првобитне DMLS машине користиле су CO₂ ласере, а потом и Nd:YAG ласере, који се такође користе у конвенционалним технологијама ласерског сечења и заваривања. Са напретком материјала и тачности технологије, квалитет ласера је постао ограничавајући фактор. Зато се данас користе савременији, *fiber* и *disk* ласери, снага 200W.

28. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

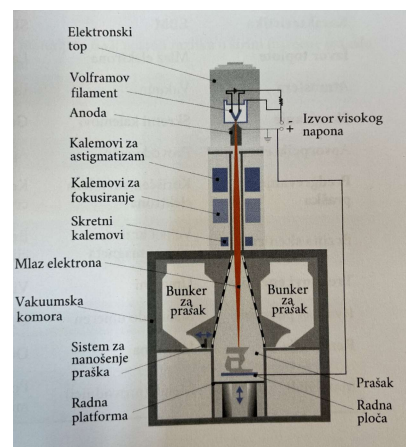
Приликом израде уметака DMLS технологијом, где је неопходно да само површина калупа буде непорозна и високе тврдоће, тј. отпорна на хабање, могуће је вршити оптимизацију брзине израде. Приликом израде језгреног стратума, брзине скенирања могу бити више, чиме се добија порознија структура. Са смањењем дубине, односно са приближавањем површини издатка, брзина израде се смањује што доводи до скоро потпуне елиминације порозности.

	Rel. gustina	Volumetrijska brzina štampe [mm ³ /s]
Spoljašnja površ		
Spoljašnji stratum	≈99.5%	0.5
Unutrašnji stratum	≈97%	3.0
Jezgreni stratum	≈94%	4.0

29. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Electron Beam Melting (EBM)

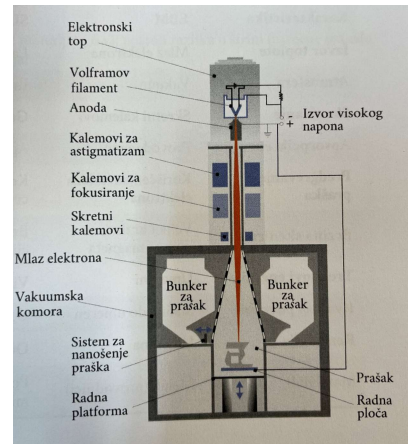
За разлику од система који користе ласере, EBM користи фокусирани сноп електрона/млаз електрона. Скенирање се одвија слично SLS, SLM или DMLS поступку, при чему овде фокусирани млаз/сноп електрона скенира програмски задату контуру у текућем слоју, изазивајући локално топљење и поновно очвршћавање материјала.

Млаз електрона, снаге од 0,5 до 3,5 kW, генерише се у електронском топу, чије су кључне компоненте катода – влакно волфрама, анода и систем електромагнетних јединица за фокусирање и скретање млаза. Катода се загрева на 2500-3000 °C и услед проласка струје емитује електроне. Анода је под високим напонем од 60000 V, тако да велика разлика у потенцијалу омогућава убрзавање електрона у правцу радне коморе.



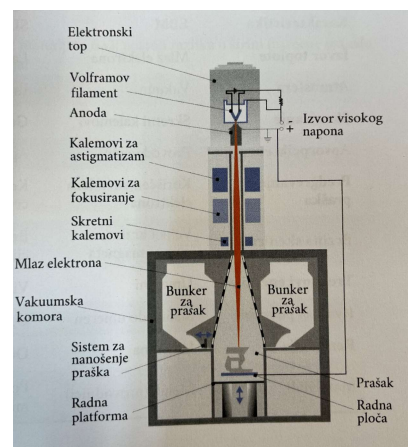
29. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Electron Beam Melting (EBM)

Млаз електрона је могуће фокусирати и усмерити уз помоћ система скретних калемова. Електромагнетни принцип скретања омогућава веома велике брзине скенирања које код машина новије генерације, износи и до 4000 m/s. Дебљина слоја се креће од 0,07 до 0,1 mm. У циљу смањења унутрашњих напона који су последица великих температурних напрезања, врши се предгревање праха. Улога калемова за корекцију астигматизма јесте да одрже кружни облик фокусираног снопа, без обзира на тренутни угао под којим снап пада на површину радне платформе. Без наведене корекције, дошло би до изобличења кружног снопа у елипсасти, чиме би била нарушена тачност скенирања.



29. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Electron Beam Melting (EBM)

Према начину на који пролазе кроз медијум, ласерски зрак и фокусирани млаз електрона значајно се разликују. Млаз електрона путује брзином која је блиска брзини светлости, док се фотони ласерског зрака крећу управо брзином светлости. Такође, ласерски зрак пролази кроз гас без икакве интеракције са околином, све док је гас транспарентан на таласној дужини ласерског зрачења. Насупрот томе, при проласку кроз гас, млаз електрона ступа у интеракцију са атомима гаса и при том долази до скретања млаза. Из тог разлога се ЕВМ процес увек одвија у вакуумској комори, у присуству мале количине инертног гаса чији је задатак да неутралише гасне нуспроизводе и заостали кисеоник. Даље, због негативног наелектрисања, млаз електрона је у току рада могуће усмеравати магнетним пољем.



29. ФУЗИЈА НАНЕТОГ ПРАХА (Powder bed fusion) / Electron Beam Melting (EBM)

Са друге стране, ласерски зрак се оптички фокусира, а његово усмеравање се врши уз помоћ галванометара који садрже огледала која покрећу мотори. Из овог разлога EBM има готово тренутно усмеравање и позиционирање млаза електрона, док брзина скенирања може бити врло висока. Код ласерских поступака, брзину скенирања ограничавају маса огледала и карактеристике погонских мотора.

Карактеристика	EBM	SLM
Извор топлоте	Млаз електрона	Ласер
Атмосфера	Вакуум	Инертни гас
Скенирање	Скретни калемови	Галванометри
Апсорпција енергије	Провођењем	Апсорпцијом
Предгревање праха	Коришћењем млаза електрона	Коришћењем инфрацрвених грејача
Брзина скенирања	Велика брзина, уз помоћ магнета	Брзина ограничена инерцијом галванометра
Трошкови енергије	Умерени	Високи
Квалитет површине	Слабији, до умерен	Умерен, до одличан
Резолуција	Умерена	Одлична
Материјали	Метали (проводници)	Полимери, метали, керамика

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, Šerčer M, Aditivna Proizvodnja, Fakultet Strojарstva i Brodogradnje, Zagreb, 2015.
4. Lužanin O, 3D Štampa, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2019.
5. Plančак 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.;