

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РЕІНЖИНІРИНГ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра
за освітньою програмою «Комп'ютеризовані поліграфічні системи»
спеціальності 133 Галузеве машинобудування

Укладач: Д. С. Гриценко

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент *Палюх О.О.*, д-р техн. наук, професор
професор кафедри репрографії

Відповідальний редактор *Зенкін М. А.*, д-р техн. наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 1 від 07.09.2023 р.)
за поданням Вченої ради НН ВПІ
(протокол № 11 від 26.06.2023 р.)*

У навчальному посібнику викладено рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Інтегровані технології та реінжиніринг». Запропоновані завдання призначені сприяти поглибленню та закріпленню набутих знань, умінь і навичок з використання сучасної методології, методів, прийомів, комп'ютерної техніки і інформаційних технологій при впровадженні інтегрованих технологій та реінжинірингу у поліграфічне виробництво, ефективного використання широкого спектру інтегрованих технологій, матеріалів і технологічних можливостей, застосування сучасних світових концепцій проектування та реінжинірингу підприємств поліграфічного машинобудування.

Навчальний посібник призначений для здобувачів ступеня магістра, які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». Посібник також буде корисним усім, хто цікавиться темою реінтегрованих технологій та реінжинірингу.

Реєстр. № НП 23/24-013. Обсяг 1,52 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» про-
спект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	4
МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ	5
ТЕМАТИКА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ	6
СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ.....	6
ЗАХИСТ РОБОТИ ТА МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ.....	7
МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ	8
РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ.....	34
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	36
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	39

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Інтегровані технології та реінжиніринг» є нормативною в підготовці магістрів за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування освітньої програми «Комп'ютеризовані поліграфічні системи». Освітньою програмою передбачено виконання розрахунково-графічної роботи з метою закріплення і поглиблення знань, отриманих студентами під час вивчення даної дисципліни.

Запропоновані завдання призначені сприяти поглибленню та закріпленню набутих знань, умінь і навичок з використання сучасної методології, методів, прийомів, комп'ютерної техніки і інформаційних технологій при впровадженні інтегрованих технологій та реінжинірингу у поліграфічне виробництво, ефективного використання широкого спектру інтегрованих технологій, матеріалів і технологічних можливостей, застосування сучасних світових концепцій проектування та реінжинірингу підприємств поліграфічного машинобудування.

Унаслідок виконання розрахунково-графічної роботи студенти отримають досвід використання аналітичного підходу для виконання поставлених завдань із впровадження інтегрованих технологій та реінжинірингу у поліграфію, зокрема:

- аналізу технологічних процесів;
- вибору та ефективного застосування сучасних інтегрованих технологій;
- визначення та обґрунтування шляхів розвитку підприємств поліграфічного машинобудування на основі системного аналізу їхньої діяльності;
- забезпечення максимально ефективного використання обладнання, площ, приміщень та персоналу;
- оптимізації матеріально-виробничих потоків;
- забезпечення високої гнучкості та багатоваріантності використання підприємств поліграфічного машинобудування;
- забезпечення високої привабливості та конкурентоспроможності підприємств поліграфічного машинобудування.

Отримані практичні навички та знання під час виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Інтегровані технології та реінжиніринг» можна використовувати в подальшому під час проходження переддипломної практики та виконання дипломного проєкту, а також у професійній діяльності.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Метою виконання розрахунково-графічної роботи є поглиблення, систематизація та закріплення знань, умінь та навичок, одержаних у процесі вивчення дисципліни «Інтегровані технології та реінжиніринг», зокрема:

- аналізу технологічних процесів;
- вибору та ефективного застосування сучасних інтегрованих технологій;
- визначення та обґрунтування шляхів розвитку підприємств поліграфічного машинобудування на основі системного аналізу їхньої діяльності;
- забезпечення максимально ефективного використання обладнання, площ, приміщень та персоналу;
- оптимізації матеріально-виробничих потоків;
- забезпечення високої гнучкості та багатоваріантності використання підприємств поліграфічного машинобудування;
- забезпечення високої привабливості та конкурентоспроможності підприємств поліграфічного машинобудування.

Розрахунково-графічна робота виконується протягом передбачених навчальним планом годин самостійної роботи студента.

ТЕМАТИКА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

За обраною темою, необхідно зробити виконати опис однієї з технологій отримання генеративних виробів (3D друку).

Перелік тем розрахунково-графічної роботи:

1. SLA – лазерна стереолітографія;
2. SLS – вибіркове лазерне спікання;
3. DMD – пряме нанесення металу;
4. FDM – моделювання оплавленням;
5. GPD – осадження на газовій фазі;
6. LENS – формування за допомогою лазерної інженерної сітки;
7. MJM – багатоструминне моделювання;
8. MJS – твердіння багатофазового струменя;
9. TPD (3DP) – тривимірний друк.
10. LOM — пошарове формування об'ємних моделей з листового матеріалу (технологія тривимірного ламінування)
11. 3DW – тривимірне наплавлення;
12. BPM – виготовлення з використанням балістик часток;
13. HIS – твердіння голографічною інтерференцією;
14. LLM – моделювання нашаруванням;
15. RMPD – швидке виготовлення макровиробів;
16. SGC – твердіння щільної основи;

СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Робота має включати такі елементи структури:

- 1) вступ,
- 2) історія методу друку,
- 3) суть технології,
- 4) схема технології друку,

- 5) матеріали, з яких відбувається генерація моделі,
- 6) наявні пристрої та їхні технічні характеристики (з вказанням фірм-виробників),
- 7) приклади отриманих (надрукованих) моделей – фотографії,
- 8) висновки
- 9) перелік посилань.

Рекомендований обсяг розрахунково-графічної роботи – 10-15 сторінок друкованого тексту.

ЗАХИСТ РОБОТИ ТА МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ

Розрахунково-графічна робота захищається у встановлені терміни згідно з графіком навчального процесу.

Згідно з силабусом дисципліни, за рейтинговою системою оцінювання (РСО) результатів навчання, максимальна оцінка за виконання розрахунково-графічної роботи та її захист – 15 балів. Під час оцінювання береться до уваги:

- своєчасне виконання та захист роботи;
- правильність та аргументованість прийнятих рішень;
- наявність усіх вищеперерахованих обов’язкових компонентів роботи;
- застосування творчого підходу та нестандартних прийомів для вирішення поставленого завдання.

У табл. 1 наведено розподіл балів за розрахунково-графічну роботу.

Таблиця 1 – Розподіл балів за розрахунково-графічну роботу

Оцінка (традиційна)	Критерій оцінювання	Кількість балів
«відмінно»	повна відповідь (не менше 95% потрібної інформації)	13-15
«добре»	достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації) або повна відповідь з незначними неточностями	8-12
«задовільно»	неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації) та незначні помилки	1-7
«незадовільно»	незадовільна відповідь, завдання не виконано	0

МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Для вибору теми розрахунково-графічної роботи та детального підбору матеріалу, його аналізу необхідно попередньо ознайомитися із сутністю основних генеративних способів матеріалізації тривимірних математичних моделей виробів. Назви способів позначаються аббревіатурами, складеними з початкових букв англійських слів назви способів, наприклад, RP (Rapid Prototyping).

Далі наведено коротку інформацію для кожної теми по відповідним розділам, взявши за основу і розширивши яку, потрібно виконати розрахунково-графічну роботу. Для цього рекомендується скористатися у тому числі літературою, наведеною у розділі «Список рекомендованої літератури», де наведено джерела для кожної теми.

SLA (Stereo Lithographics Apparatus) – стереолітографія

Під час розгляду даної теми, у розділі «Історія методу друку» слід вказати, що промислові установки почали виготовлятися з 1988 р компанією 3D Systems Inc (табл. 1). У розділі «Наявні пристрої та їхні технічні характеристики» потрібно навести інформацію про те, що аналогічні установки випускаються іншими фірмами в США і Японії.

Таблиця 1 – Технічні характеристики SLA систем [1]

Модель	SLA 250 / 50HR	SLA 3500	SLA 5000	SLA 7000
Тип лазера, довжина хвилі, потужність	HeCd, 325нм, 6 мВт	твердотільний Nd: YVO ₄ , 354,7 нм, 160 мВт	Nd - потрійної частоти: YVO ₄ , 354,7 нм, 216 мВт	Nd - потрійної частоти: YVO ₄ , 354,7 нм, 800 мВт
Товщина шару, мм	0,0625 0,1	0,05 0,1	0,05 0,1	0,0254 0,127
Діаметр променю, мм	0,06 0,08	0,20 0,30	0,20 0,30	0,23 0,28 до 0,69 0,84
Швидкість побудови, м / с	0,635	2,54	до 5,0	2,54 9,52
точність позиціонування і відтворюваності, мм	0,0025	0,00177; ± 0,005	0,00177; ± 0,013	0,001; ± 0,001

Максимальна вага деталі, кг	9,1	56,8	68,04	68,04
Обсяг ванни, л	32,2	99,3	253,6	253,6
Максимальна область побудови, мм	250 250 250	350 350 400	508 508 584	508 508 600
Операційна система	MS-DOS	Windows NT	Windows NT	Windows NT
Габаритні розміри, м	1,24 0,69 1,64	0,95 1,02 2,00	1,24 0,69 1,64	1,24 0,69 1,64
Вага, кг	461	1100	1 363	+1455

У розділі «Суть технології» потрібно вказати, що всі процеси стереолітографії починаються з проектування зовнішніх і внутрішніх поверхонь виробів з точним зазначенням всіх геометричних елементів в одному із середовищ 3D проектування: AutoCAD, 3D Компас, Pro-Engineer, 3D Studio і ін. Потім 3D CAD модель перетворюється в STL-файл. Висока точність і відтворюваність споруджуваної поверхні досягається за рахунок збільшення кількості трикутників при триангуляції (рис. 1). За допомогою керуючих програм підготовки процесу побудови здійснюється конструювання технологічних підтримок виробів на платформі, поділ виробу на перетини (шари) з фіксованою товщиною, визначення параметрів побудови кожного перетину і далі пошаровий синтез виробу (рис. 2).

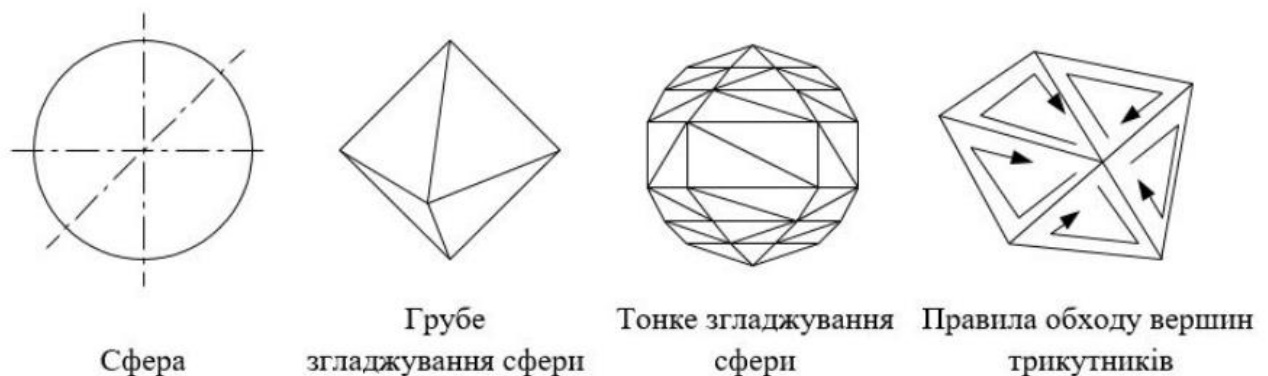


Рис. 1 – Триангуляція сфери і правила обходу вершин трикутників



Рис. 2 – Схема керуючої програми обробки STL файлу

У розділі «Схема технології друку» потрібно надати інформацію про те, що при стереолітографії геометричне відтворення виробу здійснюється пошарово дисперсійним отвердінням рідкого фотомономеру за допомогою UV лазера (фотополімеризація) (рис. 3).

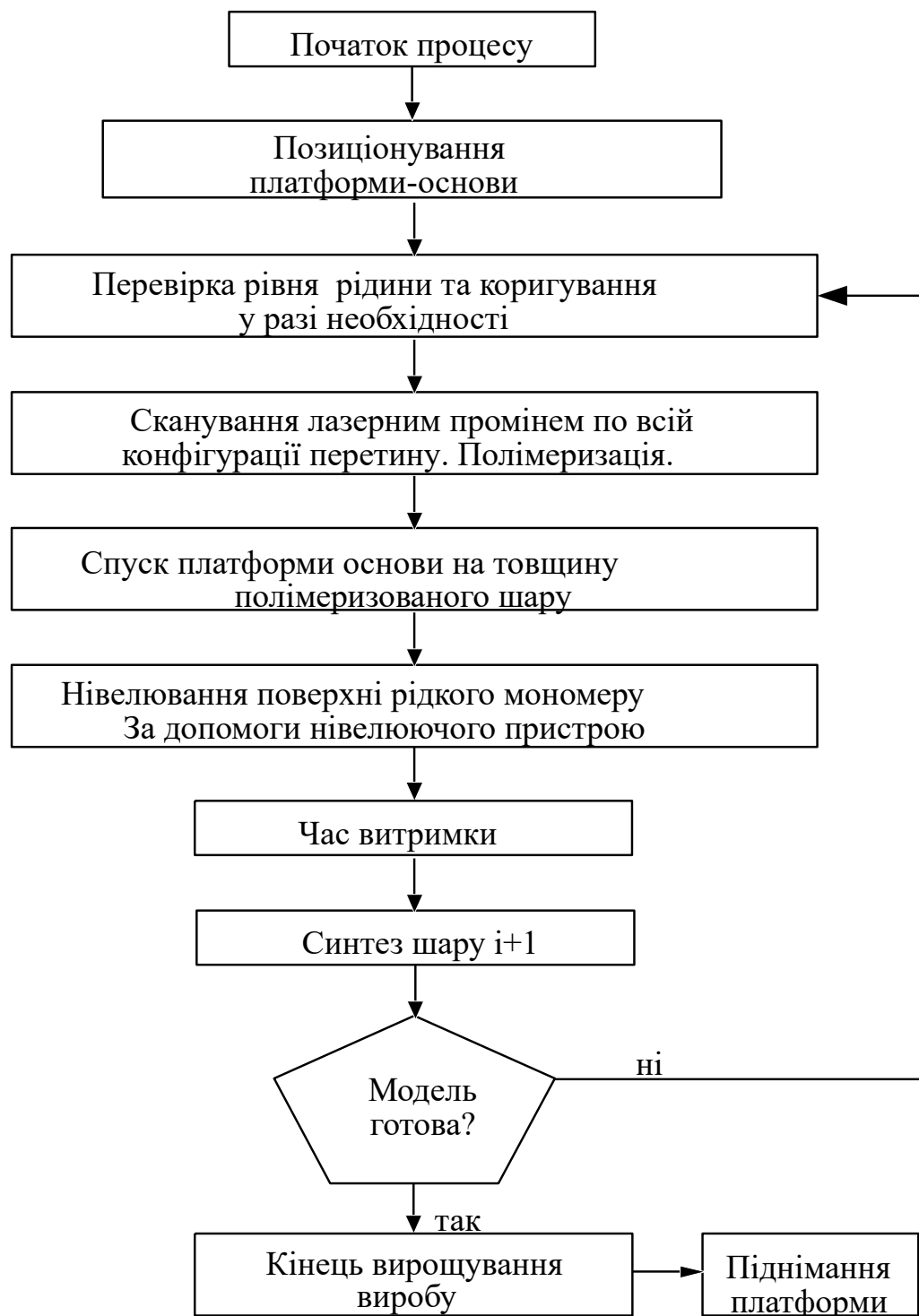


Рис. 3 – Схема процесу лазерної стереолітографії

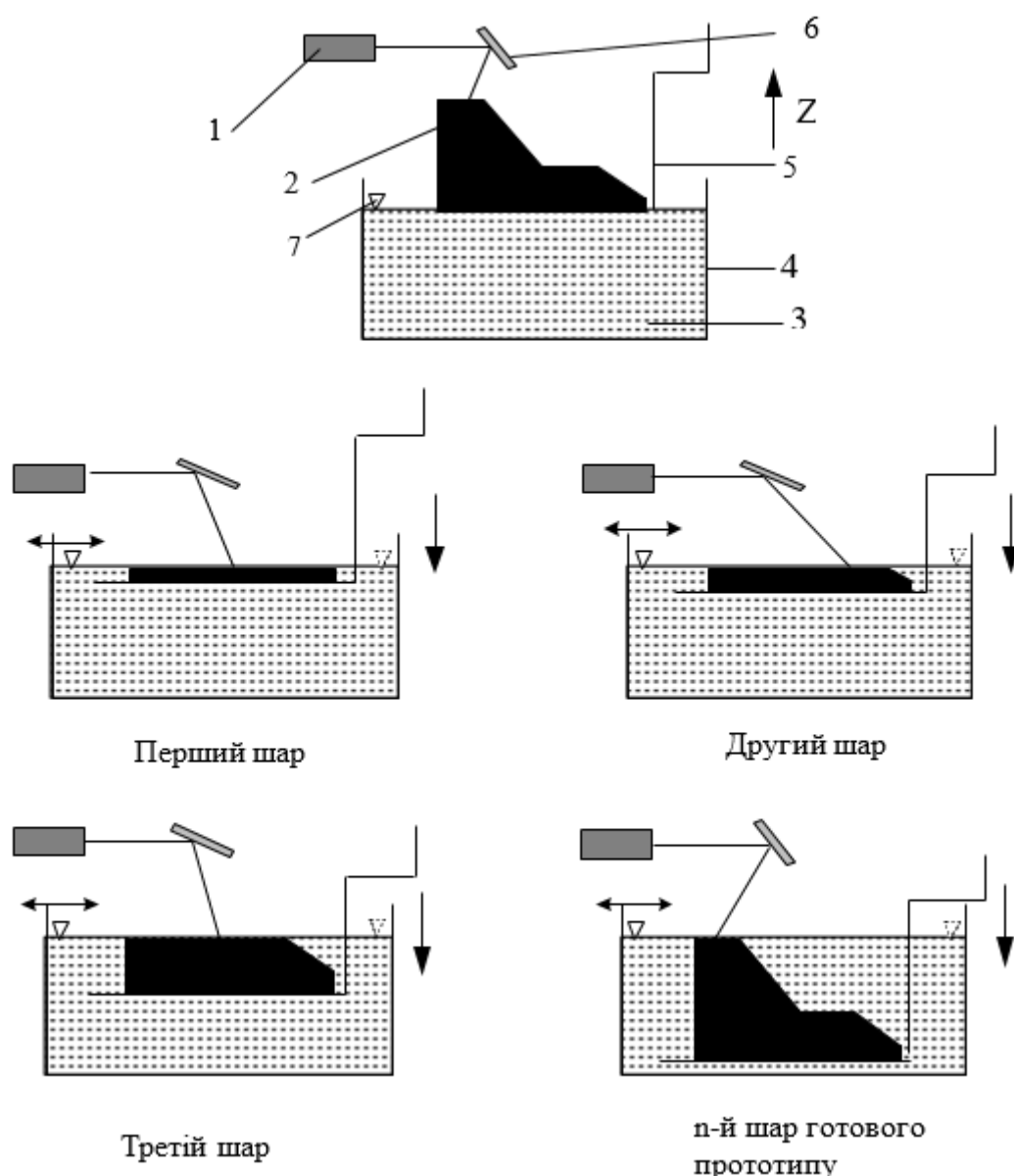


Рис. 4 – Схема отримання тривимірної твердотільної моделі пошаровим на-
рощуванням за способом стереолітографії:

1 - лазер; 2 - виріб; 3 - рідкий мономер; 4 - ванна; 5 - рухома платформа; 6 -
дзеркало, що управляє скануванням; 7 - вирівнюючий ніж

Промінь лазера, керований комп'ютером (рис. 4), проходить по поверхні рід-
кого полімеру, скануючи її частина в площині $X - Y$ відповідно до конфігурації
формується шару. У рідкому реакціонноздатному середовищі породжуються ак-
тивні центри (радикали, іони, активовані комплекси), які при взаємодії з молеку-
лами мономеру викликають зростання полімерних ланцюгів, що веде до фазової

зміни опроміненого середовища - отвердінню шару. Траєкторія сканування лазерного променя по кожному шару перетину визначає, в якому місці робочого простору площині $X - Y$ лазерний промінь фокусується на поверхні рідкого мономеру, і він, полімеризуючись, твердне. У тій частині, де поверхня не піддається впливу лазерного променя, полімеризація відсутня. Після цього платформа установки опускається на величину кроку, з яким проводилися січні площини теоретичної моделі. Промінь сканує конфігурацію другого перетину, потім третього і т.д. Так послідовно пошаровим нарощуванням відбувається створення тривимірного твердотілого конструктивного елементу заданої геометрії.

Потрібно наголосити, що важливим при підготовці і реалізації SLA способу є забезпечення стійкості виробу на платформі і стійкість оболонки виробу. Для цього на стадії комп'ютерної підготовки 3D CAD моделі за допомогою спеціальної програми конструюються зовнішні технологічні підтримки і внутрішні перегородки. За їх допомоги забезпечується: підтримка виступів і консолей моделі, похилих поверхонь; запобігання розшаровування на складнопрофільних ділянках; коригування можливого викривлення шарів, що примикають до платформи; створення складових виробів з кількох частин; відділення отриманого виробу від рухомої платформи.

Операції з видалення підтримуючих конструкцій виконуються поза стереолітографічним пристроєм.

Потрібно вказати переваги методу лазерної стереолітографії: можливість повної автоматизації, висока точність повторних відтворень, відсутність обмежень за складністю форми виробу, можливість виготовлення виробів великих розмірів по їх частинам із наступним відтворенням цілого виробу у заданому об'ємі.

До недоліків лазерної стереолітографії можна віднести: можливість усадки при полімеризації матеріалу (фотомономеру), що може призводити до деформа-

цій і, отже, знижувати точність; хімічну токсичність фотомономерів (до полімеризації); відносно високу вартість фотомономерів; чутливість установки до змін температури і вологості приміщення, до вібрацій.

Деталізуючи інформацію про сфери використання, слід зазначити, що ефективна стереолітографія при концептуальному моделюванні виробів і процесів складання в машинобудуванні, в технологіях лиття, в медицині (особливо при створенні імплантатів), в архітектурі, археології, електроніці, приладобудуванні та ін.

SLS (Selective Laser Sintering) – вибіркове лазерне спікання

Розглядаючи цю тему, потрібно вказати, що спосіб SLS дозволяє пошаровим нарощуванням створювати не тільки модель або прототип виробу, а й власне кінцевий виріб. У розділі «Матеріали, з яких відбувається генерація моделі» потрібно зазначити, що для виготовлення використовуються різні порошки - поліаміди, полікарбонати, віск, нейлон, кераміка, метали. У розділі «Історія методу друку» потрібно навести інформацію про те, що спосіб був запропонований Карлом Декартом в 1986 р. (США) і спочатку установки вироблялись фірмою DTM Corp. - Sinterstation 2060, Sinterstation 2500 і ін. У розділі «Схема технології друку» потрібно надати інформацію про те, що технологічні комплекси містять зазвичай такі складові (рис. 5): пристрій пошарової подачі порошку, платформу, забезпечену приводом вертикального переміщення, пристрій пошарового вирівнювання порошку. Керуючі дані для лазера вводяться, виходячи з 3D CAD геометрії. Порошок пошарово за допомогою вирівнюючого ролика наноситься на платформу носія (рис. 5).

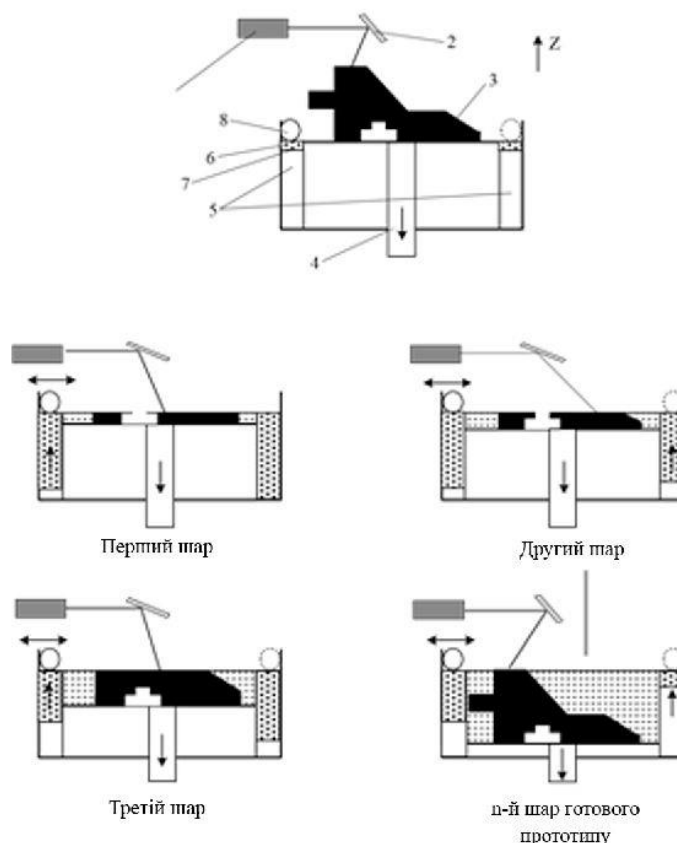


Рис. 5 – Схема отримання тривимірного твердотільного виробу пошаровим нарощуванням за способом вибіркового лазерного спікання: 1 - лазер, 2 - оптична система, 3 - готовий виріб, 4 - рухома (по осі Z) робоча платформа, 5 - бункери для подачі порошкового матеріалу, 6 - порошковий матеріал, 7 - рухомий стіл бункера, 8 - ролик для подачі порошку і вирівнювання шару

Керований промінь CO_2 лазера сканує поверхню порошку відповідно до конфігурації заданого перетину і ініціює локальне вибіркове оплавлення порошкової маси. Ділянки шару порошку, які потрапили у зону впливу лазерного променя, приймають при цьому задану форму перетину. Платформа носія циклічно опускається. Підігрів камери знижує витрати енергії лазера на нагрів порошку, знижує рівень деформацій. Спосіб передбачає подачу в камеру нейтрального газу для виключення окислення порошку при нагріванні (рис. 5, 6).

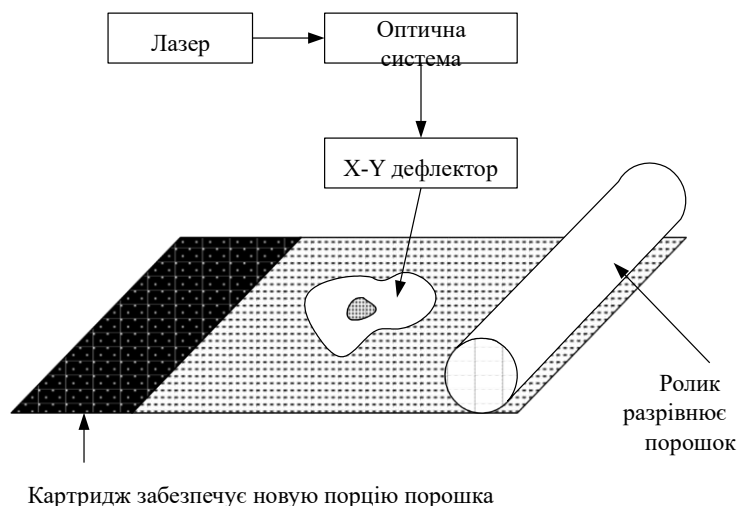


Рис. 6 – Пристрій розрівнювання і ущільнення порошкової суміші

Розглядаючи переваги та недоліки способу, слід вказати, що до переваг способу SLS можна віднести невисоку вартість використовуваних матеріалів, їх нетоксичність, відсутність технологічних підтримок, можливість одночасного виготовлення декількох виробів (в різних «горизонтах»), широкий спектр використовуваних матеріалів, можливість виготовлення виробу по частинах; високу міцність і можливість отримання остаточних виробів (пряме вирощування).

У роботі потрібно зазначити, що області використання способу – авіаційна, автомобільна, електронна, електротехнічна і ін. Галузі промисловості, а також медицина (імпланти), нафтохімія, т. ін. будь-які галузі, де потрібне швидке прототипування, створених моделей, одиничних екземплярів або малих серій функціональних виробів складної форми.

У розділі «Матеріали, з яких відбувається генерація моделі» потрібно вказати, що експериментально доведено можливість використання таких порошків: метал (Ni), полімер (поліамід або полікарбонат); біметал (Ni, Fe, Al або латунь + припій) і інтерметалоїд (Ni-Ti, Ti-Al, Ni-Al); кераміка (Al + ZrO₂).

3DW (Three Dimensional Welding) – тривимірне наплавлення (зварювання)

Розглядаючи цю тему, потрібно зазначити у роботі, що за допомогою дугового зварювання пошарово наплавляється метал у вигляді простих форм, з яких потім складаються більш складні структури. У розділі «Схема технології друку» потрібно навести інформацію про те, що використовується дві керуючі системи: CNC для зварювального робота і файли STL CAD для пошарового побудови. Установка оснащена системами термоконтролю, інтерактивного охолодження середовища, видалення парів і механічних частинок.

BPM (Ballistic Particle Manufacturing) – виготовлення з використанням балістики частинок

У роботі слід навести інформацію про те, що цей спосіб базується на принципі чорнильного друкувального пристрою. У розділі «Схема технології друку» потрібно зазначити, що формування пошаровим нарощуванням здійснюється за рахунок того, що окремі маленькі крапельки термопластичного матеріалу, вилітаючи з «друкувальної» головки, застигають в необхідному місці, спочатку на утримуючій платформі, а потім – попередньому шарі. У розділі «Наявні пристрої та їхні технічні характеристики» потрібно зазначити, що установки різних фірм відрізняються кількістю застосовуваних «друкувальних» головок - від 2-х до 5-ти. В останньому випадку відпадає необхідність використання підтримуючих конструкцій.

DMD (Direct Metal Deposition) – пряме нанесення металу

Розглядаючи цю тему, потрібно звернути увагу на те, що інтегрована технологія Direct Metal Deposition (пряме нанесення металів) дозволяє виготовляти, ремонтувати і переробляти промислове оснащення, наносити зміцнюючі покриття і будувати дослідні зразки виробів зі стандартних промислових металів.

Технологія DMD дозволяє виготовляти металеві деталі зі 100% щільністю.

У розділі «Схема технології друку» потрібно зазначити, що DMD поєднує в собі п'ять загальновідомих технологій: лазери, CAD, CAM, сенсори і порошкову металургію. В ході процесу DMD промінь лазера фокусується на металевій заготовці (рис. 7), тривимірної металевої прессформи (деталі, яка приблизно відтворює форму об'єкта) або пошкодженої металевої деталі, створюючи зону розплавленого металу. Тонкий струмінь металевого порошку впорскується в зону розплаву, збільшуючи його об'єм. Суцільнометалева деталь будується пошарово у результаті переміщення променя лазера і струменю порошку під управлінням комп'ютера, відповідно до даних CAD файлу.

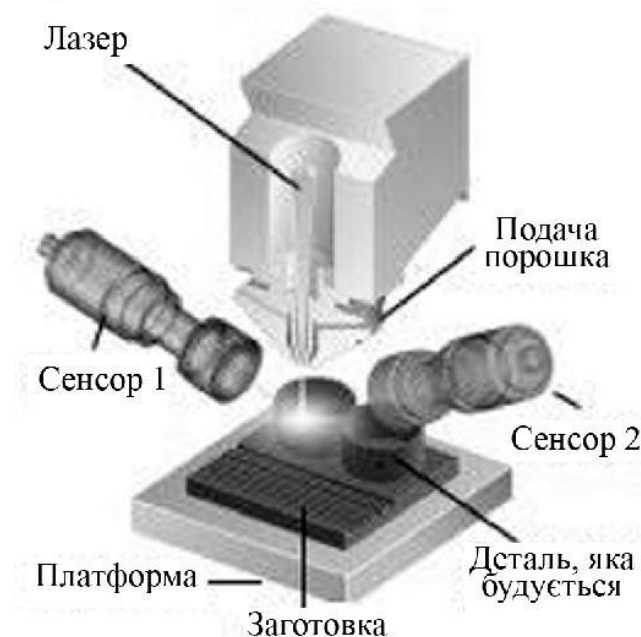


Рис. 7 – Схема DMD (Direct Metal Deposition) – пряме нанесення металу

Технологія DMD поєднує в собі особливості лазерної стереолітографії (SLA) і виборчого лазерного спікання (SLM). DMD створює деталі з таких металів і сплавів, як інструментальні сталі, титан, алюміній, мідь, нержавіюча сталь,

іридій і інконель, а також з металокерамічних композитів. За своїми характеристиками (межа текучості, подовження, ударна в'язкість, питома міцність) DMD метали відповідають або навіть перевищують показники «звичайних» металів.

Процес DMD дозволяє швидко змінювати склад металу шляхом інжекції в розплав різних типів металевих порошків. Це дає можливість створювати гібридні металеві композити.

Розглядаючи у роботі сферу використання способу, потрібно навести інформацію про те, що деякі особливості DMD особливо незамінні при виготовленні промислових форм з інструментальної сталі. Що особливо важливо, ця технологія створює повністю закінчені форми або формотворчі поверхні з інструментальної сталі без будь-якого синтезу або випалювання сполучної речовини. Оскільки DMD створює деталі "майже точної форми", вони зазвичай піддаються доведенню на електроерозійних верстатах для досягнення точних розмірів (постпроцеси).

FDM (Fused Deposition Modeling) – моделювання оплавленням

Працюючи над цією темою, у розділі «Історія методу друку» потрібно навести інформацію про те, що лазерний процес (Fused Deposition Manufacturing) запропонований Скоттом Крампом (Scott Cramp). У розділі «Наявні пристрої та їхні технічні характеристики» потрібно зазначити, що комерційні установки кампанія Stratasys (США) випускає з 1991 р.: FDM Quantum, FDM-2000, FDM-3000 і FDM-8000 (табл. 2).

Таблиця 2 – Технічні характеристики FDM систем [2]

Модель	FDM 2000	FDM 3000	FDM 8000	Quantum
Розміри побудови, мм	254 254 254	254 254 406	457 457 609	600 500 600
Точність, мм	$\pm 0,127$	$\pm 0,127$	$\pm 0,127$	$\pm 0,127$ (для розмірів $l < 127$ мм) і ± 0.015 мм / мм ($l > 127$ мм)

Габаритні розміри, м	0,66 0,91 1,07	0,66 1,07 0,91	1,49 1,91 1,00	2,24 1,98 1,12
Вага, кг	160	160	392	1134
необхідна потужність	220-240x10 В · А	220-240x10 В А	220-240x10 В А	208-240x50 В А
Ширина шару, мм	0,254 2,54	0,254 2,54	0,254 2,54	0,38 0,51
Товщина шару, мм	0,05 0.762	0,05 0.762	0,05 0.762	0,18 0.25

У розділі «Схема технології друку» потрібно вказати, що формоутворення моделі (кінцевої деталі) відбувається за допомогою екструзії розплавленого матеріалу (рис. 8) через одне або декілька сопел.

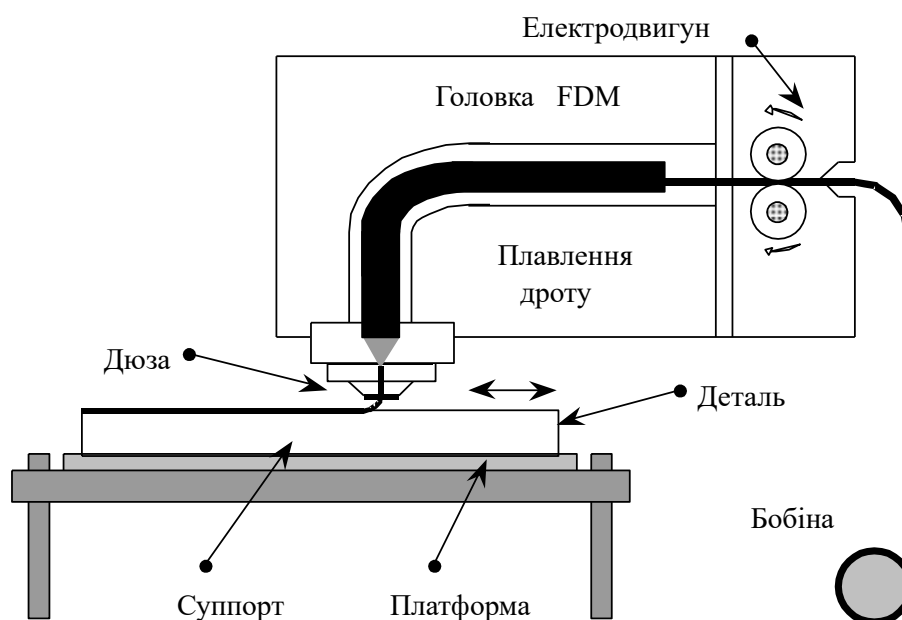


Рис. 8 – Спосіб моделювання оплавленням (FDM)

Подача розігрітого матеріалу може здійснюватися безперервно або дискретно. За фізичної суті сюди можуть бути віднесені способи MJM, MJS, 3D Printer і ін.

При використанні металів намотаних на бобіну дріт діаметром 0,1-0,2 мм подається в головку FDM, оплавляється і через сопло, кероване спеціальним координатним приводом, подається на платформу. Шари формуються відповідно до

2D CAD моделі в координатах $X - Y$ товщиною від 0,025 мм до 1,25 мм з можливою товщиною стінок 0,22-6 мм. Після формування шару по всьому перетину платформа установки опускається на крок, рівний товщині шару, і процес повторюється до повного побудови твердотільної моделі.

У розділі «Матеріали, з яких відбувається генерація моделі», потрібно вказати, що застосовувані матеріали – термопласти, віск, метали. При необхідності для зміцнення побудованої шарами деталі використовують опорні конструкції (найчастіше сотові) з картону, полістиролу, воску та ін. Точність виготовлення – 0,1-0,2 мм. До переваг процесу можна віднести високу продуктивність, нетоксичність застосовуваних матеріалів і легкість переходу з одного матеріалу на інший, компактність установки і малі витрати. Системи FDM мають модульну конструкцію, що дозволяє розширювати функціональні можливості системи.

Не позбавлений спосіб і недоліків. Це, перш за все, низька міцність і зв'язок між шарами, необхідність суворого контролю температури щоб уникнути розшарування; необхідність безперервного руху екструдера щоб уникнути затвердіння матеріалу; необхідні технологічні підпірки.

Сфера застосування – виготовлення концептуальних моделей, функціональних прототипів, кінцевий продукт, точне лиття, інструментальне забезпечення.

Технологія знайшла застосування в автомобільній, аерокосмічній, електронній та ін. Галузях промисловості.

GPD (Gas Phase Deposition) - осадження з газової фази

Розглядаючи цю тему, потрібно вказати, що принципово можливе створення 3D CAD моделей з використанням газового середовища. У розділі «Схема технології друку» потрібно деталізувати способи, які базуються на розщепленні молекул реактивного газу під дією лазерного променя і використанні продуктів цього розщеплення на побудову твердотільної моделі, наприклад, з вуглецю, карбідів, силікону, нітридів.

У розділі «Матеріали, з яких відбувається генерація моделі», потрібно зазначити, що можливо ініціювати хімічну реакцію між газом і шаром порошку з тим, щоб формостворити твердотільну деталь, наприклад, з карбіду кремнію або нітриду кремнію.

HIS (Holographic Interference Solidification) – затвердіння голографічною інтерференцією

Розглядаючи цю тему, у розділі «Схема технології друку» потрібно вказати, що в основі способу лежить властивість рідких полімерів тверднути при інтерференції певних променів. Коли голографічний образ проектується на смолу, вона твердне по всьому об'єму образу.

Потрібно відзначити, що спосіб цікавий саме тим, що відтворення твердого тривимірного об'єкту з 3D CAD відбувається не пошарово, а відразу у всьому об'ємі.

LENS (Laser Engineering Net Shaping) - формування за допомогою лазерної інженерної мережі

Працюючи над цією темою, у розділі «Схема технології друку» потрібно вказати, що спосіб базується на подачі через сопло на підкладку порошку і одночасному його оплавленні променем лазера (рис. 9).



Рис. 9 – Схематичне зображення LENS способу

Сопло з порошком може бути по одну сторону з підкладкою або коаксіально з лазерним променем. Скріплення з попереднім шаром полегшується тим, що струмінь порошку оплавляється променем лазера, який підігріває одночасно і попередній шар.

LLM (Layer Laminate Manufacturing) – спосіб моделювання нашаруванням

Під час роботи над цією темою потрубно зазначити, що спосіб об'єднує групу технологій, при якій шари необхідної конфігурації вирізаються послідовно з листів раніше вже виготовленої фольги або іншого листового матеріалу за допомогою лазера, різця, фрези і одночасного (або після розрізання) з'єднання їх уздовж зрізів (або по всій поверхні). Оскільки окремі шари потрібно тільки контурувати (а не створювати), технології за способом LLM є більш продуктивними, чим більше поверхня в порівнянні з периметром шару. Опори не потрібні. Строго кажучи, технології LLM комбінують вирізання шарів і нарощування виробу за їх допомоги. У розділі «Матеріали, з яких відбувається генерація моделі, потрібно

навести використовувані матеріали – папір, синтетичні матеріали, метали, кераміка, дерево. Метали зварюються, кераміка спікається, інші склеюються.

LLM вироби дуже міцні, тому підходять для лиття в піщані форми, для точного лиття, вакуумного лиття, для піщаних спечених стрижнів, високотемпературного формоутворення.

До даної групи технологій відносять такі, як LMP – Laser Milling Process (спосіб пошарового фрезерування), SOM – Stratified Object Manufacturing (виріб складається не пошарово, а більшими частинами), а також LOM – Laminated Object Manufacturing – виготовлення шаруватих об'єктів.

Під час роботи над цією темою пропонується детально зупинитися саме на останньому методі, який набув досить широкого використання. У розділі «Схема технології друку» потрібно вказати, що LOM заснований на використанні ламінування: лазерний промінь вирізає контури перетину листового матеріалу для кожної січної площини шаруватої 3D CAD моделі. Площа розтину не сканується. Конструктивні елементи послідовно вирізаються з окремих листів клейкого паперу, фольги, пластику, металу, кераміки, композитів товщиною 50-500 мкм. Новий шар з'єднується з попереднім за рахунок прокатки термовалика (рис. 10).

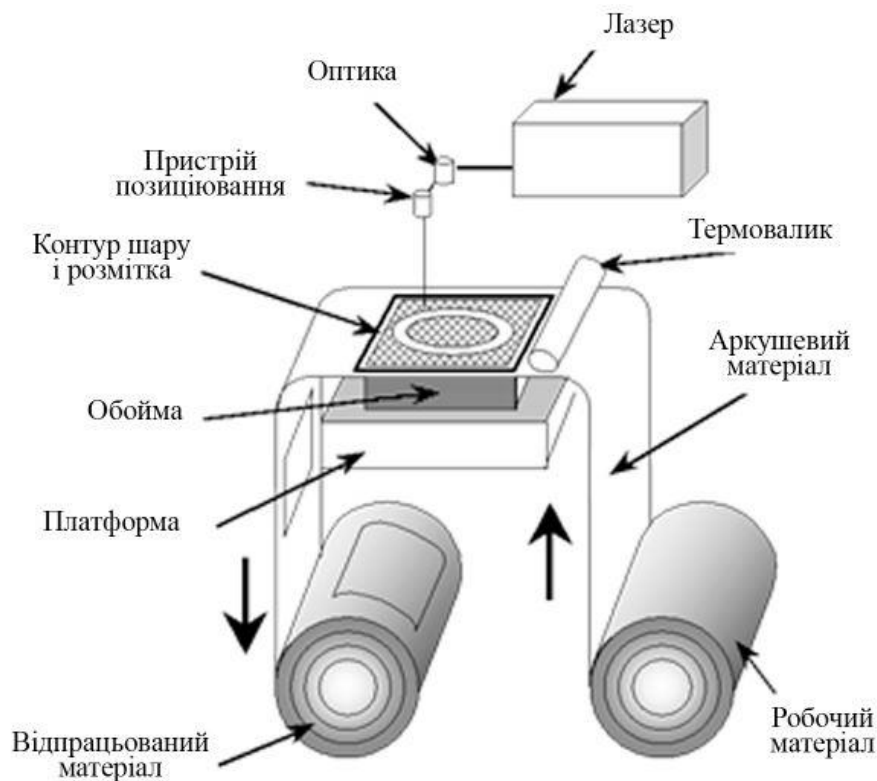


Рис. 10 – Отримання моделі нарощуванням шарового матеріалу

Вихідні дані розраховуються для кожного шару (листа фольги) у 3D форматі CAD даних відповідно конструкції і передаються в систему управління LOM установки, де і створюються за допомогою спеціального програмного забезпечення поперечним перерізом деталі. Области зайвого матеріалу розрізаються на квадрати в єдиних координатах кожного зрізу для подальшого видалення. При вирізанні контуру і розрізанні зайвих областей фольги лазер проникає тільки на певну заздалегідь розраховану глибину. У результаті нарощування вирізаних лазером перетинів з листового матеріалу формується точна тривимірна модель. Поверхні зрізів допрацьовуються (шліфуються, поліруються, фарбуються, покриваються лаком).

У розділі «Наявні пристрої та їхні характеристики» можна деталізувати інформацію про характеристики LOM систем, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристики LOM систем [3]

Модель	LOM-1015 Plus	LOM-2030H
Габарити деталі, мм	381 254 356	813 559 508
Потужність лазера, Вт	25	50
Діаметр лазерного променя, мм	0,20-0,26	0,203-0,254
Дискретність переміщення системи відтворення, мм	0,05	0,0508
Основа системи управління	Pentium	Pentium
Програмне забезпечення системи	Windows NT OS,LOMSliceTM	Windows NT OS,LOMSliceTM
Товщина шару, мм	0,08-0,25	0,076-0,254
Розміри ролика, мм	356 - ширина,	711 - ширина,
Габаритні розміри, м	356 1,23 0,74 1,31	711 0,21 1,41 1,40
Вага , кг	454	1 288
необхідна потужність	220x15 В А	220x30 В А
Вимоги до атмосфери	Температура 20-27°C Вологість <50%	Температура 20-27°C Вологість <50%

Завдяки використанню недорогих листових матеріалів LOM вироби відрізняються надійністю, міцністю, стійкістю до деформацій і відносно невисокою вартістю.

Переваги методу: лазерний промінь вирізає тільки контури перетину, тобто розкроює листи і не впливає на матеріал всередині перетину, тим самим зберігаючи його початкові властивості, виключаючи фізико-хімічні перетворення, значну усадку і деформації матеріалу; можливість вибору нетоксичних і дешевих матеріалів; немає необхідності в технологічних підпорах; установки відносно дешеві, легко керовані, компактні, швидко освоюються персоналом.

До недоліків можна віднести наступне: спосіб має обмеження по складності конструкції виробу, оскільки для складнопрофільних моделей утруднене, а часом і неможливе видалення зайвого матеріалу. З цим пов'язані і великі можливі втрати

матеріалу. При видаленні відходів можливе пошкодження моделі. Є небезпека розшарування моделі при доопрацюванні поверхні для зниження шорсткості.

MJM (Multi Jet Modeling) – Багатоструменеві відтворення

Під час роботи над цією темою у розділі «Схема технології друку» потрібно навести інформацію про те, що за цим способом модель будується з використанням техніки, схожої зі струменевим друком на звичайному принтері, але в трьох вимірах. Робочий орган - «друкуюча головка» - включає 352 сопла, можливо до 1536, що створюють лінійну решітку: струмінь з кожного сопла осаджує спеціально розроблений термополімерний матеріал там, де він необхідний по керуючій програмі. Головка MJM рухається зворотно-поступально по осі X , формуючи шар. Після завершення побудови першого шару платформа опускається по осі Z на величину, рівну його товщині, і починається формування наступного шару (рис. 11).

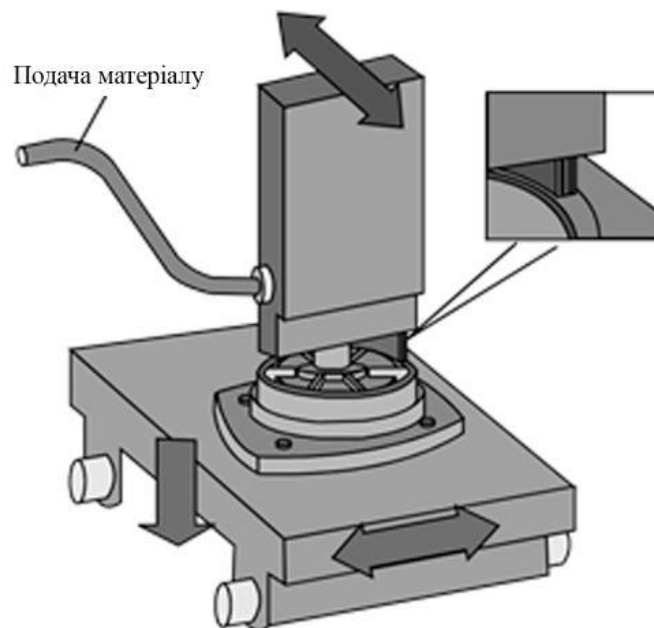


Рис. 11 – Схематичне зображення MJM способу

MJS (Multiphase Jet Solidification) - затвердіння багатофазного струменю

Розглядаючи цю тему, у розділі «Схема технології друку» потрібно навести інформацію про те, що опрацьований матеріал гріється в камері розтоплення до

температури плавлення і пропускається через форсунку. Управління температурою погоджено при цьому так, щоб розплавлений матеріал покривав поверхню необхідним шаром.

Спосіб заснований на утворенні шару за допомогою системи форсунки, яка розподіляє матеріал, який розтоплюється, по поверхні. Є схожість з FDM способом. Істотна відмінність - подача вихідного матеріалу і сам вихідний матеріал.

При MJS – способі виробу виготовляються з низькоплавких металевих сплавів, а також з високоякісної сталі, титану, кераміки внаслідок обробки порошкоподібних сумішей. У кожному разі опрацьований матеріал нагрівається до температури, близької до температури плавлення, і, під керуванням комп'ютером, через форсунку видавлюється. Матеріал застигає протягом декількох секунд. Коли матеріал ще гарячий, він розігріває поверхню попереднього шару і таким чином здійснюється нероз'ємне з'єднання шарів.

Потрібно зазначити у роботі, що при виготовленні виробів з низькоплавких матеріалів продуктом можна користуватися відразу. При використанні порошкоподібних матеріалів виріб необхідно додатково обробляти. Обробка порошкоподібних матеріалів знаходить застосування при використанні сплавів, які плавляться при високій температурі, і керамічних матеріалів (температура плавлення 1300°C).

RMPD (Rapid Micro Product Development) – швидке виготовлення мікровиробів

Працюючи над цією темою, у розділі «Схема технології друку» потрібно зазначити, що цей спосіб базується на використанні масок, застосовуваних у мікроелектроніці (схожість з фотополімеризацією). Дані про CAD моделі застосовуються для виготовлення масок. Маски використовують для лазерної полімеризації рідкого фотомономера, який пошарово наноситься. Мінімальна товщина шару

- 1 мкм, роздільна здатність його по осях X - Y становить 10 мкм. Спосіб ефективний при створенні складних мікросистем, які об'єднують компоненти електроніки, оптики, механіки.

SGC (Solid Ground Curing) - затвердіння щільної основи

При розгляді цієї теми у розділі «Схема технології друку» потрібно вказати, що цей спосіб ґрунтується на принципі фотополімеризації. На відміну від способу, при якому поверхня шару сканується променем лазера, тут необхідна експозиція забезпечується за допомогою маски і ультрафіолетової лампи.

Виходячи з опису геометрії деталі в STL-форматі, проводиться створення необхідної геометрії виробу через взаємодію двох роздільно існуючих циклів. У першому відбувається виготовлення маски-негативу, яка служить як літографічна структура для процесу експозиції. У власне формоутворенні бере участь, насамперед, шар тонкого рідкого полімеру, який накладається на носій. Після експозиції на заздалегідь створену маску наноситься фотомономер і відбувається його нарощування. Після охолодження воску проводиться опускання шару на певну товщину, як правило, 0,15 мм, потім починається цикл освітлення оновленням воскової маски і нашаруванням рідкого фотомономера. Використання воску є характерним для SGC, він використовується як опорна конструкція. На окремому етапі затвердіння після експозиції маски забезпечується повне затвердіння фотополімеру. Надалі відбувається процес вилучення виробу з воскової форми і очищення його поверхні з використанням лимонної кислоти.

У розділі «Наявні пристрої та їхні технічні характеристики» потрібно деталізувати характеристики SGC систем, наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Характеристики SGC систем [4, 5]

Модель	SGC 4600	SGC 5600
Робочий об'єм, мм	350x350x350	500x350x 500
Роздільна здатність, мм	0,084	0,084
Товщина шару, мм	0,15	0,1 0,2
Мінімальний розмір деталі, мм	0,4	0,4
Продуктивність, см ³ /год	164	426
Швидкість побудови, с/шар	120	70
Основа системи управління	Unix	Unix

TDP (Three Dimensional Printing, 3D Printing) – тривимірний друк

У розділі «Суть технології» потрібно вказати, що цей спосіб заснований на принципі трикоординатного глибокого друку. За допомогою 3D принтерів виготовляють фізичні моделі, використовуючи струйне моделювання. У розділі «Схема технології друку» потрібно зазначити, що шар порошку розподіляється по поверхні рухомої платформи в робочій ємності. Потім сполучна речовина, яка надходить з багатосоплової головки, пов'язує ті області порошку, які формують контур і площу одного перетину моделі. Платформа в ємності опускається на товщину одного шару. По всій робочій поверхні ємності (включаючи скріплений шар) розподіляється шар порошку (рис. 12), головка окреслює контур наступного перетину і заповнює його площу і т.д.

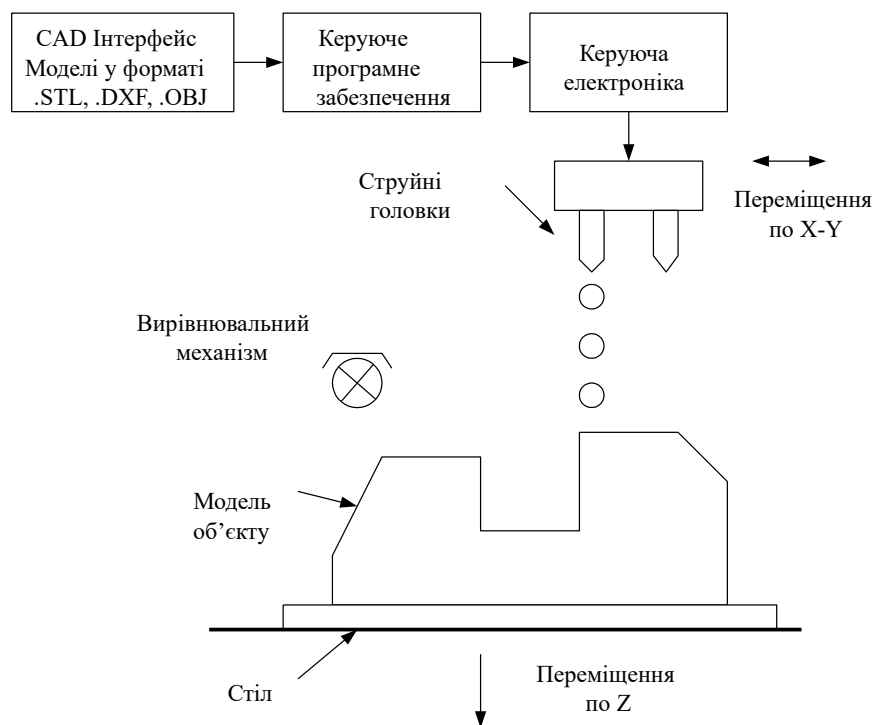


Рис. 12 – Технологія побудови деталі 3D принтером

У розділі «Наявні пристрої та їхні технічні характеристики» потрібно надати інформацію про те, що існують численні варіанти установок, які реалізують цей спосіб. Установки відрізняються застосовуваними матеріалами (вихідними і сполучними), розходженням допоміжних елементів – підтримок, механізмом затвердіння, кількістю використовуваних сопел, точністю виготовлення, робочим об'ємом. Зокрема, установка Object Quadra Tempo має 1536 сопел, тоді як установка Z402 всього лише 128. Хоча 3D принтери не дають високої точності і міцності готового прототипу, механічних властивостей їх досить для задач візуалізації, відпрацювання дизайну. Установки компактні - можливо їх розміщення у робочому місці конструктора. Деталь, в залежності від складності та габаритів, може бути виготовлена протягом декількох хвилин або декількох годин. Застосовувані матеріали - мінерали, крохмаль, кераміка, целюлоза, полістирол.

Розглянута технологія дозволяє більш ефективно вирішувати завдання концептуального проектування, візуалізації, швидкого і недорогого отримання прототипів, оригіналів, майстер-моделей, натурних моделей, форм для вакуум-фор-

мування та ін. Технологія також успішно застосовується для пошарового виготовлення таблеток, медичних препаратів (20000 таблеток в годину), а також для виготовлення структури кісток, сухожиль, хрящів, імплантантів з використанням живих клітин і біоматеріалів.

Гібридні технології пошарового вирощування

Під час роботи над цією темою потрібно розуміти, що під гібридними технологіями розуміються такі, які мають генеративні і не генеративні властивості. Наприклад, в техніці **LLM** використовують ріжучий інструмент (різець, фреза, дріт) для того, щоб з листового матеріалу вирізати одиничний шар, який використовується для нарощування виробу. Гібридні технології базуються на використанні верстатів (фрезерних), оснащених генеративним модулем. Сюди можна віднести **CMB (Controlled Metal Build Up)** – лазерне зварювання шарів. Назва означає селективне лазерне зварювання шарів дросиком. На виробі близько один від одного знаходяться наплавлені валики (шви) так, що утворюються тонкі шари. Стандартний присадний дріт пошарово розплавляється за допомогою діодного лазера, розплавлений метал затримується в своєрідних невеликих ванночках. Кожен шар можна фрезерувати з високими швидкостями. Модуль для лазерної генеративної наплавлення входить в комплект фрезерного верстата. Після формування з кожного шару вифрезерується необхідний контур. При цьому забезпечується висока якість обробленої поверхні і щільність наплавленого матеріалу.

Верстат зчитує **CTL**-дані повністю і безпомилково. Software дозволяє прораховувати геометрію траєкторії і дані для управління лазером і подачею зволікання.

У **CMB**-установці на осі Z монтується пересувна платформа для фрезерного шпинделя, на якій розташований діодний лазер і механізм подачі дроту. Процес відповідає класичному процесу лазерного зварювання, використовуються всі стандартні види зварювального дроту з різних матеріалів.

Призначення способу – локальне застосування для швидкого і економічного ремонту, удосконалення інструменту, штамів, форм для лиття під тиском, виготовлення механічних деталей.

Спосіб UCS (Ultrasonic Consolidation Solidica) – нашарування і ультразвукове зварювання базується на наварці шарів смугами і обробці цих шарів фрезеруванням. Товщина створюваного шару – до 0,1 мм.

На першому етапі алюмінієвий лист розкочується на поверхні виробу. Другий етап – здійснюється притиснення листа до нерухомої деталі за допомогою вібруючого хвилеводу – концентратора. За рахунок високої частоти і невеликої амплітуди очищають поверхню, а потім приварюють за рахунок дії незначного тиску і великої амплітуди. Зв'язування здійснюється через текучість матеріалу в зовнішньому шарі. Лист вирізається з невеликим виступом і наварюється наступна канавка, поки не утвориться цілий шар. Контуровання здійснюється торцевою фрезою (2D). Процес триває пошарово, від 3 до 6 мм. Обидві стадії процесу чергуються, поки деталь не буде готова. Складне становище викликає наявність внутрішніх порожнистих просторів. У такому випадку для заповнення порожнин використовують полімерний матеріал, який вимивається в ході технологічного процесу.

Застосовують фрезерний верстат з вмонтованою установкою ультразвукового зварювання для наплавлення і окантування раніше виготовлених алюмінієвих стрічок. Фрезерна головка і зварювальна установка рухлива x-напрямку і встановлена на підставі.

Зварювальна установка містить котушку з алюмінієвим листом, установку для розклатки і пресування, ультразвукову головку, волновод-концентратор для зварювання одиничного валика з наполовину готовою деталлю. Швидкість зварювання становить до 2,5 м / хв. Фрезерування сухе (обробка алюмінію). Верстат має обдувочний пристрій для здування обрізків листа і тирси. Товщина алюмінієвого листа - 0,1 мм, ширина - 25 мм. Можлива обробка сталевих листів. Точність

обробки ± 0.05 мм. Продуктивність - 12,5 мм / год. Можливо виготовлення структур з вбудованими датчиками, електронними деталями, батарейками і т. ін. Процес можна перериватись і запускати на будь-якому етапі виготовлення, що полегшує вмонтовування будь-яких вставок.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОБОТИ

Оформлення роботи виконується за допомогою програмного забезпечення, призначеному для роботи з текстовою інформацією, та відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлювання».

До оформлення роботи висуваються такі вимоги:

- формат сторінки – А4 (210×297 мм);
- орієнтація сторінки – книжкова (вертикальна);
- розміри полів: ліве, верхнє, нижнє – 20 мм, праве – 15 мм;
- шрифт – Times New Roman;
- розмір шрифту – 14 пт;
- міжрядковий інтервал – 1,5;
- вирівнювання: основний текст – по ширині сторінки, назви розділів, таблиць, рисунків – по центру;
- нумерація – наскрізна, арабськими цифрами, у правому верхньому куті сторінки, на титульному аркуші номер сторінки не ставиться.

Структурні елементи роботи розміщуються у такій послідовності:

- титульний аркуш;
- зміст;
- вступ;
- розділи роботи;
- висновки;
- перелік посилань;

- додатки (за необхідності).

Рекомендований обсяг розрахунково-графічної роботи – 10-25 сторінок друкованого тексту.

Назви розділів виконуються прописними літерами, крапка в кінці не ставиться. Розділи та підрозділи роботи нумерують.

Таблиці, рисунки та формули розміщують після тексту, в якому вони вперше згадуються (наприклад, «На рис. 1.1 наведено схему офсетної аркушевої друкарської машини» або «У табл. 1.1 надано технічні характеристики офсетної аркушевої друкарської машини»). Усім таблицям повинні передувати відповідні заголовки (наприклад, «Таблиця 1.1 – Технічні характеристики офсетної аркушевої друкарської машини»). Після усіх рисунків мають бути розміщені підписи (наприклад, «Рисунок 1.1 – Схема фарбового апарату офсетної аркушевої друкарської машини»). Заголовки таблиць та підписи є вирівняними по центру та не відірвані від таблиці/рисунку. Таблиці, рисунки та формули нумерують у межах розділів. Номер формули розміщують у круглих дужках в кінці рядка, на якому знаходиться формула (наприклад, «(1.1)»).

Посилання на використані джерела розміщують у тексті у вигляді порядкового номера джерела у переліку посилань, взятого у квадратні дужки (наприклад, “[1]”, “[2-3]”, “[5,8,12]”).

Перелік посилань має наскрізну нумерацію та оформлюється згідно з «ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання». Джерела розміщуються у послідовності, у якій вони згадуються в тексті роботи. Робота має містити принаймні 5 літературних джерел.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Величко О. М. Видавничо-поліграфічна справа. Практикум з проектування і розрахунку технологічних і виробничих процесів / Олена Величко : навч. посіб.; М-во освіти і науки України. — К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2009. — 520 с.
2. Грабченко А.І., Доброскок В.Л. Сучасні технології матеріалізації комп'ютерних моделей: Навч. посібник. — Х.: НТУ "ХПІ", 2009. — 86 с.
3. Marak, Z. R., Tiwari, A., & Tiwari, S. (2019). Adoption of 3D printing technology: an innovation diffusion theory perspective. *International Journal of Innovation*, 7(1), 87-103.
4. Chee Kai Chua, Kah Fai Leong, and Chu Sing Lim. 3D Printing and Additive Manufacturing Principles and Applications. 2014. DOI:10.1142/9008. ISBN: 978-981-4571-40-1
5. Paulo Jorge Bártolo. Stereolithography: Materials, Processes, and Applications. 2011. DOI:10.1007/978-0-387-92904-0. ISBN: 978-0-387-92903-3
6. Pham, D. T., & Gault, R. S. (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of machine tools and manufacture*, 38(10-11), 1257-1287.
7. Gebhardt, A. (2011). Understanding additive manufacturing.
8. Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
9. Degnan, M. (2017). *3D Printing Techniques and Processes*. Cavendish Square Publishing, LLC.
10. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., ... & Khorasani, M. (2021). Material jetting. *Additive Manufacturing Technologies*, 203-235.

11. Singla, G. (2016). 3D Printing: Innovative Technology towards New Horizons. *International Journal of Science, Engineering and Computer Technology*, 6(2), 158-160.
12. Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873-3882.
13. Zacharias, J. (2022, July). Comparison of Additive Manufacturing and Traditional Manu-facturing. In *The 2nd Advanced Manufacturing Student Conference (AMSC22) Chemnitz, Germany 07–08 July 2022* (Vol. 7, p. 55).
14. Turner, M. (2015). The current state, outcome and vision of additive manufacturing. *Journal of Welding and Joining*, 33(6), 1-5.
15. Kruth, J. P., Levy, G., Schindel, R., Craeghs, T., & Yasa, E. (2008). Consolidation of polymer powders by selective laser sintering. In *Proceedings of the 3rd international conference on polymers and moulds innovations* (pp. 15-30).
16. Kumar, M. B., Sathiya, P., & Varatharajulu, M. (2021). Selective laser sintering. *Advances in additive manufacturing processes. China: Bentham Books*, 28-47.
17. Spencer, J. D., Dickens, P. M., & Wykes, C. M. (1998). Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 212(3), 175-182.
18. Pinkerton, A. J. (2015). Advances in the modeling of laser direct metal deposition. *Journal of laser applications*, 27(S1), S15001.
19. Lewis, G. K., & Schlienger, E. (2000). Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition. *Materials & Design*, 21(4), 417-423.
20. Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in manufacturing*, 3, 42-53.

21. Chennakesava, P., & Narayan, Y. S. (2014, December). Fused deposition modeling-insights. In *Proceedings of the international conference on advances in design and manufacturing ICAD&M* (Vol. 14, p. 1345).
22. Carneiro, O. S., Silva, A. F., & Gomes, R. (2015). Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design*, 83, 768-776.
23. Izadi, M., Farzaneh, A., Mohammed, M., Gibson, I., & Rolfe, B. (2020). A review of laser engineered net shaping (LENS) build and process parameters of metallic parts. *Rapid prototyping journal*, 26(6), 1059-1078.
24. Atwood, C., Griffith, M., Harwell, L., Schlienger, E., Enszt, M., Smugeresky, J., ... & Reckaway, D. (1998, November). Laser engineered net shaping (LENSTM): A tool for direct fabrication of metal parts. In *International congress on applications of lasers & electro-optics* (Vol. 1998, No. 1, pp. E1-E7). Laser Institute of America.
25. Hofmeister, W., Wert, M., Smugeresky, J., Philliber, J. A., Griffith, M., & Enszt, M. (1999). Investigating solidification with the laser-engineered net shaping (LENSTM) process. *Jom*, 51(7), 1-6.
26. Mohan Pandey, P., Venkata Reddy, N., & Dhande, S. G. (2003). Slicing procedures in layered manufacturing: a review. *Rapid prototyping journal*, 9(5), 274-288.
27. Kitsakis, K., Moza, Z., Iakovakis, V., Mastorakis, N., & Kechagias, J. (2015, October). An investigation of dimensional accuracy of multi-jet modeling parts. In *Proceedings of the International Conference in Applied Mathematics, Computational Science and Engineering*, Crete, Greece (pp. 17-19).
28. Kamble, P., Chavan, S., & Karunakaran, K. P. (2018). Multi-jet fluid deposition in 3D printing: a review.
29. Kupp, D., Eifert, H., Greul, M., & Kunstner, M. (1997). Rapid prototyping of functional metal and ceramic components by the multiphase jet solidification (MJS) process. In *1997 International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
30. Greulich, M., Greul, M., & Pintat, T. (1995). Fast, functional prototypes via multiphase jet solidification. *Rapid Prototyping Journal*, 1(1), 20-25.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. High-speed stereolithography solution for production manufacturing. URL: <https://www.3dsystems.com/3d-printers/sla-750>
2. FDM 3D Printers. URL: <https://www.stratasys.com/uk/3d-printers/printer-catalog/fdm-printers/>
3. What is laminated object manufacturing (LOM). URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-laminated-object-manufacturing-lom>
4. Solid Ground Curing (SGC) by Cubital. URL: <https://galraz.wixsite.com/il-am-industry/solid-ground-curing-sgc-by-cubital>
5. Zhang, X., Zhou, B., Zeng, Y., & Gu, P. (2002). Model layout optimization for solid ground curing rapid prototyping processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 18(1), 41-51.