

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

В. М. Доля, О.О. Клочко

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ У РЕВЕРСНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ

Навчальний посібник
для магістрів спеціальності
G09 «Прикладна механіка» денної та заочної форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХПІ»,
протокол № 3 від 30.10.2025 р

Харків
НТУ «ХПІ»
2025

УДК 621.762

Д76

Рецензенти:

О.А. Охрименко, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Л.Я. Роп'як, д-р техн. наук, с.н.с., Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Доля В.М.

Д76 Адитивні технології у реверсній інженерії: навчальний посібник / В. М. Доля, О. О. Клочко. – Харків : НТУ «ХП», 2025. – 163 с.

ISBN

Розглянуто основні етапи реверсної інженерії: вивчення конструкції прототипу деталі, яку необхідно відновити, або поліпшити; методи та засоби збирання інформації про геометричні параметри виробу; обробка результатів сканування; сучасні адитивні технології (прикладні обладнання, принципи роботи, особливості застосування, витратні матеріали) виготовлення виробів у найбільш поширених галузях виробництва.

Призначено для студентів галузі знань «Механічна інженерія» денної та заочної форм навчання, а також може бути корисним спеціалістам та особам, що займаються виготовленням прототипів деталей методами адитивних технологій.

Іл. 111. Бібліогр. 199 назв.

УДК 621.762

ISBN

© Доля В. М., Клочко О.О., 2025

© НТУ «ХП», 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. Основні поняття про реверсну інженерію.....	6
1.1. Загальні відомості.....	6
1.2. Основні етапи зворотного проектування.....	12
1.3. Способи створення цифрової 3D CAD-моделі	13
1.4. Области застосування реверсної інженерії	16
1.5. Етичні та правові норми реверсної інженерії.....	19
Питання для самоперевірки.....	20
2. Сканування.....	21
2.1. Контактний метод сканування.....	21
2.2. Безконтактний метод сканування.....	22
2.2.1. Пасивні 3D сканери.....	22
2.2.2. Активні 3D сканери.....	24
Питання для самоперевірки.....	43
3. Координатно-вимірювальні машини.....	44
3.1. Принцип роботи КВМ.....	44
3.2. Типи координатно-вимірювальних машин.....	45
3.3. Класифікація КВМ за ступенем автоматизації.....	48
3.4. Технології вимірювання.....	49
3.5. Конструктивні рішення КВМ	51
3.6. Складові частини КВМ.....	57
3.7. Застосування КВМ в промисловості.....	59
Питання для самоперевірки.....	60
4. Адитивні технології.....	61
4.1. Загальні відомості про адитивні технології.....	61
4.2. Селективне лазерне плавлення (SLM).....	65
4.3. Метод пошарового наплавлення матеріалу (FDM).....	71
4.4. Метод прямої екструзії гранул полімеру (FGF).....	79
4.5. Лазерна стереолітографія (SLA).....	85
4.6. DLP/LCD-стереолітографія.....	90
4.7. Селективне лазерне спікання (SLS).....	94
4.8. Багатоструменевий 3D-друк (MJP).....	107
4.9. Струменевий друк сполучною речовиною (Binder Jetting).....	112
4.10. Повнокольоровий 3D-друк (CJP).....	116
4.11. Пряма лазерна наплавка (DED).....	120

4.12.	LENS (Laser Engineered Net Shaping) – формування за допомогою лазерної інженерної мережі.....	123
4.13.	DMD (Direct Metal Deposition) – пряме нанесення металу.....	132
4.14.	3DW (Three Dimensional Welding) – тривимірна наплавка (зварювання).....	133
4.15.	WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – дротяно-дугове адитивне виробництво.....	135
4.16.	BPM (Ballistic Particle Manufacturing) – виготовлення з використанням балістики частинок.....	137
4.17.	PJM/MJM (Poli/Multi Jet Modeling) – одноструменеве/багатоструменеве відтворення.....	138
4.18.	LLM (Layer Laminate Manufacturing) – спосіб моделювання нашаруванням.....	141
	Питання для самоперевірки.....	143
	Література.....	146

ВСТУП

Сучасне виробництво базується на широкому застосуванні цифрових технологій, коли на всьому життєвому циклі роботи виробу використовуються моделі, що характеризують геометричну форму виробу, його точність, вимоги до шорсткості поверхонь, способи виготовлення і навіть методи утилізації кожного конкретного виробу. Найчастіше застосовується пряме проектування моделі за кресленням (розробка у САД-програмі). Однак у деяких випадках при створенні нових і реставрації існуючих виробів зручно використовувати вже наявний натурний зразок, якщо потрібно швидко отримати відповідну 3D-модель для дублювання зразка або виготовлення виробу із зміненою формою та розмірами. Для таких ситуацій застосовують терміни «швидке прототипування» та «реверсивна технологія». При цьому поняття «прототип» застосовується ширше. Завдання реверсивних технологій, тобто, отримання прототипу виробу у максимально короткі терміни, залишається одним із актуальних завдань сучасного виробництва. Слід зазначити, що весь комплекс відновлювальних робіт – сканування зразка, перетворення його на твердотільну модель і виготовлення прототипу – вимагає великих знань, великої працьовитості та наявності відповідного обладнання. У навчальному посібнику надані основні етапи реверсної інженерії: вивчення та отримання 3D САД моделі з існуючого прототипу деталі (сканування виробу – показані сучасні методи та засоби отримання масиву тріангуляційних точок 3D САД моделі деталі); надані приклади виготовлення реальних об'єктів, що створювалися методом реверсної інженерії в центрі високих технологій навчально-науково-виробничого об'єднання при кафедрі «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семко НТУ «ХП»; надані методи отримання готових виробів за допомогою адитивних технологій – представлені основні сучасні адитивні установки та розкриті особливості отримання готових виробів на цих установках.

1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО РЕВЕРСНУ ІНЖЕНЕРІЮ

1.1. Загальні відомості

Зворотна розробка (зворотне проектування, зворотний інжиніринг, реверс-інжиніринг – дослідження деякого готового пристрою або програми, а також документації на нього з метою зрозуміти принцип його роботи; наприклад, щоб виявити недокументовані можливості (у тому числі програмні закладки), зробити зміну або відтворити пристрій.

Застосовується зазвичай у тому випадку, якщо творець оригінального об'єкта не надав інформації про структуру та спосіб створення (виробництва) об'єкта. Правовласники таких об'єктів можуть заявити, що проведення зворотної розробки або використання її результатів порушує їх виняткове право за законом про авторське право та патентне законодавство.

Реверс-інжиніринг (reverse-engineering, реінжиніринг) – процес копіювання об'єкта за вже готовим зразком, спосіб отримання 3D-моделей і креслень готового виробу за даними 3D-сканування.

СРСР широко використовував безліцензійне (піратське) копіювання західних конструкцій, технологій, електроніки та програмного забезпечення.

Відомі приклади наведені на рис. 1.1 – рис. 1.6.

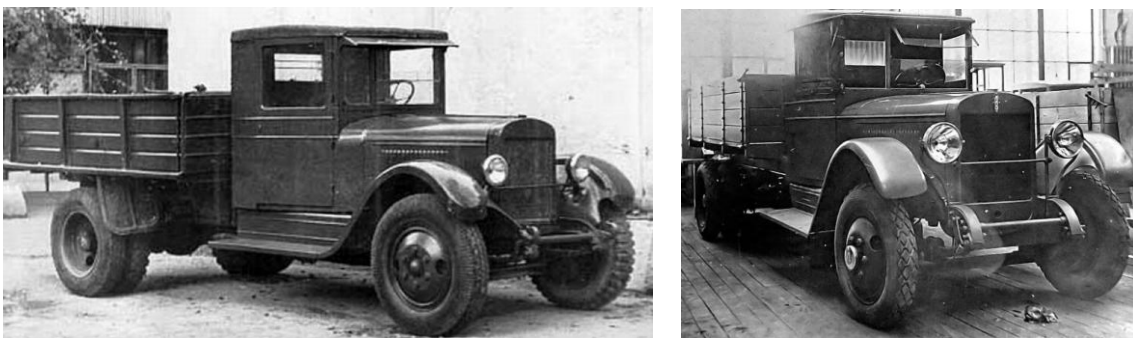


Рисунок 1.1 – Радянська вантажівка АМО-3 (зліва)
і американська вантажівка AutoCar-SA (справа)

Радянська вантажівка АМО-3 була практично повною копією американської вантажівки «AutoCar-SA».

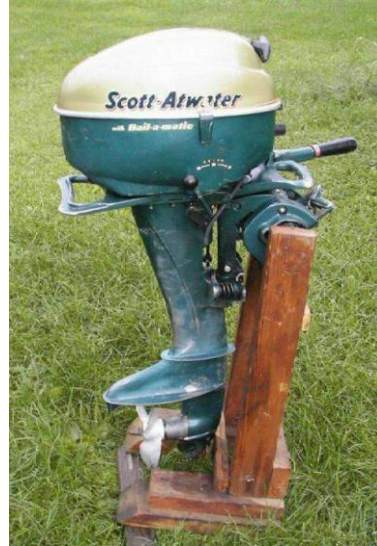


Рисунок 1.2 – Радянський човновий мотор "Москва"(зліва)
і американський мотор ScottAtWater (справа)

Радянський човновий мотор "Москва" був практично повною копією дуже вдалого американського мотора ScottAtWater.

Приклад невдалого вибору прототипу для зворотної розробки – радянський човновий мотор «Вихор», копія німецького мотора Koening.

Практично всі бензинові двигуни, встановлені на мотоблоках, генераторах та інших малогабаритних машинах китайського виробництва – копії японських моторів Honda GX.



Рисунок 1.3 – Китайський позашляховик Admiral (зліва)
і Японський Toyota Hilux Surf (справа)

Перші китайські позашляховики Admiral, Great Wall та інші – неліцензійні практично точні копії позашляховика Toyota Hilux Surf.

Відомими прикладами зворотної розробки у військовій промисловості були:



Рисунок 1.4 – Радянський бомбардувальник «Туполєв Ту-4» (зліва)
і американський бомбардувальник В-29 (справа)

Туполєв Ту-4 – кілька американських бомбардувальників В-29 при здійсненні вильотів до Японії здійснили вимушену посадку в СРСР. Радянські військові, які не мали подібних стратегічних бомбардувальників, вирішили скопіювати В-29. Через кілька років вони розробили Ту-4, практично його повну копію. У той же час двигуни, озброєння і радіоелектронне обладнання Ту-4 не були копіями відповідних систем В-29.



Рисунок 1.5 – Радянський тепловоз ТЕ1 (зліва)
і американський RSD-1 (справа)

Тепловоз ТЕ1 – в 1945 році тепловоз RSD-1 (постачався в СРСР по ленд-лізу) привів літерний поїзд Сталіна на Потсдамську конференцію. Сталін високо оцінив даний локомотив, тому в 1947 році почався випуск радянської копії американського тепловоза – ТЕ1. Незважаючи на деякі відмінності в розмірах та окремому устаткуванні, ТЕ1 виявився практично ідентичним RSD-1.

Міномети – німці у воєнні роки успішно скопіювали радянські трофейні 120-мм міномети, які взяли собі на озброєння під ім'ям Granatwerfer 42.

Автомат Калашнікова – керівництво ВАТ «Іжмаш» заявило, що близько половини всіх АК у світі – «контрафактні» (тобто, вироблені без ліцензії і передачі технологій).



Рисунок 1.6 – Німецькі каністри 1941 р. (зліва) і американські Jerry cans (справа)

Німецькі каністри для бензину – у британських та американських військах помітили, що німці мали дуже зручні каністри. Вони скопіювали ці каністри, і ті отримали назву Jerry cans (від слова "gerrys" – від "Germans").

Приклади зворотного інжинірингу у виробництві зброї:

Створення китайського винищувача J-11 на основі російського Су-27: У 1990-х роках Китай закупив російські винищувачі Су-27. Згодом, китайські інженери застосували зворотний інжиніринг для створення власного винищувача, J-11, який мав значні схожості з російською моделлю.

Розробка іранської ракети Shahab-3: Іран використав зворотний інжиніринг для розробки ракети Shahab-3 на основі північнокорейської ракети Nodong-1. Це відбулося у 1990-х роках, коли Іран отримав набір ракет Nodong-1 і почав адаптацію їх технологій для власної програми балістичних ракет.

Відтворення американської безпілотної літальної апаратури RQ-170 Sentinel Іраном: У 2011 році Іран захопив американський безпілотний розвідувальний літак RQ-170 Sentinel. За допомогою зворотного інжинірингу іранські інженери вивчили конструкцію та технології літака, що дозволило їм створити власні моделі безпілотників.

Розробка ракети V-2 нацистської Німеччини: У 1940-х роках нацистська Німеччина розробила ракету V-2, яка стала першою в світі балістичною

ракетою дальнього радіусу дії. Після закінчення Другої світової війни союзники застосували зворотний інжиніринг до V-2 для розробки власних ракетних програм, зокрема ракети R-1 у СРСР.

Зворотний інжиніринг радянського танка Т-34 у Китаї: У 1950-х роках Китай отримав радянські танки Т-34 для використання у своїй армії. Згодом китайські інженери застосували зворотний інжиніринг для створення власного танка, Туре 58, який мав схожість з радянським Т-34.

Відтворення американського гвинтівкового патрона 5,56×45мм у Китаї: У 1980-х роках Китай використав зворотний інжиніринг для створення власної версії американського гвинтівкового патрона 5,56×45 мм НАТО. В результаті було створено китайський патрон 5,8×42 мм, який надав кращі балістичні характеристики.

Реконструкція радянської ракети С-75 (SA-2) у США: У 1960 році, після збиття американського шпигунського літака U-2 над територією комуністичного СРСР, США виявили рештки ракети С-75. Застосувавши зворотний інжиніринг, американські інженери вивчили техніку та тактику використання радянських систем ППО, що допомогло покращити власні системи захисту.

Розробка індійської ракети Prithvi на основі радянської ракети R-12 (SS-4): У 1980-х роках Індія розробила власну балістичну ракету середньої дальності Prithvi, використовуючи зворотний інжиніринг радянської ракети R-12. Це дозволило Індії зробити значний крок у розвитку власної ракетної техніки.

Адаптація радянського підводного човна класу “Кіло” у Китаї: У 1990-х роках Китай отримав декілька радянських підводних човнів класу “Кіло” для своєї військово-морської флотилії. Згодом китайські інженери використали зворотний інжиніринг для створення власної версії цих підводних човнів, відомої як клас “Юань”. Це дозволило Китаю модернізувати свій підводний флот та покращити його бойові можливості.

Адаптація радянського винищувача МіГ-21 у Китаї: У 1960-х роках Китай отримав декілька винищувачів МіГ-21 від СРСР у рамках військово-технічного співробітництва між двома країнами. Проте після розриву дипломатичних стосунків між СРСР та Китаєм у 1960-х роках, китайська сторона опинилася з обмеженим доступом до нових моделей винищувачів та їх

компонентів. Відповідно, Китай використав зворотний інжиніринг для розробки власної версії МіГ-21, яка отримала назву Chengdu J-7 (або F-7 для експорту). Китайські інженери внесли ряд удосконалень у власну версію винищувача, включаючи покращення двигунів, радарів та авіоніки. В результаті, Chengdu J-7 став основним винищувачем китайської авіації на декілька десятиліть та був експортований в декілька країн, включаючи Пакистан, Бангладеш та Сирію.

Історія зворотного інжинірингу сягає глибокої давнини, коли майстри ремесел та винахідники намагалися вивчити техніки, використовувані іншими, для створення аналогічних або поліпшених продуктів. З часом цей підхід став ключовим інструментом для науковців, інженерів та дослідників у розробці нових технологій та відкритті нових можливостей.

Реверс-інжиніринг у сучасному машинобудуванні безпосередньо пов'язаний з розвитком технології тривимірного сканування об'єктів. Завдяки тривимірному сканеру весь об'єм даних про геометрію виробу може бути представлений у вигляді STL-файлу. Подальша побудова конструкторської параметричної моделі здійснюється на основі STL в спеціалізованих САПР.

У кінцевому підсумку застосування 3D-сканерів дозволяє одержувати конструкторську документацію, необхідну для виготовлення копії початкового зразка. Часто (наприклад, при копіюванні різних нескладних запчастин) конструкторська документація і зовсім не розробляється, а отриманий результат сканування відразу ж завантажується в обробний центр. Головна функція реверс-інжинірингу стосовно машинобудівної галузі – отримання конструкторської документації на деталі, вузли або інші вироби для того, щоб їх можна було відтворити і експлуатувати.

Основною метою зворотного інжинірингу є отримання знань про принципи роботи, структуру та функціональність об'єктів чи систем, з метою вдосконалення існуючих продуктів, створення нових або забезпечення сумісності між різними технологіями. Зворотний інжиніринг може також сприяти пошуку слабких місць та вразливостей у системах, що є важливим для забезпечення їх безпеки та надійності.

Крім того, зворотний інжиніринг є корисним для навчання та розвитку спеціалістів, оскільки вони можуть краще зрозуміти і вивчити техніки та методи, які використовуються в різних галузях промисловості.

1.2 Основні етапи зворотного проектування

Основні етапи зворотного проектування (рис 1.7) наступні:

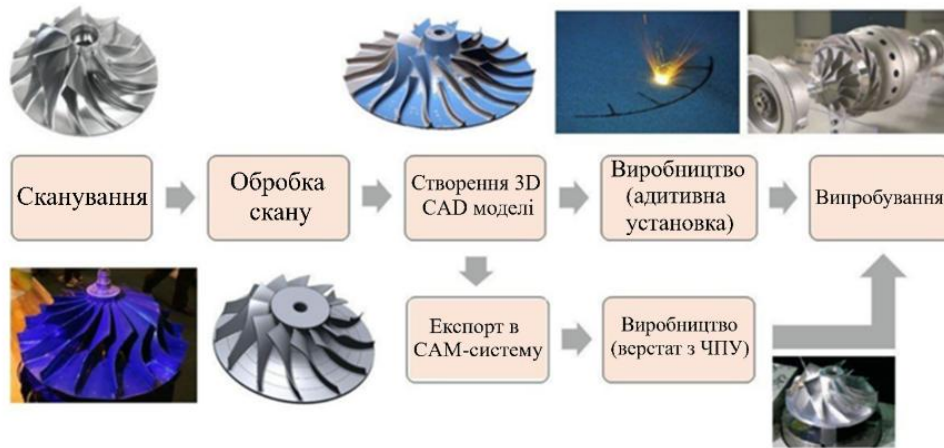


Рисунок 1.7 – Основні етапи зворотного проектування

1. Збір даних про об'єкт. На фізичному об'єкті (деталі) вимірюють усі його основні поверхні та отримують розміри цього об'єкта. Складні або багатоеlementні деталі, у тому числі несучі велику кількість навантажень, зазвичай виготовляються зі складених легованих сталей і сплавів. Багато посадкові поверхні гартуються і мають твердість, відмінну від решти всієї конструкції, тому процес дослідження первинного об'єкта повинен включати аналіз матеріалу і структурний аналіз.

2. Отримання та обробка хмари точок. В результаті 3D-сканування отримують хмару точок або полігональну модель об'єкта і виконується первинна обробка даних.

3. Створення CAD-моделі. Цифрова модель імпортується у спеціалізоване програмне забезпечення, де виробляється побудова CAD-моделі. Якщо на виробництві є 3D-принтери, цю CAD-модель можна оперативно відправити на друк та після постобробки провести випробування виробу на місці.

4. Аналіз моделі та отримання звіту. У програмному забезпеченні проводяться дослідження щодо відповідності CAD-моделі даним сканування, отриманих на першому етапі, і формується метрологічний звіт.

5. Випробування готового виробу. Після аналізу звіту приймається рішення про запуск виробничих випробувань. При необхідності CAD-модель попередньо допрацьовується.

1.3. Способи створення цифрової 3D CAD-моделі

Традиційно технології реверсивного інжинірингу тісно пов'язані з поняттям «швидке прототипування» (Rapid Prototyping). Однак термін «RP-технології» досить швидко застарів і в даний час не відображає повною мірою реальної суті технології. Методами швидкого прототипування зараз виготовляються комерційні вироби, які не можна назвати прототипами – імплантати та ендопротези, інструменти та ливарні форми, деталі літаків та супутників та багато іншого.

На етапі виконання науково-дослідної роботи необхідно швидко отримати прообраз виробу. На цьому етапі важливі відпрацювання геометрії деталі, оцінка ергономічних якостей, перевірка збирання та правильність компоновальних рішень. Тому «швидке» виготовлення деталі за «обхідною» технологією дозволяє суттєво скоротити терміни розробки виробу. Під прототипом розуміють і модель, іноді масштабну, призначену для будь-яких випробувань (наприклад, гідро- або аеродинамічних) або попередньої перевірки функціональності (наприклад, корпусні деталі приладів, радіостанцій, медичної або побутової техніки).

Велика кількість прототипів будується як пошукові дизайнерські моделі з різними нюансами в конфігурації, в колірній гамі і т. д. Одна з найважливіших переваг використання адитивних технологій полягає в тому, що вони дозволяють отримувати функціональні прототипи (дослідні зразки) без застосування дорогого технологічного оснащення.

В основі швидкого прототипування лежать тривимірні технології друку, які з'явилася наприкінці 80-х рр. XX ст. Піонером у цій галузі є компанія 3D Systems, яка розробила першу комерційну стереолітографічну машину –SLA – Stereolithography Apparatus (1986). До середини 90-х вона використовувалася головним чином у науково-дослідній та дослідно-конструкторській діяльності, пов'язаної з оборонною промисловістю. Перші лазерні машини – спочатку стереолітографічні (SLA-машини), потім порошкові

(SLS-машини) були надмірно дорогі, вибір модельних матеріалів був дуже скромний. Широке поширення цифрових технологій у галузі проектування (CAD), моделі проектування та розрахунків (CAE) та механообробки (CAM) стимулювало вибуховий характер розвитку технологій 3D-друку, і в даний час вкрай складно вказати область матеріального виробництва, де тією чи іншою мірою не використовувалися б 3D-принтери.

З точки зору швидкого прототипування основною вимогою до програмного забезпечення є можливість отримання об'ємного уявлення про деталі у векторній формі з наступним переведенням його в поверхневу модель формату STL. Побудову моделі можна виконати, використовуючи конструкторські CAD системи. При цьому зазвичай будується плоский 2D-профіль, після чого він перетворюється на об'ємний об'єкт методами витягування, повороту та ін. Однак часто потрібно швидко отримати 3D-модель наявного зразка, для якого немає вихідних креслень, а складність форми не дозволяє оперативно отримати її засобами традиційних CAD-систем. На рис. 1.8 представлені етапи створення прототипів методом 3D-друку та методи отримання моделі у форматі STL.



Рисунок 1.8 – Етапи створення прототипів

Просту модель може створити будь-який користувач, який має навички 3D-моделювання. Коли моделювання закінчено, отриманий файл переводиться в STL-формат, який розпізнається більшістю сучасних 3D-

принтерів. Для цього потрібно вибрати в меню пункт «Зберегти як» або «Import/Export» – залежно від використовуваної програми. Модель деталі в STL-форматі представлена у вигляді дрібних ділянок поверхні – фасет, які об'єднуються в цільну об'ємну поверхню, що обмежує модель у просторі. Такі моделі часто називають фасетними або триангульованими, тому що складають, як правило, трикутну форму.

Перед експортом файлу слід вказати ступінь деталізації моделі або ступінь її розбиття на трикутники. Якщо вибрати параметр "Точно", то розбиття вийде щільним, готовий файл займе досить багато місця на жорсткому диску комп'ютера і буде довше оброблятися спеціальним програмним забезпеченням, зате на виході користувач отримає об'єкт з високоякісною поверхнею. Якщо вибрати параметр «Грубо», то розбиття вийде менш щільним або зовсім нещільним, готовий файл займе на жорсткому диску менше місця і буде швидше оброблятися у спеціальній програмі, а й якість зовнішніх поверхонь буде значно нижче, ніж при точному розбитті.

При виборі способу розбиття об'єкта необхідно враховувати вимоги до якості його зовнішньої поверхні, а також потужність персонального комп'ютера та його здатність впоратися з обробкою моделі перед відправкою на друк.

На рис. 1.9 показано, як шорсткість поверхні безпосередньо залежить від якості створення сітки.

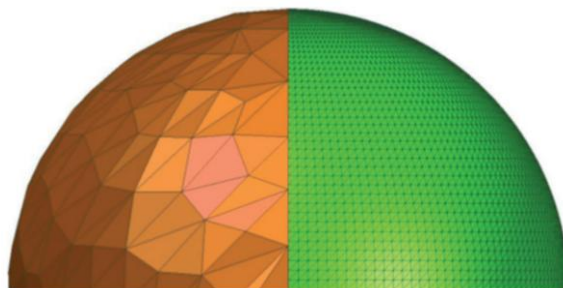


Рисунок 1.9 – Модель кулі: зліва – низької якості, справа – високої

Для реверсивної технології 3D-моделі будуються методом сканування зразка контактним або безконтактним способом. 3D-сканування передбачає просто збирання інформації, яку треба обробити. «Сирі» дані не дають жодного практичного результату.

Є два завдання: контроль геометрії та зворотне проектування (реверс-інжиніринг). Це два абсолютно незалежні процеси, і ними зазвичай займаються різні фахівці. Контролем геометрії займаються відділи перевірки якості виробу. Зворотне проектування – місія конструкторського відділу. Його застосовують, якщо необхідно відмасштабувати або змінити геометрію виробу, а конструкторська документація відсутня. Об'єкт сканується, і на основі даних сканування отримують САD-модель, яку можна редагувати, тобто зворотне проектування – це переведення матеріального об'єкта на цифрову форму. Але це не тільки запозичення, а й можливість перенести зроблений вручну об'єкт у креслення.

1.4. Области застосування реверсної інженерії

Технологія зворотного інжинірингу має наступні області застосування:

1. Машинобудування (на етапі проектування, для створення тривимірних моделей, майстер-моделей; у виробництві, для контролю точності виробів, проведення вимірювань геометричних параметрів інструменту і подальшої корекції інструменту; для створення моделі виробу і проведення подальших аеродинамічних випробувань; для зберігання цифрових копій виробів, інструменту і оснастки для забезпечення можливості їх зміни, ремонту або повторного відтворення).

2. Будівництво та архітектура (для створення тривимірних моделей будівель, вулиць, рельєфу, монтажних робіт, контролю стану споруд в період експлуатації).

3. Гірнична промисловість (для 3D-моделювання відкритих кар'єрів і підземних виробок, визначення обсягів виробок і складів, маркшейдерського супроводу буропідривних робіт, будівництва і проектування об'єктів облаштування родовищ).

4. Нафтогазова промисловість (для 3D-моделювання родовищ, продуктопроводів, геометричного контролю резервуарів, проектування об'єктів облаштування родовищ).

5. Енергетика (для сканування кабелів, опорних конструкцій, створення 3D-моделей монтажних робіт, контролю стану об'єкта).

6. Культура і мистецтво (для зберігання цифрових копій скульптурних композицій і барельєфів; створення сувенірів; відтворення втрачених культурних цінностей, реставраційних робіт).

7. Біометрія (для ідентифікації особи за тривимірною моделлю особи).

8. Комп'ютерні ігри та створення спецефектів.

9. Проектування одягу та взуття.

10. Медицина (для протезування, планування операцій, ортопедії, пластичної хірургії, косметології) і т. д.

Зворотний інжиніринг широко використовується в різних галузях промисловості, забезпечуючи цінні знання та можливості для поліпшення продуктів, процесів та технологій. Ключові індустрії, в яких застосовується зворотний інжиніринг:

Технології та розробка програмного забезпечення: Зворотний інжиніринг дозволяє аналізувати вихідний код програмних продуктів, сприяючи поліпшенню або сумісності програмного забезпечення.

Механічна і виробнича інженерія: В цій сфері зворотний інжиніринг допомагає дослідити конструкції механічних пристроїв, виявити принципи роботи та виявити можливості для поліпшення.

Електроніка та схемотехніка: Зворотний інжиніринг дозволяє аналізувати архітектуру та компоненти електронних систем з метою оптимізації їх функціональності.

Кібербезпека та комп'ютерна криміналістика: Застосування зворотного інжинірингу для аналізу зловмисного програмного забезпечення допомагає виявити та усунути потенційні загрози для комп'ютерних систем.

Біомедичні та фармацевтичні дослідження: Зворотний інжиніринг застосовується для розшифровки структури білків з метою розробки нових лікарських засобів та відкриття нових напрямків досліджень.

Реальні приклади застосування зворотного інжинірингу в різних галузях:

Аналіз шкідливого програмного забезпечення для поліпшення кібербезпеки: Експерти з кібербезпеки використовують зворотний інжиніринг для розбору вірусів та інших шкідливих програм, що дозволяє зрозуміти їхню структуру, функціонування та вразливості, що сприяє розробці ефективних заходів щодо захисту.

Дослідження продуктів конкурентів для конкурентного аналізу: Зворотний інжиніринг дозволяє компаніям розібрати продукти своїх конкурентів, щоб зрозуміти, як вони працюють, виявити їх сильні та слабкі сторони, та використати ці знання для власного розвитку.

Відтворення та поліпшення застарілих систем у виробництві: Зворотний інжиніринг допомагає компаніям відновити застарілі системи, відновлюючи втрачені або відсутні документи, специфікації чи деталі конструкції, а також поліпшити їх за допомогою новітніх технологій.

Розшифровка структури білків для розробки ліків: Використовуючи зворотний інжиніринг, науковці можуть вивчати тривимірну структуру білків на молекулярному рівні, що допомагає розуміти їх функціонування та взаємодію з іншими молекулами. Це, у свою чергу, може сприяти розробці нових лікарських засобів для лікування різноманітних хвороб.

Зворотний інжиніринг у військовій техніці: Військові інженери використовують зворотний інжиніринг для дослідження захопленої або здобутої військової техніки, щоб зрозуміти її конструкцію, принципи роботи та можливі вразливості. Отримані знання можуть бути використані для поліпшення власної військової техніки та розробки стратегій протидії.

Один з відомих прикладів зворотного інжинірингу в галузі програмного забезпечення – це розробка Wine, вільного програмного забезпечення, яке дозволяє запускати додатки Windows на операційних системах Linux та macOS. Розробники Wine використовують зворотний інжиніринг для аналізу бінарних файлів Windows-додатків та відтворення їх функціоналу на інших платформах.

В автомобільному та авіаційному секторах зворотний інжиніринг широко використовується для аналізу та вдосконалення дизайну та технічних характеристик продукції. Наприклад, компанія Tesla розібрала конкуруючі електромобілі, щоб зрозуміти їхні переваги та недоліки та використати отримані знання для створення власних інноваційних продуктів.

Компанії, які займаються виробництвом електроніки, часто стикаються з проблемою заміни застарілих або вироблених компонентів. Зворотний інжиніринг дозволяє знайти альтернативні компоненти та адаптувати схеми для їх використання, забезпечуючи продовження виробництва та підтримку старіших пристроїв.

У біомедичній галузі зворотний інжиніринг використовується для створення та оптимізації медичних пристроїв. Наприклад, при розробці протезів та імплантатів інженери аналізують анатомічні характеристики та фізіологічні процеси людини, щоб створити ефективні й комфортні рішення для пацієнтів. Також зворотний інжиніринг може використовуватися для аналізу відомих медичних пристроїв, щоб виявити можливі поліпшення та інновації.

1.5. Етичні та правові норми реверсної інженерії

Зворотний інжиніринг може мати як законні, так і незаконні аспекти, залежно від способу його застосування та мети, яка переслідується. Етичні дії зворотного інжинірингу зазвичай відбуваються в рамках законодавства і націлені на дослідження, вдосконалення продуктів або вирішення технічних проблем. У той же час, незаконні дії, такі як хакінг або піратство, можуть призводити до порушення авторських прав та інших норм права.

Поняття «добросовісного використання» стосується ситуацій, коли зворотний інжиніринг використовується з метою дослідження, аналізу, навчання або вдосконалення продукту без порушення авторських прав. Це означає, що зворотний інжиніринг може бути виконаний в рамках закону, якщо його мета не суперечить законодавству.

Законодавчі акти та політики щодо зворотного інжинірингу можуть відрізнятися в залежності від країни та специфіки галузі. Деякі країни мають більш жорсткі норми, що обмежують застосування зворотного інжинірингу, тоді як інші дозволяють його використання в рамках закону. Наприклад, в США Закон про авторське право містить положення про «добросовісне використання», яке дозволяє здійснювати зворотний інжиніринг в певних випадках. Однак важливо розуміти місцеве законодавство та правила галузі, щоб не порушити закони або етичні норми.

Хоча зворотний інжиніринг може використовуватися в етичних межах для покращення продуктів, наукових досліджень або вирішення технічних проблем, необхідно розуміти його потенційні негативні наслідки. Наприклад, зворотний інжиніринг може використовуватися для копіювання технологій без дозволу власників авторських прав, що може призвести до неправомірної конкуренції та порушення прав інтелектуальної власності.

Тому перед використанням зворотного інжинірингу важливо проаналізувати свої цілі та способи досягнення їх, щоб дотримуватися законів та етичних принципів.

В цілому, зворотний інжиніринг є важливим інструментом в різних галузях і може приносити значні переваги. Однак його застосування повинне відбуватися в рамках закону та етики, щоб забезпечити відповідність правилам та забезпечити користь для всіх сторін.

Питання для самоперевірки

1. Поясніть суть зворотного інжинірингу.
2. У якому випадку застосовується зворотній інжиніринг?
3. У чому полягає процес реверс-інжинірингу?
4. Наведіть приклади незаконного використання реверсної інженерії.
5. Які основні етапи зворотного проектування?
6. Що виконується на етапі збору даних про об'єкт?
7. Що називають прототипом?
8. Які існують етапи створення прототипів?
9. Що виконується на етапі обробки скану?
10. Що виконується на етапі створення 3D CAD-моделі?
11. Що таке триангуляційна модель?
12. Для чого потрібен аналіз 3D CAD-моделі?
13. Якими технологіями здійснюється виготовлення відтвореної деталі?
14. Назвіть області застосування реверсної інженерії.
15. Які правові норми використання реверсної інженерії?

2. СКАНУВАННЯ

За методом сканування розрізняють *контактні і безконтактні* 3D сканери.

2.1 Контактний метод сканування

Контактний метод 3D сканування побудований за принципом обводу поверхні виробу спеціальним високочутливим щупом, за допомогою якого в комп'ютер передаються координати сканованого об'єкта.

До переваг контактної методи можна віднести простоту сканування призматичних об'єктів, незалежність якості вимірювань від освітленості, простоту використання і невеликий обсяг одержуваних файлів, невелику трудомісткість отримання 3D моделі.

До недоліків відносяться великий час сканування (за одне переміщення вимірювального інструменту визначаються координати тільки однієї точки), неможливість сканування криволінійних поверхонь і мініатюрних виробів.

Прикладом одночасного використання як контактної сканера так і виробничого обладнання може служити фрезерний верстат-сканер Roland MDX-20 (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Фрезерний верстат-сканер Roland MDX-20

Roland MDX-20 здатний працювати не тільки як фрезерний верстат, але і як сканер. Відмінно підходить для ювелірних робіт.

Контактна насадка, забезпечена п'єзосенсором, який здатний цифрувати будь-які вигини рельєфу, навіть з податливих матеріалів, з точністю 0,05 мм.

Фрезерна насадка дозволяє обробляти м'які метали, пластик, віск та інші м'які матеріали. На ньому можна створити прототипи, заготовки та закінчені вироби. Відмінно підходить для навчальних цілей (рис. 2.2).

Roland MDX-20 поставляється з програмним забезпеченням для сканування 2D і 3D гравування. Сумісний з графічними програмами: SolidWorks, VisualMill, Rhinoceros, VectorWorks, LightWave та 3d Studio Max.

Має в комплекті програму Roland JewelStudio, яка повністю призначена під створення ювелірних прикрас. Вбудований у програму модуль GemStudio здатний підібрати вагу, розмір та тип каменю. На екрані відразу відобразиться готова модель з вагою, формою, розмірами.

Особливості: 2 в 1 – сканер та фрезерний верстат; ПЗ для ювелірів JewelStudio; Розмір робочого поля 305x205 мм; Шпиндель із частотою 6000 ... 30000 об/хв; Нульовий датчик; Кришка, що закриває.



Рисунок 2.2 – Roland MDX-20 на кафедрі ІТМ

2.2 Безконтактний метод сканування

При безконтактному методі скануючі пристрої діляться на *пасивні і активні* 3D сканери.

2.2.1. Пасивні 3D сканери.

Пасивні 3D сканери засновані на принципі виявлення відбитого навколишнього випромінювання (без випромінювання сканера). Пасивні сканери не забезпечують високої якості, але завдяки низькій вартості все ще

знаходять застосування там, де вимоги до точності сканування не високі. Системи пасивного сканування поділяються на три види: **фотометричні, силуетні та стереоскопічні**.

1. Фотометричні системи зазвичай використовують одну камеру, яка забезпечує зйомку великої кількості кадрів при повільному обертанні об'єкта. Аналіз видимих змін поверхні при відомій швидкості обертання дозволяє побудувати цифрову модель об'єкта.

Розвитком фотометрії є **фотограмметрична зйомка**, яка використовує спеціальну систему міток, що дозволяє програмі з великою точністю визначити, яка саме частина об'єкта була сфотографована і з якого ракурсу. Такий підхід забезпечує більш точну "склеюку" моделей.

2. Силуетні системи використовують той самий принцип, що і фотометричні, але з використанням контрастного фону. При побудові 3D-моделі акцент робиться на аналізі змін силуетів.

3. Стереоскопічні системи передбачають використання двох камер, спрямованих на предмет, що сканується, під різними кутами. Аналізуючи відмінності у зображеннях, представлених камерами, можна визначити відстань до кожної точки об'єкта і побудувати його 3D-модель.

Незважаючи на відносно низькі ціни пасивних сканерів, вони виходять із вживання. Їх витісняють активні сканери, можливості яких незмірно ширше, а ціни постійно знижуються і вже стають сумірними з цінами пасивних сканерів.



Рисунок 2.3 – Пасивний 3D-сканер Revopoint Range (Китай)

Завдяки швидкості сканування до 18 кадрів за секунду можна переміщати Range комфортно та плавно під час сканування.

Revopoint Range – пасивний сканер (рис. 2.3) з потужним ширококутовим інфрачервоним проектором, який забезпечує відстань сканування до 800 мм, зберігаючи при цьому точність покадрового сканування до 0,1 мм. Призначений для сканування великих об'єктів: автомобілі, меблі, промислові деталі та сканування людини в межах її досяжності.

RGB-камера 3D-сканера Range фіксує колір об'єкта під час сканування і готова до об'єднання з 3D-моделлю після об'єднання даних для створення точних, повнокольорових, майже реалістичних 3D-моделей.

Завдяки швидкому скануванню всього тіла людини можна легко створювати прості 3D моделі всього тіла для відеоігор, дизайну одягу, доповненої та віртуальної реальності менш ніж за дві хвилини. Також можна роздрукувати на 3D-принтері майже реалістичну мініатюрну модель. Сканер відтворює всі елементи одягу, шкіри та волосся людини: шви, складки, зморшки.

Для незалежного мобільного сканування на ходу можна підключити телефон або планшет до сканера Range за допомогою програми Revo Scan на пристрої Android або iOS. Після завершення сканування проводиться експорт 3D-моделі або в настільну версію Revo Scan для подальшої обробки.

2.2.2. Активні 3D сканери

Активні 3D сканери випромінюють на об'єкт сканування світло, промінь лазера, ультразвук або рентгенівські промені і зчитують відображення. Активно ведуться розробки магнітних сканерів, що використовують для визначення координат поверхні об'єкта зміну його просторового магнітного поля. Слід зазначити, що ультразвукові та магнітні сканери вкрай чутливі до різних перешкод. Так, перші можуть реагувати на погодні явища, звукові хвилі, створювані іншим обладнанням, кондиціонерами або навіть флуоресцентними лампами, а джерелом перешкод для других можуть бути металеві об'єкти і електропроводка в приміщенні.

Безконтактні 3D сканери можна розділити за принципом роботи на чотири основні технології сканування: *фотограмметрія; структурований білий світ; лазерний промінь; томографія.*

Всі 3D-сканери, що працюють зі світлом, поділяються на *оптичні та лазерні.* Оптичні поділяються на *фотограмметричні і ті, що працюють із структурованим світлом.* Серед лазерних в окрему категорію виділяються часопротітні – сканери для роботи з великими і далеко розташованими об'єктами. Крім того, в деяких сканерах, для більшої точності, додатково

застосовуються елементи КВМ (координато-вимірвальних машин) – механічні датчики, щупи.

1. Сканування на основі фотограмметрії являє собою фотографування вихідного об'єкта з різних ракурсів і відтворення на основі отриманих зображень тривимірної моделі. Перевагами даного методу є низькі витрати на обладнання і відсутність контакту з вимірюваною поверхнею.

Термін “фотограмметрія” (“вимірвальна фотографія” або вимірювання фотознімків), вперше запровадив А.Майденбауер у 1893 р. і складається з трьох грецьких слів: фото – світло, грамма – запис, метрія – вимірювання. Фотограмметрію застосовують у різних галузях науки і техніки і її засобами досліджують та вивчають різноманітні об'єкти. Це астрономія (вивчення небесних тіл за їх фотографіями), металургія чи медицина (вивчення структури мікрооб'єктів), архітектура (вивчення споруд за їх фотографіями, складання фронтальних планів тощо), геодезія і картографія (створення топографічних планів та карт) та багато інших напрямків у тому числі і машинобудування. У даному випадку застосовується термін інженерна фотограмметрія, тобто інженерне застосування фотограмметрії, при дослідженнях різноманітних інженерних об'єктів.



Рисунок 2.4 – Маркери на деталі

При використанні традиційних методів фотограмметрії процес починається з розміщення міток та кодованих маркерів (далі – маркер) на поверхні об'єкта (рис. 2.4). Ці маркери можуть бути виконані у вигляді спеціальних знаків, які камери з високою роздільною здатністю фіксують з різних кутів. Потім зроблені фотографії обробляються в спеціальному програмному забезпеченні, яке з високою точністю обчислює просторове положення кожного маркера і визначає геометрію об'єкта. В результаті виходить набір даних, який потім використовується для побудови точної 3D-моделі. за допомогою маркерів.

Маркер (мішень) – це невелика наклейка певних розмірів (випускається в рулонах чи аркушах) (рис. 2.5) або магніт із зображенням чорного кола із білою точкою (рис. 2.6). 3D сканер використовує ці високо контрастні зображення для визначення свого положення в просторі. Щоб підвищити

точність і стабільність 3D-сканування, маркери наносяться безпосередньо на сам об'єкт або поруч з ним.



Рисунок 2.5 – Самоклеючі круглі маркери



Рисунок 2.6 – Магнітні маркери

Без маркерів сканер втратить орієнтацію під час сканування і програма не знатиме, як Кадр № 1 співвідноситься з Кадром № 2, Кадр № 2 з Кадром № 3 і т.д. Програма спробує упорядкувати всі кадри, використовуючи як орієнтир унікальну геометрію об'єкта. Для цього вона задіє складні алгоритми, які допоможуть їй розібратися і вирішити, що, наприклад, ніс людини з Кадра № 1 повинен збігтися з тим самим носом з Кадра № 2 а не з іншою частиною тіла.

Однак не завжди робота алгоритму дає хороший результат. Особливо це стосується випадків, коли оцифровується об'єкт з великими рівними поверхнями та мінімумом деталей. З цим не впорається навіть найдосконаліший алгоритм. Коли об'єкт покривають маркерами і тим самим визначають для програми якийсь стабільний набір елементів для орієнтації під час 3D-сканування, отримують дуже точні дані про геометрію об'єкта. Крім того, маркери гарантують відтворюваність результату і не дозволяють накопичуватися помилки на відстані.

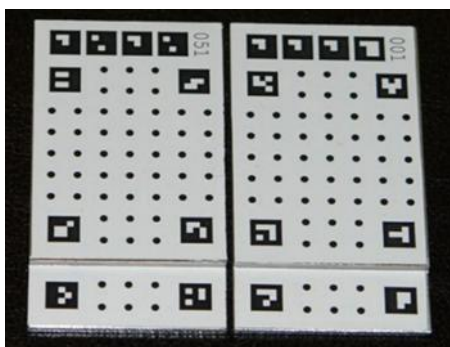


Рисунок 2.7 – Маркер-маяк

При скануванні великих об'єктів, наприклад будівництві, використовуються маркери-маяки (рис. 2.7) з використанням спеціальних знаків. Маяк складається з 2-х алюмінієвих пластин із рельєфною сходинкою розміром 60×40 мм, кожна з яких містить кілька десятків марок. Розмір пластини підібраний таким, щоб її можна було помістити на одну цеглу.

3D-сканування – це процес, який використовує сучасні технології оптики, механіки, електроніки та програмного забезпечення для створення високоточних цифрових 3D-моделей реальних об'єктів. У ході 3D-сканування об'єкти перетворюються на хмари точок, які потім обробляються за допомогою комп'ютерів для створення деталізованих моделей. Однак при скануванні великих об'єктів, наприклад, будівельних конструкцій або автомобілів, часто виникають похибки, особливо якщо об'єкт дуже великий – від декількох метрів до десятків метрів у розмірі.

Для того щоб мінімізувати помилки, які можуть накопичуватися при скануванні таких об'єктів, використовується фотограмметрія. Ця технологія дозволяє точніше виміряти геометрію об'єкта за допомогою фотознімків, на яких розміщені спеціальні маркери та шкали. Це дає можливість значно покращити точність тривимірних моделей та зберегти контроль за глобальною точністю вимірювань, особливо при роботі з великими об'єктами.

Розглянемо приклад реінжинірингу з використанням методу фотограмметрії, який застосовується на кафедрі ІТМ НТУ «ХП».

Робота виконувалася в центрі високих технологій навчально-науково-виробничого об'єднання при НТУ «ХП» (кафедра "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семко) з використанням оптико-цифрової установки об'ємного сканування Imetric IScan II (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Оптико-цифрова установка об'ємного сканування Imetric IScan II

Загальна схема зворотного інжинірингу промислових виробів представлена на рис. 2.9. Принципи побудови схеми визначаються стратегіями отримання 3D моделей за допомогою оптико-цифрової установки та їх подальшої матеріалізації з використанням технологій Rapid Prototyping або обробкою різанням на верстатах з ЧПУ.

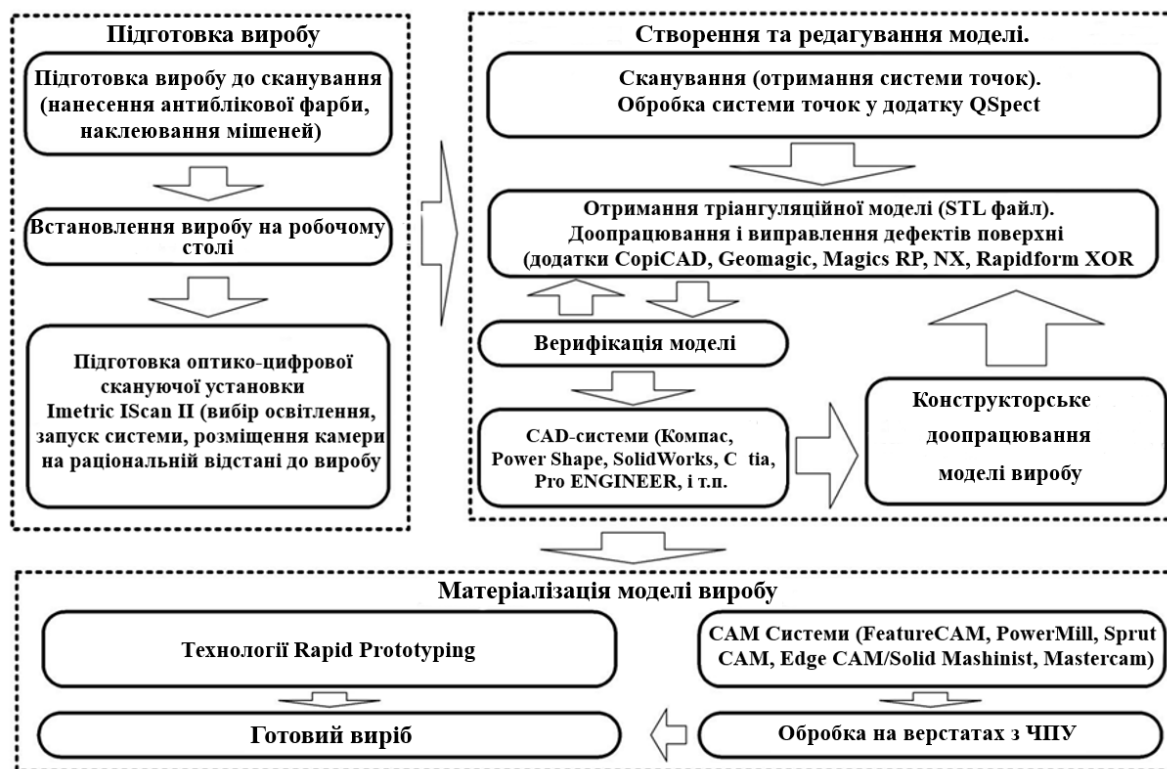


Рисунок 2.9 – Загальна схема зворотного інжинірингу промислових виробів з використанням оптико-цифрової установки

Установка IScan II складається з наступних елементів: метрологічної фотокамери з традиційною оптикою (фокусна відстань 24 мм), з вбудованим фотоспалахом; фотограмметричного програмного забезпечення, що дозволяє виконувати такі операції: розпізнавання образів за допомогою фотокамери, автоматичний вимір об'єкта з наклеєними світлоконтрастними мішенями, ідентифікацію мішеней, створення систем вимірних точок та їх автоматичну орієнтацію, трансформацію та редагування координат систем вимірних точок, аналіз геометрії. Допоміжне оснащення системи IScan II включає комплект світлоконтрастних мішеней різних діаметрів, набір вуглеволоконних стандартних стрижнів з мішенями, покритими світловідбивним матеріалом тощо. Установка дозволяє сканувати об'єкти з габаритними розмірами щонайменше 100×100×100 мм. Перед скануванням виконується спеціальна процедура налаштування, а також калібрування. Для об'єктів порівняно невеликих розмірів (до 300 мм) сканування може проводитися на калібрувальній пластині або з використанням допоміжного об'єкта з наклеєними мішенями, розташованих поблизу деталі. При скануванні великогабаритних об'єктів світлоконтрастні мішені наклеюються безпосередньо на поверхні.

На якість сканування істотно впливають світловідбивні властивості поверхні об'єкта. Тому, як правило, на об'єкт, що сканується, наносять покриття антивідблиску. Відповідно необхідно приділяти істотну увагу (при налаштуванні фотокамери) на інтенсивність навколишнього освітлення, тому що виникнення відблисків на поверхні об'єкта призводить до появи в цих місцях розривів поверхні. Система сканування IScan II дозволяє за прийнятний час (кілька хвилин або годин в залежності від складності виробу) виконувати сканування об'єкта з отриманням системи точок поверхні та автоматичною реєстрацією їх в єдиній системі координат.

1. Створення триангуляційних моделей промислових виробів.

Робота на установці IScan II складається з наступних етапів:

попередні етапи: підготовка виробу до вимірювань шляхом нанесення покриття антивідблиску (краща якість сканування забезпечується при використанні фарби сірого кольору); наклеювання світло-контрастних мішеней;

етапи, що виконуються для кожного ракурсу сканування: завдання положення скануючої головки; налаштування процесу сканування (завдання порога чутливості камери для процесів сканування та розпізнавання мішеней, автоматичне виявлення та інтерактивне завдання імен мішеней); сканування; одержання набору систем точок; візуальний аналіз поточної та/або загальної системи вимірюваних точок;

заклучні етапи: візуальний аналіз загальної системи вимірюваних точок; обрізання та/або видалення неподобних систем або груп точок; збереження даних у форматі ASC.

Процес сканування ефективний при забезпеченні рівномірного розподілу світлоконтрастних мішеней на поверхні сканованого об'єкта (з розрахунку попадання близько 20 мішеней в один ракурс) і коректного вибору експозиції камери. Світлоконтрастні мішені являють собою роздруковані на принтері чорні смужки паперу з нанесеними на них білих реперних міток (\varnothing 2...4 мм). Реперні мітки при проведенні одного сканування об'єкта повинні мати однаковий розмір. Необхідно, щоб їх розмір на зображенні об'єкта, що сканується, був не менше 5...6 пікселів, також він залежить від масштабів об'єкта, роздільної здатності і об'єктива камери. У даному випадку їх розмір складав 3 мм.



Рисунок 2.10 – Об'єкти (опалювальна піч та обшивка передніх дверей автомобіля) підготовлені для сканування на оптико-цифровій установці

На рис. 2.10 представлені приклади підготовлених об'єктів до сканування. При наклеюванні мішеней дотримуються наступної стратегії. Мішені розподіляються між окремими групами: орієнтації, масштабування, мішеней для авто-обробки, та додаткової мережі мішеней. Мішень може належати одній або декільком групам. Група орієнтації включає щонайменше 4 мішені, що перетинаються для визначення початкової системи координат і автоматичного орієнтування групи зображень. Групу слід розміщувати в центрі об'єкта, що сканується (або досить близько до нього). Група масштабу використовується системою для визначення масштабу представлення об'єкта (проекту). Мішені цієї групи повинні розподілятися у кількох напрямках під взаємним кутом 45° .

Мішені автоматичної обробки необхідні автоматизації процесу вимірювань. У процесі сканування необхідно, щоб у зображення камери потрапляли мінімум чотири розпізнані мішені, тому слід заздалегідь планувати розташування мішеней і концентрувати їх поряд з перетинами поверхонь. Але при цьому необхідно витримувати відстань від мішеней до умовних меж поверхонь не менше 2...4 мм. Вибір положення проєктора, як і орієнтація об'єкта, що вимірюється, мають визначальне значення для ефективного процесу сканування. На основі досвіду експлуатації можна сформулювати основні принципи раціональної стратегії сканування: об'єкт вимірюється з різних ракурсів (до 20...30 зображень для виробів з розмірами до 400 мм); у кожному новому зображенні повинні фіксуватися як мінімум чотири мішені з попередніх видів і чотири нових мішені (найкращі результати були отримані за їх загальної кількості 16...20 зображень); скановані мішені повинні одночасно потрапляти в робочі зони камери та проєктора; отримані системи вимірюваних точок повинні охоплювати всю поверхню об'єкта, забезпечуючи наявність загальних ділянок поверхні для різних ракурсів вимірювання

(бажано до 5-и, але для ділянок, де виявляється висока похибка вимірювання, слід видаляти непередставницькі системи точок); сканування при різних ракурсах виконується за однієї відстані до об'єкта. При цьому кожне вимірювання повинно охопити якомога більшу область поверхні об'єкта, що сканується, забезпечуючи найбільшу кількість задіяних мішеней. Сканування об'єкта виконується із запланованих ракурсів. Потім зображення поверхні обробляються в головці, що сканує, і отримана система точок кожного вимірювання передається на комп'ютер для попередньої обробки.

2. Обробка отриманих даних.

Для обробки даних сканування в установці IScan II використовується спеціалізована система QSpsect. Для кожного виробу в системі створюється новий проект і виконується сканування об'єкта за допомогою майстра роботи зі сканером або в нього імпортуються раніше отримані системи вимірюваних точок (файли *.asc). На рис. 2.11 представлена схема послідовності обробки даних сканування та екранні форми пакету QSpsect на етапах візуалізації та редагування систем вимірюваних точок для передньої фари автомобіля.

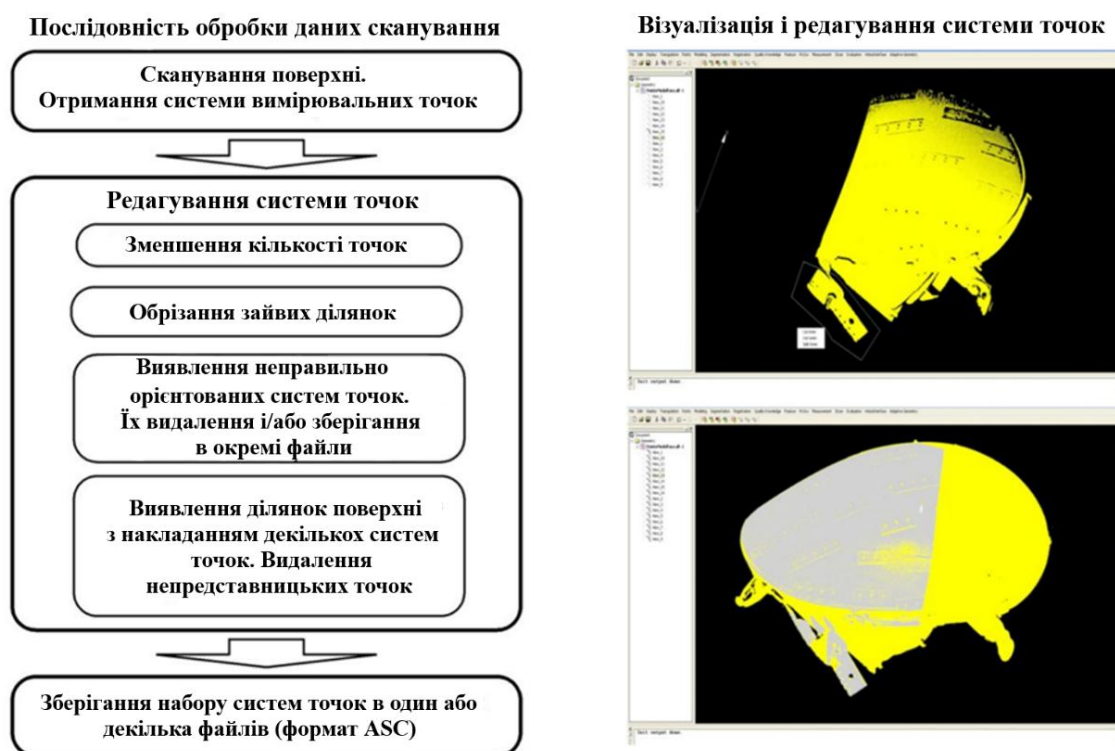


Рисунок 2.11 – Обробка даних сканування у програмі QSpsect

У режимі зйомки з кількох ракурсів використовується автоматична обробка отриманих результатів з визначенням становища всіх систем точок. Залежно від складності виробу, що вимірюється, деякі системи точок можуть отримати неточну або неправильну орієнтацію. Ці непередставницькі системи точок видаляються або зберігаються в окремі файли для завдання правильного їх положення в спеціалізованих САД-системах (Geomagic Studio, CopyCAD або Magics RP). При необхідності використовуються інструменти редагування систем точок, аналізу та перетворення системи координат для досягнення на наступному етапі тріангуляції необхідної якості поверхонь моделі. Потім створюється звіт про проведені вимірювання, зберігається проект і зберігається підсумковий набір вимірюваних точок.

3. Створення тріангуляційної моделі промислових виробів на основі систем вимірюваних точок.

Geomagic Studio дозволяє створювати тривимірні моделі виробів за відсканованими даними (системами вимірюваних точок) та редагувати їх. Імпорт даних сканування здійснюється за допомогою формату ASC. Для зменшення розміру файлів і відповідно часу обробки моделей, системи вимірюваних точок завантажуються не повністю, а в обсязі 25...50% від їх загальної кількості. Непредставницькі точки, які можуть вплинути на точність тріангуляційної моделі (викиди, шуми та ін) видаляються. Ця операція виконується в ручному режимі, за допомогою інструментів виділення або автоматично за допомогою команд "Select Outliers" та "Select Disconnected".

Підготовлена точкова модель тріангулюється за допомогою команди "Wrap". Основні параметри цієї команди: кількість трикутників, рівні якості моделі та фільтрації шумів. Тріангуляційна модель, отримана на основі систем точок, як правило, не є придатною для її матеріалізації. Тому в Geomagic Studio передбачено ряд інструментів для усунення дефектів поверхні.

При необхідності може виконуватися загальне згладжування моделі (зі збереженням або без збереження меж поверхонь), що дозволяє усунути більшу частину дрібних дефектів. Але такий підхід усунення дефектів може призвести до збільшення похибки на ділянках біля меж поверхонь та дрібних елементів моделі. Для отримання поверхневої моделі (NURBS) на основі тріангуляційної в Geomagic Studio пропонується великий набір спеціальних інструментів. На рис. 2.12 представлений приклад моделі виробу,

отриманої на етапі триангуляції системи вимірних точок та після її редагування (усунення дефектів поверхні) у системі Magics RP.

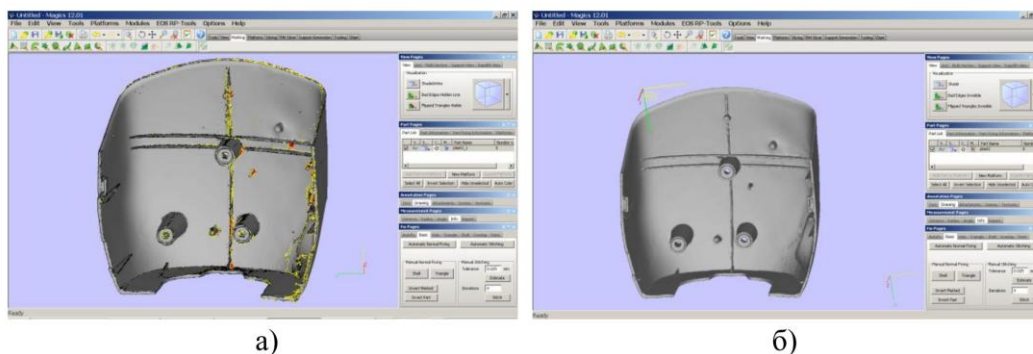


Рисунок 2.12 – Модель виробу (фари автомобіля) у системі Magics RP:
а) після триангуляції; б) після усунення дефектів.

Система Magics RP має деякі особливості щодо редагування триангуляційної моделі. Наприклад, найбільш ефективним підходом усунення дефектів поверхні є: виділення проблемної ділянки поверхні, використання функцій "Triangle reduction" (зменшення трикутників) і "Smoothing" (згладжування без опції "Skip Bad Edges").

4. Верифікація триангуляційних моделей.

Сканування, редагування системи вимірних точок, триангуляція точкової моделі, редагування триангуляційної моделі – етапи зворотного інжинірингу промислових виробів. Виконання кожного з цих етапів додає певну похибку в триангуляційну модель виробу. Тому останнім етапом зворотного інжинірингу є верифікація отриманих моделей. За результатами верифікації триангуляційних моделей приймається рішення про їх готовність до матеріалізації. При проведенні досліджень оцінка похибки отриманих моделей виконувалася двома способами: із застосуванням кольорових карт похибки в системі Geomagic Studio і за допомогою статистичного аналізу відхилень розмірів триангуляційної моделі від реального об'єкта в математичному пакеті Maple.

Використання карти похибки зручне виявлення та оцінки причин, що викликають відхилення. Аналіз таких карт для різних виробів дозволяє виявити основні фактори, що впливають на формування результативної похибки. На етапах сканування виробу, триангуляції та редагування моделі до таких факторів відносяться: кількість використовуваних мішеней на поверхні виробу; відстань від наклеєних мішеней до меж поверхонь; розташування

мішеною на межах поверхні виробу або ділянках з малим радіусом кривизни; наявність відблисків на поверхні виробу під час сканування; кількість систем точок для однієї ділянки поверхні; рівень опрацьованості точкової моделі (видалення непередставницьких точок); параметри триангуляції (кількість трикутників, рівні фільтрації шумів тощо); використання інструментів вигладжування та їх параметри (сила вигладжування тощо); вибір стратегії усунення дефектів поверхні (в основному визначається вибором САД-системи).

Недоліки традиційної фотограмметрії:

Багато кутів і фотографій: для того, щоб отримати точні дані, потрібно зробити безліч фотографій об'єкта з різних точок. Це може бути незручно, особливо при скануванні великих об'єктів, таких як будівельні конструкції або автомобілі.

Потрібні досвідчені оператори: щоб всі дані були точними, потрібно досвідчений оператор, який буде правильно розміщувати камери і виконувати інші налаштування обладнання.

Складне налаштування маркерів: установка маркерів або кодованих точок – це тривалий і трудомісткий процес, який може зайняти багато часу, особливо якщо об'єкт дуже великий і має особливості рельєфу.

Фірма SHINING 3D (Китай) запропонувала інноваційну систему фотограмметрії, яка значно спрощує процес 3D-сканування та підвищує його точність. На відміну від традиційних методів, які вимагають використання кодованих маркерів, фотограмметрія SHINING 3D дозволяє уникнути них. Це скорочує час підготовки, знижує ймовірність помилок та спрощує процес. Технологія також дозволяє зберегти високу точність 3D-сканування, навіть під час роботи з великими об'єктами.

Моделі, такі як FreeScan UE Pro, FreeScan UE Pro 2, FreeScan Trio і FreeScan Trak Pro2, оснащені вбудованою фотограмметрією, що дозволяє використовувати ці пристрої для сканування об'єктів без необхідності вручну розміщувати спеціальні маркери. На відміну від традиційних систем, такі 3D-сканери інтегрують фотограмметричні шкали, що робить процес сканування набагато швидшим і зручнішим.



Рисунок 2.13 – Фотограмметричні шкали Shining 3D

вимірювань досягає $0,02 \text{ мм} + 0,015 \text{ мм}$ на кожен метр, що робить її ідеальною для роботи з високоточними об'єктами.



Рисунок 2.14 – Бездротовий оптичний трекер для сканування 3D SHINING 3D FreeScan Trak

Принцип роботи оптичного трекера заснований на здатності фіксувати положення в просторі структури 3D-сканера. На відміну від традиційного способу 3D-сканування, коли сканер прив'язується до особливостей поверхні об'єкта або наклеєних міток, дана система використовує віддалений пристрій позиціонування та систему міток на самому сканері. Таким чином, похибки оцифрування геометрії об'єкта не накопичуються із збільшенням об'єму відсканованої поверхні, а залишається мінімальними. В результаті, відбувається ефективно і надійно тривимірне вимірювання об'єкта, позбавляючи оператора від трудомісткого процесу наклеювання маркерів на поверхню, що сканується. Отримані дані про геометрію об'єкта мають точність метрологічного рівня.

Для того щоб отримати точні дані про реальні об'єкти, достатньо зробити кілька знімків шкал (рис. 2.13), які розміщуються навколо об'єкта. Ці знімки потім обробляються програмним забезпеченням, яке автоматично коригує результати та забезпечує точність скана. Наприклад, 3D-сканер FreeScan UE Pro2 оснащено вбудованою фотограмметрією, що дозволяє отримувати результати без використання кодованих маркерів. Точність

Портативний оптичний трекер для сканування 3D SHINING 3D FreeScan Trak – це система для точного бездротового 3D-сканування об'єктів середніх та великих розмірів без застосування міток (рис. 2.14).

Використання цієї високоточної промислової системи 3D-сканування спрощує та прискорює процес оцифрування великих об'єктів.

Переваги вбудованої фотограмметрії:

Контроль точності: Обладнання з вбудованою фотограмметрією допомагає точно контролювати вимірювання та адаптувати систему під різні форми та розміри об'єктів. Це особливо важливо, коли потрібно сканувати складні або нестандартні об'єкти, де потрібна висока точність вимірювань. Вбудована фотограмметрія дозволяє автоматично враховувати похибки і коригувати їх в реальному часі, що значно підвищує точність і надійність сканування.

Простота використання: Використання вбудованої фотограмметрії значно спрощує процес сканування. Не потрібно заздалегідь встановлювати кодовані маркери, що прискорює підготовку до сканування. Навіть користувачі-початківці можуть легко налаштувати обладнання і отримати результати. Це особливо корисно в умовах масового виробництва або за швидкого прототипування, де потрібна економія часу.

Дані реального часу: Результати сканування показуються відразу, що дозволяє швидко перевіряти точність отриманих даних. Якщо якісь кути або області не були належним чином зафіксовані, система через зображення на екрані дозволяє оперативно скоригувати знімки і доповнити частини, що бракують. Вбудована фотограмметрія допомагає уникнути помилок і прискорює процес роботи.

Зручність роботи з великими об'єктами: Вбудована фотограмметрія дозволяє працювати з великими і важкими об'єктами без необхідності їх переміщення у спеціально підготовлені простори. Це особливо важливо в промисловості, де 3D-сканування великих об'єктів часто відбувається прямо у виробничих приміщеннях або на місці. Обладнання адаптується до різних умов і забезпечує відмінну точність, незважаючи на розміри об'єкта.

Зниження часу на підготовку: Завдяки вбудованій фотограмметрії можна уникнути складних процесів встановлення маркерів і налаштувань обладнання, що значно економить час. Це важливо, якщо проект вимагає швидкого виконання або у випадку, коли об'єкти змінюються на кожному етапі роботи, наприклад, в автомобільній або аерокосмічній промисловості.



Рисунок 2.15 – Сканер HyperScan Plus

Лазерний 3D-сканер із системою оптичного відстеження ZG-Track та портативною КВМ ZG-Probe, що має одразу кілька режимів роботи. У лінійці доступні дві моделі – HyperScan Plus (рис. 2.15) та HyperScan DX-B.

Технологія синього підсвічування: використання синього лазера дозволяє покращити якість вимірювань та адаптивність сканованих матеріалів. Висока швидкість: 34 синіх лазерних ліній для збільшення швидкості сканування до 2,9 млн вимірів на секунду. 7 паралельних синіх лазерних ліній дозволяють передати дрібні деталі об'єкта, що значно підвищує точність отриманих даних. Власна технологія миттєвого захоплення координат отворів здатна збирати дані про сотні отворів та їх координати за лічені секунди. Гібридний режим сканування: підтримка як вимірювання великих площ, так і портативного сканування в єдиній системі координат. Мультитрекова система сканування: підвищення ефективності завдяки використанню кількох трекерів в одній системі сканування або кількох трекерів з кількома сканерами.



Рисунок 2.16 – Сканер CereScan

Мобільний лазерний 3D-сканер метрологічного класу від компанії ZG Technology призначений для сканування у вузьких та важкодоступних зонах. Невелика вага та розмір пристрою з мобільного телефону дозволяють з легкістю керувати ним однією рукою (рис. 2.16).

Надійний корпус CereScan та нековзна ручка дають можливість виконувати 3D-сканування швидко та ефективно за будь-яких умов. Завдяки вбудованій системі фотограмметрії прилад також може сканувати великі об'єкти. Переваги: Вага 0,65 кг. Сканування внутрішніх поверхонь. Сканування важкодоступних зон: заглиблення, пази. Бюджетне ергономічне рішення метрологічного класу. Удосконалена система охолодження сканера для отримання стабільних і точних результатів. Можливість покращити точність сканування без використання допоміжних приладів. У комплекті інтелектуальний модуль бездротового сканування ZG FreeBox II.

2. Сканування на основі структурованого білого світла полягає в проектуванні на об'єкт ліній, що утворюють унікальний візерунок, кожна зміна якого сканується приймальною камерою (рис.2.17). До переваг відносяться велика швидкість сканування, отримання до 1 000 000 точок сканування за один вимір, висока точність і деталізація елементів виробу, відсутність контакту з вимірюваною поверхнею і можливість сканування людських обличчя завдяки відсутності лазерних променів.

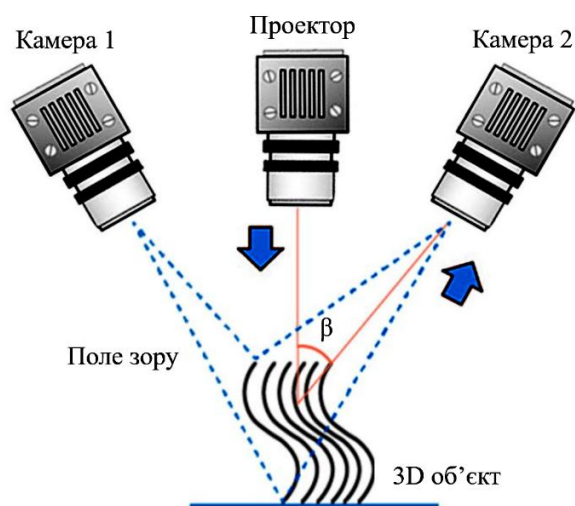


Рисунок 2.17 –Принцип дії оптичного 3D-сканера

Оптичний сканер являє собою пристрій, що включає одну або дві відеокамери у зв'язі з кінопроектором. Проектор висвітлює сканований об'єкт так званим «структурованим світлом», що представляє собою поєднання смуг або розташованих в шаховому порядку квадратів різної освітленості. Камери фіксують викривлення смуг та квадратів, потім отримані дані обробляються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення та формується 3D-модель об'єкта. Завдяки високій точності відтворення сканованих поверхонь, даний метод знайшов широке застосування в реверс-інжинірингу, ювелірній промисловості та стоматології – при виготовленні всіляких зубних протезів.

Стационарні оптичні сканери, як правило, поставляються разом з поворотним столом, на якому розташовують об'єкт сканування. Сканування з використанням поворотного столу дозволяє автоматизувати роботу обладнання і зробити процес оцифрування об'єкта більш швидким і зручним.

Перші оптичні сканери були виключно настільними і могли працювати лише з відносно невеликими об'єктами. Для подолання цього обмеження були розроблені стационарні сканери, які використовувалися зі штативами і забезпечували сканування істотно більших об'єктів. Удосконалене програмне забезпечення дозволяло здійснювати сканування частинами і далі "склеювати" отримані зображення в одне ціле. Остаточно завдання сканування великих об'єктів було вирішено з появою ручних сканерів, що

володіють підвищеною мобільністю і практично необмеженими можливостями сканування великих об'єктів.

Для сканування дрібних та середніх об'єктів, як і раніше, широко використовуються стаціонарні сканери.



Рисунок 2. 18 –
Матуючий спрей

нування.

Універсальний, легкий із високою деталізацією сканер для настільних ПК Shining 3D EinScan-SP (Platinum) (рис. 2. 19). Обладнання швидко і якісно сканує об'єкт на 360 градусів, створюючи файл, який можна завантажити в 3D-принтер для подальшого друку. EinScan-SP пропонує модернізовані функції для швидкого збирання точних даних.



Рисунок 2. 19 – Сканер Shining 3D EinScan-SP (Platinum)

На передній панелі сканера встановлені дві камери з роздільною здатністю 1,3 Мп і об'єктивом проектора, який освітлює об'єкт під час сканування. Для освітлення об'єкта в Shining 3D EinScan SP використовується безпечне для очей біле світло. Час поодинокого сканування 4 секунди. Час сканування в 360 градусів в режимі автосканування 1 хвилина. Калібрувальна панель – HD. Габарити – 570×210×210 мм.



Рисунок 2. 20 – Сканер RangeVision Spectrum

RangeVision Spectrum – 3D-сканер, що володіє високою роздільною здатністю, а також працює за технологією структурованого підсвічування. Даний 3D-сканер включає технічні характеристики професійного 3D-обладнання, але залишається доступним настільним рішенням (рис. 2. 20).

Сканер має 3 області сканування, а також кольорові камери високої роздільної здатності 3,1 МП. У комплекті зі сканером йдуть поворотний стіл та кейс, для отримання ще більшої зручності в роботі. Даний сканер є універсальним і дозволяє вловлювати навіть складну геометрію і дрібні деталі при збереженні високої роздільної здатності та точності.



Рисунок 2. 21 – Сканер RangeVision Spectrum

Якісний безконтактний сканер, що працює за технологією сканування структурованим світлом IMETRIC IScan S120 (Швейцарія) (рис. 2. 21). Забезпечує високу швидкість та точність отримання даних. Відрізняється чудовим співвідношенням ціна/продуктивність.

Особливості 3D сканера IMETRIC IScan S120: безконтактна методика сканування; стаціонарний прилад; розрахований як у маленькі, і середні об'єкти; простота використання; висока роздільна здатність та висока точність; повністю автоматизовано, включаючи генерацію .STL файлу.

Завдяки високій точності приладу, він ідеально підходить для сканування механічних та електричних компонентів, ювелірних виробів та споживчих товарів. Отримані дані легко піддаються моделюванню та додатковій обробці.

Технічні характеристики: Габарити 390 × 366 × 596 мм, Вага 22 кг, Джерело живлення 95 – 260 В, 50/60 Гц, Потужність 120 Вт, Роздільна здатність камери 1,3 МП.

3. Лазерна технологія сканування заснована на проектуванні лазерного променя на об'єкт сканування. Всі спотворення сприймаються вимірною камерою, яка відстежує положення лазерного променя, отримані дані передаються на комп'ютер (рис. 2. 22).

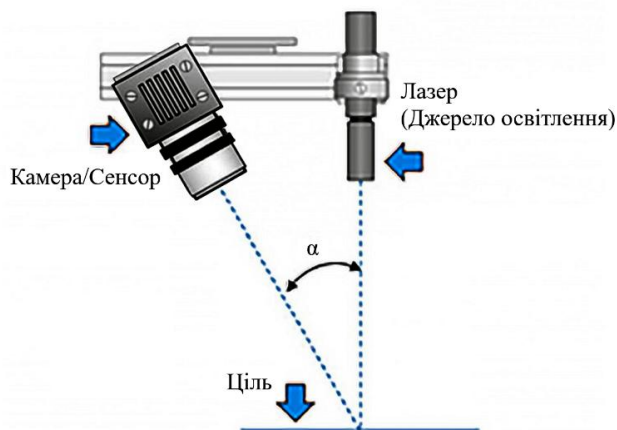


Рисунок 2. 22 – Принцип дії лазерного 3D-сканера

Принцип дії лазерного 3D-сканера подібний до принципової схеми роботи оптичного сканера, але в ньому замість структурованого світла використовується промінь лазера. На лазерній технології зазвичай засновані інженерні сканери для перевірки деталей на виробництві та зворотного інжинірингу, а також часопролітні сканери для роботи з масштабними об'єктами.

До переваг лазерного 3D сканера відносяться не висока вартість для промислового застосування, можливість сканування поза приміщеннями, і при різній освітленості, відсутність контакту з вимірюваною поверхнею, можливість роботи з об'єктами, недоступними для сканування з використанням технології білого структурованого світла. Недоліками є неможливість сканування прозорих, чорно-білих об'єктів або з великим ступенем світловідбивання, тому, потрібно їх попередня обробка.

В основі сканування за допомогою лазерів лежить метод триангуляції. Лазерні 3D-сканери випромінюють лазерні промені на об'єкти, Камера фіксує лазерні точки на ньому, кут зміщення лазерного променя і передає дані на комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням, яке формує об'єкт у цифровому вигляді. У зв'язку з нечутливістю до перешкод, лазери можуть застосовуватися в різних умовах. Отримані результати залежать від типів джерел лазерів: блакитний лазер і червоний лазер. Різниця полягає у довжині хвилі. У червоного кольору довжина хвилі 650 нм, а в синього – 445 нм, і менша довжина хвилі, відповідно, дозволяє краще підсвічувати блискучі поверхні за рахунок більш інтенсивного розсіювання світла на мікрodefектах поверхні, нехай навіть і дуже гладкою. Розсіювання ж на поверхні об'єкта сканування потрібно для того, щоб зображення ліній підсвічування було видно камерам сканера, тобто щоб в них повернулася частина

випромінювання лазерного пристрою підсвічування, а не відбилася в бік під кутом, рівним куту падіння.



Рисунок 2. 23 – 3D сканер Shining 3D FreeScan Combo

Лазерні сканери, як правило, ручні, що робить їх портативними та зручними у використанні під час сканування великих деталей. Головний недолік – необхідність використання світловідбивних міток, які працюють як опорні точки, що дозволяють сканеру орієнтуватися в просторі і фіксувати розміри та геометрію об'єкта.

Shining 3D FreeScan Combo – це лазерний портативний 3D сканер промислового застосування (рис. 2. 23). Підходить для метрологічних вимірювань. Завдяки невеликим розмірам дає можливість використовувати його будь-де. Має невеликі розміри 193×63×53 мм, тому може бути застосований в різних місцях. Завдяки легкій вазі 620 г його можна без проблем переносити. Модель оснащена двома джерелами світла: синій лазер та інфрачервоний VCSEL (поверхнево-випромінюючий лазер з вертикальним резонатором). Є чотири режими роботи: багатолінійне сканування, однорядкове сканування, тонке сканування, інфрачервоне сканування.



Рисунок 2. 24 – 3D сканер FARO Focus S 150

FARO Focus – лазерний сканер, призначений для швидких та точних вимірів у трьох вимірах (рис. 2. 24). Портативний 3D сканер дозволяє здійснювати сканування об'ємних об'єктів, що мають складну форму та структуру, будівель, об'єктів постачання, місць події. Модель оснащена інтуїтивно-зрозумілим інтерфейсом із збільшеним сенсорним дисплеєм високої чіткості. Вбудована 8-мегапіксельна HDR-камера легко захоплює деталізовані зображення, забезпечуючи природний колір накладання на дані сканування в екстремальних умовах освітлення. Дальність вимірювань до 150 м, мала вага, невеликий розмір та

4,5-годинний час автономної роботи роблять лазерний сканер Focus S

найкращим вибором для швидкого та ефективного сканування. Можливе підключення додаткових аксесуарів за потребою.

HDR-зображення та HD-роздільна здатність фотографій гарантують достовірність результатів сканування з високою якістю даних. HDR є методом для захоплення зображень з декількома швидкостями експозиції та об'єднання їх в один шар зображення. Зображення HDR надає додаткову інформацію у темних або яскравих областях, які були б втрачені у стандартному зображенні. HDR-зображення відображатимуться у хмарі точок, створюваних лазерним сканером. Використання технології HDR дозволяє забезпечити надійну візуалізацію, навіть за екстремальних умов освітлення та на великій відстані, а також безпечний та швидкий збір даних.

Питання для самоперевірки

1. У чому полягає принцип контактного методу сканування?
2. У чому полягає принцип безконтактного методу сканування?
3. Які бувають системи пасивного сканування?
4. Опишіть принцип дії активних 3D сканерів.
5. Що являє собою сканування на основі фотограмметрії?
6. Для чого необхідні маркери?
7. Опишіть приклад реінжинірингу з використанням методу фотограмметрії.
8. Опишіть загальну схему зворотного інжинірингу промислових виробів з використанням оптико-цифрової установки.
9. Як виконується обробка даних сканування у програмі Qspect?
10. Опишіть принцип сканування на основі структурованого білого світла.
11. У чому полягає лазерна технологія сканування?

3. КООРДИНАТНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ МАШИНИ

3.1. Принцип роботи КВМ

Координатно-вимірювальні машини (КВМ) працюють на основі принципів високоточної геометрії і автоматизованої вимірювальної технології. Основним призначенням КВМ є визначення координат точок на поверхні предметів, що вимірюються, з високою точністю. Це досягається через використання різноманітних сенсорів, які можуть визначати відстані та кути в трьох напрямках: X , Y та Z . У КВМ використовується система координат, що дозволяє спроектувати простір вимірювання і формувати модель предмета. Вибір методу вимірювання залежить від використовуваного типу КВМ, адже механічні, оптичні та лазерні системи мають свої характерні особливості. Механічні КВМ зазвичай використовують контактні методи, де спеціальні датчики безпосередньо торкаються вимірюваного об'єкта, в той час як оптичні і лазерні системи забезпечують безконтактне вимірювання, що дозволяє уникнути можливих пошкоджень об'єкта. Важливе значення має також калібрування, яке забезпечує точність вимірювань шляхом врахування систематичних помилок. Системи управління КВМ, що базуються на комп'ютерних технологіях, здійснюють автоматизовану обробку даних, контролюючи роботу сенсорів і вимірювальних механізмів. При цьому програмне забезпечення, з використанням спеціальних алгоритмів, дозволяє здійснювати аналіз отриманих даних, генеруючи звіти про точність та відповідність розмірів конструкторським нормам.

Перші КВМ були механічними пристроями, що використовувалися для вимірювання довжин і кутів за допомогою гвинтових механізмів. В 1945 році американський інженер Томас Л. Грей запатентував першу координатно-вимірювальну машину, що була створена на базі простих механічних конструкцій і дозволяла виконувати вимірювання з більшою точністю у порівнянні з традиційними методами. У 70-х роках, з появою електроніки, проводились значні покращення у конструкції КВМ: інтеграція електронних датчиків дозволила підвищити точність та швидкість вимірювань. В цей же час з'явилися перші комп'ютеризовані КВМ, що пропонували можливість обробки вимірювальних даних в реальному часі. З початку 80-х років, завдяки розвитку лазерних технологій, лазерні КВМ стали доступними і

значно перевершили своїх механічних попередників за швидкістю та точністю. На сьогоднішній день КВМ продовжують еволюціонувати: сучасні моделі оснащені розвиненими сенсорами, можуть працювати з різними матеріалами і не тільки здатні виконувати вимірювання, але й аналізувати їх, інтегруючись у системи автоматизації виробництв.

Сучасні координатно-вимірювальні машини вимагають розвиненого програмно-математичного забезпечення. Дана вимога також обумовлена різноманітністю функцій, різними можливостями представлення результатів вимірювань, рівнем автоматизації вимірювань, різною кількістю вимірювальних головок, наявністю додаткових функцій КВМ (автоматична заміна вимірювальних наконечників, вбудованість КВМ в системи гнучкого автоматизованого виробництва, різноманітністю конструкцій КВМ. Складність конструкції КВМ і вирішуваних завдань визначає і широту їх класифікаційних відмінностей. В даний час налічується кілька десятків модифікацій КВМ, що розрізняються за точністю вимірювань, принципом управління, методом вимірювання, ступенем автоматизації, конструкції, розмірами робочого простору і т. д.

Тож, КВМ – це пристрій, який забезпечує установку вимірюваної деталі, взаємне переміщення системи КВМ, вимірювальної головки і деталі, вимірювання цих переміщень за координатами, обробку даних вимірювань і представлення результатів розрахунків вимірюваних геометричних параметрів. КВМ можуть застосовуватися для контролю практично всіх типів деталей, які зустрічаються в машинобудуванні, проте кожен тип деталей вимагає свого специфічного програмного забезпечення, вимірювального оснащення, змін в конструкції КВМ, а також спеціальної технології вимірів.

3.2. Типи координатно-вимірювальних машин

Існує кілька основних типів координатно-вимірювальних машин, які відрізняються за принципом роботи, конструктивними особливостями та областю застосування.

Механічні координатно-вимірювальні машини (КВМ) є одними з найстаріших типів вимірювального обладнання, що використовуються для точного визначення геометричних параметрів об'єктів. Вони складаються з

ряду механічних компонентів, серед яких основними є стійка, рухомі структури та вимірювальні головки. Принцип роботи механічних КВМ ґрунтується на переміщенні вимірювальної головки по координатних осях та визначенні координат точок на поверхнях об'єктів через механічні засоби, такі як штанги і шкали. Зазвичай, механічні КВМ використовують ручний або напівавтоматичний режим управління, що дозволяє оператору проводити вимірювання з високою точністю. Використання механічних КВМ є актуальним у тих випадках, коли вимоги до точності не є надто жорсткими, або коли КВМ можуть бути інтегровані в більш потужні автоматизовані системи контролю якості. Перевагами механічних КВМ є їхня простота в експлуатації, доступність та дешевизна, проте вони також мають свої недоліки. Наприклад, обмежена швидкість вимірювань, ризик механічних зносів з часом та чутливість до зовнішніх факторів, таких як температура і вологість, які в подальшому можуть впливати на точність вимірювань. Незважаючи на ці недоліки, механічні КВМ продовжують залишатися важливим інструментом у багатьох галузях промисловості, насамперед у машинобудуванні та автомобільній промисловості, де точне вимірювання є критично важливим для контролю якості продукції.

Оптичні координатно-вимірювальні машини (КВМ) базуються на принципах оптичної зйомки поверхонь за допомогою камер, проекторів та світлових сенсорів. Вони забезпечують безконтактне вимірювання, що особливо корисно при роботі з делікатними або м'якими матеріалами, які можуть бути пошкоджені при використанні механічних щупів. Оптичні КВМ використовують різні методи збору даних: триангуляцію, стереозйомку або фазовий зсув. Такі системи дозволяють швидко отримати тривимірну модель об'єкта з високою щільністю точок, що значно покращує точність геометричного аналізу. Вони ідеально підходять для контролю складних поверхонь і використовуються, зокрема, у приладобудуванні, стоматології, виробництві електроніки та ювелірній справі. До переваг оптичних КВМ належать висока швидкість сканування, можливість вимірювання без фізичного контакту та зменшення впливу людського чинника. Водночас вони є чутливими до зовнішніх освітлювальних умов і поверхневих характеристик об'єкта, що може впливати на точність вимірювання.

Лазерні координатно-вимірювальні машини (КВМ) є високотехнологічними пристроями, що застосовують лазерне випромінювання для надточного визначення координат поверхонь об'єктів. Основою їхньої роботи є

використання лазерного променя, який сканує об'єкт, а сенсори фіксують зміну положення променя, визначаючи координати точок. Такий тип КВМ забезпечує високу швидкість збирання даних та виняткову точність вимірювань, що робить їх незамінними у високоточному машинобудуванні, авіаційній та космічній промисловості. Лазерні КВМ дозволяють працювати з великими об'єктами, часто застосовуються для контролю великих конструкцій, зокрема каркасів літаків або автомобільних кузовів. Серед переваг — повна автоматизація процесу, мінімізація похибок через зношування компонентів і можливість роботи на великій відстані. До недоліків належать висока вартість обладнання, необхідність дотримання безпечних умов експлуатації та залежність результатів від оптичних властивостей поверхні.

Лазерний трекер відноситься до серії мобільних координатно-вимірювальних машин. Це вимірювальний пристрій, який фіксує 3D-координати об'єкта за допомогою комбінації вимірювання кута та інтерферометричного та/або абсолютного вимірювання відстані. Лазерний промінь прямує від лазерного трекера до призми. Від призми лазерний промінь відбивається назад до лазерного трекера. Це визначає відстань. Крім того, вбудовані кутові енкодери визначають вертикальні і горизонтальні кути між лазерним трекером і відбивачем. За допомогою цієї інформації (1 відстань, 2 кути) можна визначити точне 3D-положення об'єкта.



Рисунок 3.1 – Лазерний трекер Leica Absolute Tracker AT403

Всі вимірювання лазерним трекером Leica AT403 (рис. 3.1) виконуються на спеціальну візирну ціль. Завдяки системі стеження Power Lock трекер автоматично захоплює ціль і супроводжує її при переміщенні, що дає можливість проведення робіт однією людиною і виключає необхідність знаходження оператора безпосередньо поряд з трекером. Система автоматичного наведення ATR забезпечує точне наведення лазерного променя в центр візирної цілі, що підвищує швидкість і якість отриманих результатів, а також

мінімізує вплив людського фактору. Крім того, можливе віддалене керування трекером за допомогою пульта дистанційного керування.

Найбільший вимірювальний об'єм – до 320 метрів (Ø) – при мінімальній відстані вимірювання менше 0,8 метрів – робить лазерний трекер Leica AT403 універсальним інструментом, придатним як для обмірів великогабаритних об'єктів складної форми, так і для роботи в приміщеннях з обмеженим простором.

3.3. Класифікація КВМ за ступенем автоматизації

Сучасні координатно-вимірювальні машини класифікують не лише за типом конструкції чи принципом дії, але й за ступенем автоматизації процесу вимірювання. Від рівня автоматизації залежить швидкість виконання вимірювальних завдань, рівень залучення оператора та ймовірність виникнення людських помилок.

Ручні координатно-вимірювальні машини — це пристрої, керування якими здійснюється виключно оператором. Оператор переміщує щуп вручну вздовж трьох координатних осей для здійснення вимірювань. Такі машини зазвичай застосовуються для простих вимірювальних задач або в умовах невеликих майстерень, де не вимагається висока продуктивність. Основними перевагами ручних КВМ є їх порівняно низька вартість та простота обслуговування. Недоліком є залежність точності результатів від навичок оператора та значна трудомісткість вимірювального процесу.

У напівавтоматичних КВМ деякі функції автоматизовані, однак певні дії — наприклад, встановлення деталі або вибір точки вимірювання — виконуються вручну. Рухи по осях можуть здійснюватися за допомогою сервоприводів, що керуються оператором через пульт або комп'ютерний інтерфейс. Це дозволяє зменшити час вимірювань і покращити повторюваність, порівняно з ручними системами. Напівавтоматичні КВМ використовуються як перехідний етап між ручними та повністю автоматизованими машинами, коли ще зберігається потреба в гнучкості ручного керування.

Автоматичні координатно-вимірювальні машини забезпечують повністю програмоване керування всіма етапами вимірювального процесу

— від позиціювання щупа до збору, обробки та передачі даних. Такі системи потребують мінімального втручання оператора: достатньо лише правильно закріпити деталь і запустити програму вимірювання. Автоматичні КВМ широко застосовуються у великосерійному виробництві, де особливо важливими є повторюваність, точність і висока продуктивність. Крім того, вони дозволяють інтегрувати вимірювальні процеси безпосередньо у виробничі лінії, забезпечуючи контроль якості в реальному часі. Основними недоліками є висока вартість обладнання та складність обслуговування, що вимагає кваліфікованого персоналу.

3.4. Технології вимірювання

Сучасні КВМ використовують два основні підходи до вимірювання — контактні та безконтактні методи. Кожен із них має свої переваги, недоліки та сфери застосування.

Контактні методи вимірювання є найпоширенішими в КВМ і передбачають фізичний дотик з об'єктом. Вони включають:

Тактильні щупи (touch-trigger probes) — найбільш базовий інструмент. Щуп активується при контакті з поверхнею і передає координати точки в систему.

Сканувальні щупи (scanning probes) — дозволяють безперервно зчитувати дані з поверхні, що особливо ефективно для складних контурів.

Щупи з компенсованим тиском — використовуються для чутливих або м'яких матеріалів.

Технологія контактного сканування має ряд суттєвих обмежень, основні з яких такі: низька швидкість (крім випадків, коли необхідні точні виміри лише по небагатьом окремим точкам); проблематичність сканування внутрішніх об'ємів та отворів малого діаметра; стаціонарність установок та їх великі габарити.

Контактні сканери виявилися нездатними конкурувати з безконтактними, які позбавлені зазначених обмежень, і до теперішнього часу вийшли з вживання майже повністю. Небагато тих, хто залишився, змогли

втриматися на ринку лише завдяки глибокій модернізації, що забезпечила суттєве підвищення мобільності, продуктивності та якості вимірювань.

До таких КВМ можна віднести Creaform HandyProbe Next (рис. 3.1) – це серія контактних вимірювальних зондів, які замінюють собою традиційні координатно-вимірювальні машини (КВМ) і йдуть на додатак до лазерних 3D-сканерів Creaform MetraScan.



Рисунок 3.1 – Creaform HandyProbe Next

Серія включає моделі HandyPROBE Next і HandyPROBE Next Elite, які дозволяють проводити вимірювання об'єктів простої форми (площини, конуси, циліндри і т.д.) і зберігати результати вимірювань у вигляді САПР-даних. Працюючи узгоджено з оптичним трекером C-Track, зонди HandyProbe Next забезпечують високоточні вимірювання з похибкою до 22 мкм.



Рисунок 3.2 – HandyPROBE та сканер MetraSCAN

Creaform HandyProbe Next це портативна система для вимірювання розмірів деталей з датчиком і двокамерним пристроєм C-Track. Цей портативний пристрій спеціально розроблено та оптимізовано для роботи в реальних умовах. На відміну від інших технологій, дана система забезпечує максимальну свободу переміщення і збільшує продуктивність і якість вимірювань.

Оптичний датчик C-Track з двома камерами – компактна і комплексна система для 3D вимірювань, що відмінно поєднується з іншими продуктами

Creaform, наприклад, з HandyPROBE або сканерами MetraSCAN (рис.3.2). Датчик обладнаний високочутливою оптикою і світловідбивачами, має конструкцію, що підтримує до 6 ступенів свободи при вимірах, тому здатний вести безперервні і дуже точні динамічні вимірювання.

Завдання, що розв'язуються обладнанням:

Технічний контроль: аналіз готової деталі для застосування системи автоматизованого проектування (CAD), технічний контроль першої обробленої деталі, технічний контроль якості, при використанні спільно з оптичним координатно-вимірювальним сканером MetraSCAN 3D, дає можливість отримати контроль вільної форми і генерує кольорові зображення високої оптичної щільності.

Реверсивне проектування: реверсивне проектування геометричних об'єктів (сфер, циліндрів, площин), при використанні спільно з оптичним координатно-вимірювальним сканером MetraSCAN 3D, дає можливість отримати більш швидке і точніше реверсивне проектування змішаних деталей (геометричної форми та вільної форми).

Безконтактні методи використовуються для вимірювання об'єктів з високою чутливістю до дотику або дуже складною геометрією. Оптичні системи — базуються на камерах і світлових сенсорах. Часто використовуються лазерні або структуровані світлові сканери. Лазерні сканери — створюють хмару точок на основі відбитого променя від поверхні. Біле світло або мультиспектральне сканування — для досягнення високої точності при аналізі кольору та текстури.

3.5. Конструктивні рішення КВМ

Процес вимірювання на координатно-вимірювальних машинах ґрунтується на взаємному переміщенні об'єкта контролю та вимірювального сенсора. Конструктивні рішення різних моделей передбачають різні варіанти реалізації цих переміщень – від повністю рухомого сенсора до комбінованого руху деталі та датчика.

У більшості випадків, особливо при контролі масивних та габаритних виробів, застосовується схема з нерухомим об'єктом та рухомим

вимірювальним датчиком. При роботі з компактними деталями часто використовується варіант з переміщенням вимірювального столу по одній, рідше по двох координатах.

Орієнтація координатних осей визначається умовно – зазвичай вісь з найбільшим діапазоном вимірювання позначається як X, а вертикальна вісь, перпендикулярна до основи машини, визначається як Z.

Такі конструктивні особливості забезпечують можливість прецизійного вимірювання геометричних параметрів об'єктів у тривимірному просторі, що дозволяє ефективно вирішувати різноманітні задачі метрологічного контролю у промисловому виробництві.

Портальна координатно-вимірювальна машина, наприклад Hexagon GLOBAL Performance, (рис 3.3) являє собою спеціалізований комплекс, що використовує конструкцію портального типу для контролю геометричних параметрів. Її відмінними рисами є значні габарити та висока точність, що дозволяє працювати з масивними деталями.

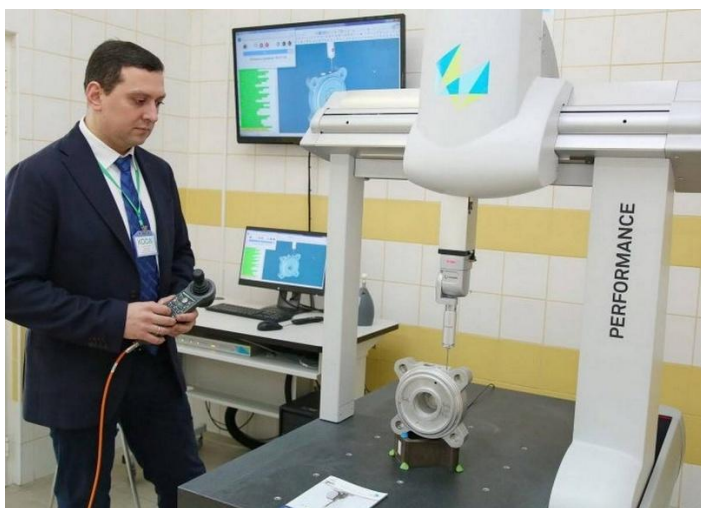


Рисунок 3.3 – КВМ Hexagon GLOBAL Performance

Контрольно вимірювальна машина Hexagon GLOBAL Performance, виробник – Hexagon (Німеччина) призначена для вимірювання різних об'єктів від корпусних деталей до деталей зі складним профілем чи довільної форми. Можливе підключення контактних та безконтактних датчиків до КВМ. Висока точність вимірювань у діапазоні темпера-

тур від 16 °C до 26 °C за рахунок застосування системи температурної компенсації типу CLIMA у всіх машинах серії GLOBAL Performance як стандартне обладнання.

Конструктивно машина складається з порталу на вертикальних опорах із поперечною балкою. Така архітектура забезпечує стабільність переміщення вимірювальної платформи з датчиком. Платформа має можливість руху за трьома координатними осями для здійснення просторових вимірювань.

Система оснащується різноманітними вимірювальними засобами: контактними щупами, лазерними сенсорами, оптичними сканерами та камерами. Це забезпечує прецизійний контроль геометричних характеристик об'єктів.

Відмінними особливостями порталних машин є висока точність та повторюваність вимірювань, що досягається жорсткістю конструкції та застосуванням прецизійних приводів і датчиків. Такі характеристики дозволяють контролювати навіть мініатюрні деталі з високою достовірністю.

Сучасні порталні системи оснащуються засобами автоматизації та спеціалізованим програмним забезпеченням. Це мінімізує участь оператора, забезпечуючи автоматичне виконання вимірювань, обробку даних та аналіз результатів. Деякі моделі підтримують режим сканування поверхонь для отримання повної тривимірної моделі об'єкта, що особливо важливо при контролі складних форм.

Порталні координатно-вимірювальні машини знаходять широке застосування в галузях, де критична висока точність вимірювань: автомобілебудуванні, аерокосмічній промисловості, металообробці, виробництві медичного обладнання та електроніки.

Консольний тип координатно-вимірювальної машини (рис. 3.4) характеризується специфічною конструкцією з опорною консолю, на якій монтується вимірювальний датчик. Обладнання може комплектуватися різними типами сенсорів – контактними щупами, оптичними та лазерними сканерами. Керування здійснюється за допомогою комп'ютерної системи, що забезпечує автоматизацію вимірювань з високою точністю та продуктивністю.

Функціональні можливості консольних машин дозволяють контролювати широкий спектр параметрів: лінійні розміри, геометричну форму, прямолінійність, паралельність та перпендикулярність поверхонь. Це робить їх універсальним інструментом для різноманітних задач метрологічного контролю. Значний робочий простір цих машин забезпечує можливість вимірювання об'єктів різної конфігурації та габаритів, що особливо важливо при контролі



Рисунок 3.4 – Оптично-вимірювальна машина IMI-CNC500 Metrology

великогабаритних та складнопрофільних деталей у промисловому виробництві.

Такі КВМ називають машинами *стійкового* типу, адже при консольному положенні датчика торкання встановлюється одна стійка. Вона може і переміщатися, і бути нерухомою. За своїм призначенням і за конструкцією прилади такого типу можуть бути розділені на дві групи.

У машинах першої групи стійка для установки на консолі датчика зроблена відносно легкою і часто переміщається на велику довжину при вимірі. Консольні машини першої групи призначені для виміру з невисокою точністю із-за невисокої жорсткості. Діапазон виміру таких машин найрізноманітніший: від малих (300...700 мм) по усім осям до 24 м по одній з осей (X). Консольні КВМ з великим діапазоном виміру використовують в основному для виміру корпусних деталей літаків, кораблів, автомашин і т. д. Таких машин встановлюють іноді по дві і більше на одній вимірювальній позиції з незалежними системами. До цього ж типу машин можна віднести КВМ, які дістали назву вимірювальні роботи. Ці консольні КВМ, призначені для установки безпосередньо у конвеєра автоматичної лінії, у тому числі і в гнучких виробничих системах.

У консольних машинах другої групи для установки датчика торкання зроблена стійка важкої конструкції, що переміщається на невелику довжину по одній координаті. Консольні машини другої групи із стійкою важкого типу мають більшу жорсткість, ніж перші машини, і служать для виміру з високою точністю.

Мостова координатно-вимірювальна машина (рис. 3.5) відрізняється характерною конструкцією у вигляді мостової системи з горизонтальними балками, по яких переміщуються вимірювальний датчик та робоча платформа.

Ключовими характеристиками таких машин є можливість горизонтального переміщення вимірювального модуля та робочого столу вздовж балок, що дозволяє контролювати габаритні деталі та здійснювати вимірювання на значній площі. Жорстка мостова конструкція забезпечує високу



Рисунок 3.5 – Мостова КВМ LK Metrology AEROS P Series

точність вимірювань, а багато-осьова система переміщень розширює функціональні можливості контролю різноманітних параметрів.

Мостове компонування використовується у великогабаритних координатно-вимірювальних машинах різних класів точності і є для них основним. У мостових КВМ каретка з пінолями переміщається рухомою траверсою. Рухлива траверса спирається на кінці горизонтальних нерухомих балок, які піднімаються до стояків стільниці для кріплення деталей. На одній із балок встановлені датчики приводу та переміщення. КВМ з таким компонуванням має обмежений доступ до компонентів навантаження та доступ до контрольних вимірів. Компонування мосту забезпечує рухомий блок з малою масою, високу жорсткість та стійкість у порівнянні з іншими компонуваннями. Дана компоновка є ідеальним рішенням для вимірювання великогабаритних деталей у важкому та транспортному машинобудуванні, кораблебудуванні, аерокосмічній промисловості та інших. Деякою незручністю КВМ мостового типу є ускладнений доступ до вимірюваної деталі.



Рисунок 3.6 – КВМ типу «Рука» ROMER Absolute Arm 7

обертання навколо осей не обмежене – технологія *infinite rotation*.

Ці пристрої дуже компактні, дуже легкі та розташовуються безпосередньо біля об'єкта, що вимірюється. Принцип роботи полягає в тому що оператор торкається щупом до точки вимірювання і фіксує маніпулятор у зручному робочому місці. Дані про просторові координати вістря зонда отримують за допомогою датчиків, зазвичай розміщених на шарнірах маніпулятора. Ці КВМ мають плечовий, ліктьовий та кистьовий суглоби. Тому цей вид КВМ ще має назву «вимірювальні руки». На плечовому суглобі розташована кріпильна плита, за допомогою якої машина встановлюється на плоску

КВМ типу «Рука»

(рис. 3.6) дозволяє здійснювати 3D сканування, 3D моделювання, контроль форми, реверс-інжиніринг, швидке прототипування – система є універсальним метрологічним інструментом для широкого кола завдань. Економічно ефективна лазерна система сканування. Не потрібні додаткові кабелі для зв'язку сканера з вимірювальною рукою,

поверхню. На кистьовому суглобі монтується вимірювальний щуп. У кожному суглобі розташовуються датчики кутових переміщень (енкодери). Вони відраховують відносні кути повороту кожного з суглобів. При відомих довжинах відповідних частин руки можливо розрахувати положення у просторі вимірювального щупа у заданій системі координат. Якщо система координат не задана, вона, як правило, розташована у центрі установчої плити ВМ.

Робочою зоною КВМ є сфера з різними діаметрами. Система має активну температурну компенсацію. На кожній ланці плеча розміщені два датчики температури з інформацією про те, що у виміряні координати вносяться поправки для врахування зміни довжини ланки в залежності від температури. Мобільні КВМ не мають приводу і є машинами типу маніпулятора, тому всі переміщення ланок і фіксація точки заміру проводяться оператором вручну. Вимірювання здійснюється в комплексі з персональним комп'ютером, а для підвищення мобільності краще використовувати ноутбук.

Варто також відзначити можливість контролю складних поверхонь, наприклад, формоутворюючих поверхонь штампа, правильність виготовлення яких практично неможливо перевірити жодним приладом, крім КВМ.

Щоб контролювати подібні вироби необхідно використовувати САД-модель, причому вона може бути трансльована з будь-якої САД системи. Дуже часто КВМ використовують також для сканування дослідних зразків виробу.

Маніпулятор оснащений швидкозмінними щупами, тобто попередньо відкаліброваними. Коли змінюють щуп, система автоматично розпізнає його та внесе необхідну поправку. Кріплення КВМ поблизу вимірюваного об'єкта можна робити під будь-яким кутом від 0 до 180°.

Така конструкція та програмне забезпечення дозволяють використовувати КВМ одним оператором. Маса маніпуляторів, залежно від виконання, коливається від 5 до 10 кілограмів. «Рука» не має приводу, і оператор вручну переміщує вимірювальний щуп і фіксує точку вимірювання. Вимірюють як лінійні, так і кутові розміри основних геометричних елементів і порівнюють їх із 3D-моделями, створеними в будь-якій системі САПР. Відхилення фактичних розмірів вимірюваного об'єкта від номінальних значень

відображаються не тільки в числовій формі, але і кольором поверхні моделі для наочності.

3.6. Складові частини КВМ

Координатно-вимірювальна машина складається з кількох основних компонентів, які забезпечують її функціональність, точність і надійність. Основними складовими частинами є сенсори, системи управління та програмне забезпечення.

Сенсори (або вимірювальні головки) — ключові елементи, що безпосередньо взаємодіють із деталлю та фіксують її геометричні характеристики. Вони бувають:

Контактні — працюють через фізичне доторкання до поверхні деталі, наприклад, за допомогою щупів. Відзначаються високою точністю, але не завжди придатні для м'яких або чутливих поверхонь.

Безконтактні — використовують лазерне чи оптичне сканування. Підходять для швидкого вимірювання складних форм або тендітних деталей.

Системи управління координують рух елементів КВМ і забезпечують точну синхронізацію між механічною частиною та сенсором. Вони включають:

Контролери руху — відповідають за координування осей X, Y, Z.

Приводи та серводвигуни — забезпечують переміщення вимірювального модуля.

Інтерфейси зв'язку — передають дані від сенсорів до комп'ютера та назад.

Програмне забезпечення (ПЗ) виконує роль інтерфейсу між користувачем і системою. Воно дозволяє створювати програми для вимірювань, візуалізувати результати та формувати звіти. Функції ПЗ включають: створення маршрутів вимірювання; обробка та аналіз даних; порівняння вимірювань із CAD-моделями; автоматизація процесів та інтеграція в систему якості підприємства.

Сучасні координатно-вимірвальні машини (КВМ) використовують широкий спектр програмного забезпечення, що забезпечує точне вимірювання, візуалізацію результатів і автоматизацію процесів. Найбільш популярними та поширеними програмами є:

PC-DMIS (Hexagon). Найпоширеніше ПЗ у світі для КВМ. Підтримує як контактні, так і безконтактні вимірювання, можливість імпорту САД-моделей, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для програмування та аналізу результатів, підтримує автоматичну генерацію маршрутів вимірювань.

QUINDOS (Hexagon). Використовується для складних форм, таких як зубчасті колеса, шестерні, турбінні лопатки. Базується на модульному підході — можна додавати функції під конкретні потреби.

Calypso (ZEISS). Програмне забезпечення німецької компанії ZEISS. Сумісне з САД, забезпечує автоматичне створення вимірвальних програм. Має високу точність обробки результатів. Добре підходить для промислових середовищ з вимогами до якості.

Metrolog X4 / Metrologic Group. Використовується для 3D вимірювань і зворотного інжинірингу. Підтримує понад 100 моделей КВМ різних виробників. Інтегрується з роботизованими вимірвальними системами.

PolyWorksInspector™ (InnovMetric). Основний акцент на 3D сканування та безконтактні методи. Часто використовується у поєднанні з лазерними трекерами та сканерами. Дає змогу інтегрувати вимірювання в реальному часі у виробничі процеси.

MODUS (Renishaw). Розроблене для роботи з 5-осьовими вимірвальними системами Renishaw. Підтримує точне сканування складних геометрій. Має потужні аналітичні інструменти для роботи з великими обсягами даних.

PowerInspect (Autodesk) Підходить для гібридних середовищ — КВМ, мануальні прилади, сканери. Підтримує як контроль якості, так і зворотне проектування. Ці програми можуть використовуватися окремо або в комбінації, залежно від типу КВМ, виробника обладнання, сфери застосування та складності вимірювань.

3.7 Застосування КВМ в промисловості

Координатно-вимірювальні машини (КВМ) знайшли широке застосування в різних галузях промисловості, де точність та повторюваність вимірювань мають вирішальне значення для якості готової продукції. Вони використовуються як у серійному виробництві, так і в одиничному чи дослідному, забезпечуючи контроль відповідності деталей технічним умовам, нормативам та стандартам. Усі сучасні виробництва, орієнтовані на високу якість, інтегрують КВМ у свій технологічний процес, що дозволяє зменшити ризики дефектів, оптимізувати витрати на контроль якості та прискорити випуск продукції на ринок.

У сфері автомобілебудування КВМ є невід'ємною частиною системи якості. Їх використовують на всіх етапах виробництва — від перевірки прототипів до контролю серійного випуску. Координатно-вимірювальні машини дозволяють точно перевіряти такі деталі, як блоки циліндрів, поршні, шатуни, елементи трансмісій та кузовні панелі.

Особливо актуальним є застосування КВМ у контролі геометрії кузова автомобіля, що напряму впливає на аеродинаміку, збирання та безпеку транспортного засобу. У багатьох автоконцернах КВМ інтегруються у виробничі лінії як частина автоматизованого контролю. Завдяки використанню роботизованих КВМ забезпечується висока швидкість контролю без втрати точності, що дозволяє оперативно виявляти та усувати відхилення.

Авіаційна галузь висуває винятково жорсткі вимоги до точності виготовлення елементів. КВМ тут використовуються для вимірювання геометричних параметрів корпусних частин літаків, турбін, крил, елементів двигунів, гідросистем, а також систем керування польотом.

Для роботи з габаритними або складнопрофільними деталями застосовуються великогабаритні порталні КВМ або мобільні системи на базі лазерних трекерів, що дозволяють проводити вимірювання прямо в цеху без потреби транспортування виробу. КВМ також застосовуються під час модернізації чи технічного обслуговування літаків, забезпечуючи високу точність розрахунків геометрії при ремонтах та замінах елементів.

У загальному машинобудуванні КВМ слугують незамінним інструментом для контролю широкого спектру деталей: від простих корпусів до

складних механічних вузлів із великою кількістю отворів, виступів, фасок та інших геометричних елементів.

Висока точність вимірювань дозволяє мінімізувати похибки при механічній обробці, а отже — підвищити ефективність роботи всього підприємства. Крім того, завдяки збереженню вимірювальної інформації, підприємства отримують можливість простежити історію виготовлення кожної деталі, що сприяє кращому аналізу браку та вдосконаленню технологічних процесів.

В оборонному секторі координатно-вимірювальні машини виконують критично важливу функцію — гарантування надійності та безпеки виробів військового призначення. КВМ використовуються для вимірювання корпусів бронетехніки, частин стрілецької зброї, елементів ракетно-артилерійських систем, прицільних пристроїв та засобів наведення.

У багатьох випадках йдеться про вироби з високим ступенем складності, виготовлені з матеріалів, що важко обробляються. Точність вимірювань визначає ефективність та безвідмовність функціонування озброєння. Через підвищені вимоги до конфіденційності та точності в оборонній галузі часто використовуються спеціалізовані КВМ з додатковими модулями для верифікації, багаторівневого контролю й інтеграції в захищені інформаційні середовища.

Питання для самоперевірки

1. Опишіть принцип роботи КВМ.
2. Які бувають типи КВМ?
3. Які бувають КВМ за ступенем автоматизації?
4. Які існують технології вимірювання?
5. Які існують конструктивні рішення КВМ?
6. З яких основних компонентів складаються КВМ?
7. Назвіть галузі промисловості в яких застосовуються КВМ.

4. АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ

4.1 Загальні відомості про адитивні технології

Адитивне виробництво (additive manufacturing), або адитивний технологічний процес згідно зі стандартом ISO/ASTM 52900:2015 – це процес виготовлення деталей, який заснований на створенні фізичного об'єкта за електронною моделлю шляхом додавання матеріалу, як правило, шар за шаром, на відміну від традиційного виробництва, яке базується на відніманні матеріалу (механічній обробці) і традиційного формоутворюючого виробництва (наприклад, литті та штампуванні).

Згідно зі стандартами ASTM, прийнятними термінами є Additive Fabrication (AF) та Additive Manufacturing (AM), а також їх синоніми – additive processes (адитивні процеси), additive techniques (адитивна техніка), additive layer manufacturing (пошарове адитивне виробництво), layer manufacturing (пошарове виготовлення) і freeform fabrication (виготовлення вільних форм). Взагалі ці терміни можуть бути узагальнені та перекладені як «адитивні технології».

Замість поняття «адитивне виробництво» часто використовується його синоніми: «тривимірний друк» або «3D-друк», зокрема цей термін асоціюють з 3D принтерами, що використовуються не в промислових цілях, наприклад, тривимірні принтери на базі процесу екструзії матеріалу мають попит у приватних осіб, які купують ці машини.

Термін «3D-друк» (3D-printing) є загальноприйнятою розмовною (і модною) назвою адитивних технологій. Він з'явився в 1995 році завдяки студентам Массачусетського технологічного інституту.

Створення сучасних адитивних технологій пов'язують зі стереолітографією, яку розробив Отто Джон Мюнц у 1951 році. Однак, термін «адитивні технології» (раніше «швидке прототипування») був запроваджений в 1986 році, коли компанія 3D Systems створила першу установку лазерної стереолітографії, яка знайшла своє застосування в оборонній промисловості. Перші установки мали недоліки, такі як висока вартість та обмежений вибір матеріалів для створення моделей.

Знаменною подією початку адитивного виробництва, стало 9 березня 1983 року, коли Чарльз У. Халл, у подальшому співзасновник, виконавчий віце-президент та головний директор з технологій компанії 3D Systems, успішно надрукував невелику пластикову чашку новим способом – пошаровим накладенням за допомогою ультрафіолетового випромінювання на першій системі адитивного виробництва: стереолітографічний апарат SLA-1, який він сам побудував.

У 1986 році Карл Р. Декард з Техаського університету розробляє «метод і апарат виробництва деталей методом селективного спікання», що є першим кроком у розвитку адитивного виробництва з допомогою селективного спікання (СС).

У 1988 році Михайло Фейгін та його команда в Helisys, Inc. розробляють метод «формування цілісних об'єктів з ламінатів», автоматичну систему різання ламінатів (ламіноване виробництво – LM), яка виробляє шари з розмірами, розміченими в електронному файлі, шари, які склеюватимуться для формування остаточного прототипу.

У 1989 році Скотт С. Крамп із компанії Stratasys, Inc. розробляє «апарат та метод для створення тривимірних об'єктів», що є першим кроком у розвитку адитивного виробництва за допомогою моделювання методом пошарового наплавлення (FDM).

У 1989 році Емануель М. Сакс та його команда в Массачусетському технологічному інституті розробляють «методи тривимірного друку» – процес упорскування сполучної речовини та кольорового чорнила на шар порошкоподібного матеріалу з використанням для цього інжекторів звичайного струминного принтера.

Початок інтенсивного розвитку адитивних технологій пов'язаний з розширенням можливостей комп'ютерного проектування (CAD) та технологічної підготовки виробництва (CAM). Сьогодні адитивні технології використовуються практично в усіх галузях виробництва, а в найближчому майбутньому вони стануть пріоритетними в машинобудуванні.

Однією з переваг адитивних технологій є економія вихідного матеріалу при виготовленні виробів. До цього додається можливість передачі 3D-моделі виробу за допомогою комп'ютерної мережі та його створення в будь-якому місці і часі, що є важливою перевагою.

Аддитивні технології мають унікальні можливості для отримання виробів зі складною геометричною структурою поверхні, складними матеріальними композиціями, ієрархічною складністю та функціональною складністю. Завдяки цим можливостям, аддитивні технології знайшли широке застосування в різних галузях, включаючи виробництво кінематичних виробів та створення ієрархічних багатовимірних структур.

Розвиток аддитивних технологій демонструє вражаючу динаміку на ринку виробництва. Щорічне зростання ринку аддитивного виробництва становить близько 27%, що значно перевершує інші галузі виробництва. На використання аддитивних технологій в ланцюгу виготовлення виробу в окремих випадках може бути витрачено до 10% його собівартості. Визначення нових шляхів застосування АМ стає головним напрямком розвитку цієї галузі.

Згідно зі звітом консалтингової компанії Wohlers Associates Inc., на ринку аддитивних технологій в 2014 році найбільшу частку складає швидке прототипування – 35%, а інструментальне виробництво – 25%. Решта обсягу ринку припадає на дослідження та освіту. Більше половини обсягу ринку (54%) становить продукція технологій, 26% – виробництво обладнання, а 19% – виробництво вихідних матеріалів.

У світі встановлено більше 100 тисяч промислових АМ-установок, з яких 38% установок вартістю понад 5 тисяч доларів США працювали в США, 9,3% – в Японії, 9,2% – в Китаї, а 8,7% – в Німеччині. У той же час решта країн світу значно відстає від цих лідерів.

У 2014 році понад 91% загального обсягу продажу АМ-установок склали настільні 3D-принтери, тоді як менше 9% становили промислові АМ-установки. Прибуток від продажу промислових АМ-установок становив 1,12 млрд. доларів США, що склало 86,6% від загального обсягу. Сегмент недорогих 3D-принтерів для виготовлення макетів, призначених для офісного використання, демонструє найбільше зростання в цій галузі. За вартістю, настільні АМ-машини (3D-принтери) становлять 13,4% ринку аддитивних технологій, що складає 173,2 млн. доларів США.

На міжнародному ринку висококласних АМ-установок вартістю від 200 тис. до 2 млн. дол. США з конкурентами можуть зустрітися шістнадцять європейських, сім китайських, п'ять американських і дві японські компанії. Серед провідних гравців варто відзначити американські компанії 3D Systems, DTM, Makerbot, Helisys, Solidscape, Stratasys, Z Corporation та

ExOne, англійську Bits from Bytes, ізраїльські Objet та Solido, італійську DWS, китайську Beijing Yinhuа, шведську Arcam, а також німецькі EOS, Envisiontec і Voxxjet.

Залежно від кінцевого результату виділяють кілька напрямків застосування адитивних технологій:

Виготовлення деталей (Rapid Patterns), які будуть використовуватися як шаблони для кінцевого виробу. Часто застосовують у ювелірній справі.

Виготовлення прес-форм (Rapid Tooling) за допомогою адитивних методів. Потім їх можна використовувати для формування та лиття виробів.

Пряме цифрове виробництво (Direct Digital Manufacturing, DDM). Виготовлення адитивних способів кінцевого продукту.

На сьогоднішній день існує значна кількість успішно реалізованих адитивних технологій на основі принципу пошарового нарощування виробів. Основні методи включають:

DLP (Digital Light Processing) – цифрова обробка світлом;

DMD (Direct Metal Deposition) – пряме нанесення металу;

DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – пряме лазерне спікання металу;

FDM (Fused Deposition Modeling) – моделювання пошаровим наплавленням;

FPM (Fused Pellet Modeling) – моделювання плавленими гранулами;

HIS (Holographic Interference Solidification) – затвердіння голографічною інтерференцією;

Ink-Jet (Binder Jetting) – пошарове склеювання композитного порошку сполучних речовин;

LOM (Laminated Object Manufacturing) – виготовлення об'єктів ламінуванням;

SLA (Stereo Litographics Apparatus) – стереолітографія;

SLS (Selective Laser Sintering) – селективне лазерне спікання;

SLM (Selective Laser Melting) – селективне лазерне розплавлення.

4.2. Селективне лазерне плавлення (SLM)

SLM (Selective Laser Melting) – селективне лазерне плавлення металічного порошку за математичними CAD моделями за допомогою лазера. Принципова схема роботи методу SLM показана на рис. 4.1.

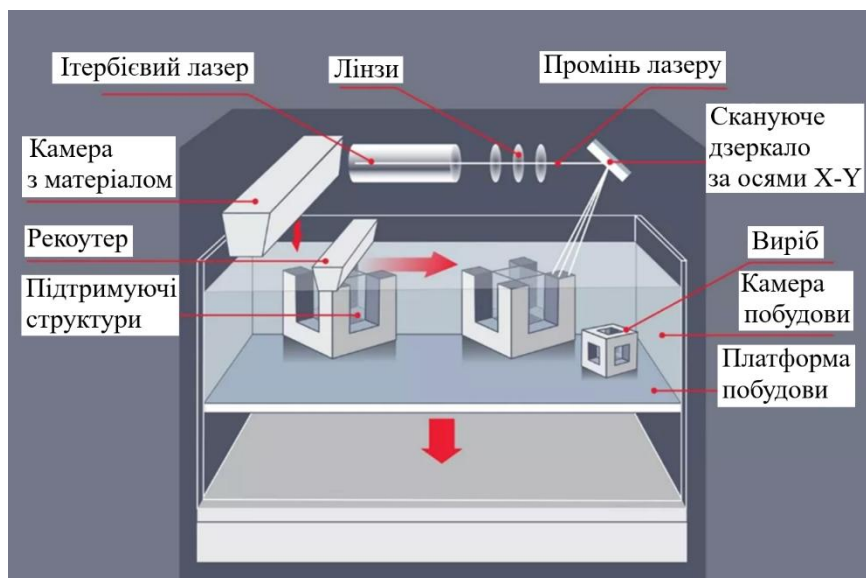


Рисунок 4.1 – Схема методу SLM

Ідея використання лазерів для обробки матеріалів виникла ще в середині XX століття, однак технологія SLM почала активно розвиватися лише в 1990-х роках, коли компанії та дослідницькі інститути почали використовувати лазери для створення металевих виробів. Перша система для адитивного виробництва, заснована на використанні лазерного плавлення металевого порошку, була розроблена в компанії EOS GmbH в Німеччині. З тих пір технологія SLM значно вдосконалилася, і сьогодні вона використовується для виготовлення високоточних компонентів для аерокосмічної, медичної та інших галузей. Зокрема, однією з основних переваг технології є можливість виготовлення виробів без потреби у виготовленні складних форм і шаблонів, що значно знижує витрати на виробничі процеси і час, необхідний для виготовлення серійних партій.

Переваги таких 3D принтерів: зменшення маси виробів, механічні характеристики можна порівняти з литтям, отримання виробів у найкоротші терміни, висока точність і повторюваність, свобода в проектуванні та виробництві, широкий вибір матеріалів.

3D друк металом – це одна з найінноваційних технологій на сьогоднішній день. Вона дозволяє створювати металеві вироби з неповторним дизайном та високою точністю. 3D друк металом використовується в різних галузях, починаючи від авіабудування, закінчуючи виробництвом ювелірних прикрас.

Суть технології селективного лазерного спікання полягає в тому, що порошковий матеріал поступово наноситься на платформу, а лазер плавить і спікає лише ті ділянки порошку, які визначені цифровою 3D-моделлю. Лазерний промінь сканує по кожному шару порошку відповідно до розрахованої траєкторії, спікаючи порошок і формуючи тверду поверхню, яка згодом стає частиною готового виробу. Важливою особливістю є те, що кожен наступний шар наноситься тільки на вже спечені ділянки попереднього шару, що дозволяє поступово створювати об'ємні вироби. Це забезпечує можливість виготовлення геометрично складних структур без потреби в додаткових підтримуючих елементах, що часто є необхідними в інших методах виготовлення. У порівнянні з традиційними методами, SLM дає змогу створювати деталі з внутрішньою пористістю або складними порожнинами, що мають високу механічну міцність при значному зменшенні ваги виробу.

Процес 3D друку металом починається зі створення тривимірної моделі об'єкта, яка може бути створена в спеціальних програмах для 3D моделювання або за допомогою 3D сканера. Потім модель відправляється в принтер, який друкує об'єкт з металевого порошку. Технологія 3D друку металом може використовувати кілька видів матеріалів, таких як сталь, алюміній, титан та інші. Після завершення процесу друку, об'єкт може бути підданий обробці, такий як полірування та фарбування. Основним матеріалом для 3D друку є металевий порошок з фракціями 15...45 мкм, 20...63 мкм та 50...150 мкм та іншими таких асортиментів: нержавіюча сталь 08X18H10T, 316L, 904L, 17-4PH; інконель 625, 718; сплав титану Ti6Al4V, Ti Gd II; сплав алюмінію AlSi10Mg, AlSi12, AlSi9Cu3; бронзовий сплав CuSn10; нікелевий сплав Invar 36, NX; сплав кобальт-хром CoCr28Mo6 та ін. Металеві порошки виготовляються методом плазмової атомізації, який дозволяє отримувати порошки з високим ступенем чистоти та мінімальним вмістом домішок. Процес виробництва включає: розпорошення – створення дрібних крапель розплавленого металу за допомогою плазми; сфероїдизація – формування однорідної форми частинок.

Процес селективного лазерного спікання (SLM) є складною технологією, що включає кілька етапів, кожен з яких має свої особливості і вимоги. Завдяки використанню лазерного променя для плавлення та спікання порошкового матеріалу, SLM дає можливість створювати високоточні деталі, що можуть бути використані в різних промислових галузях, таких як аерокосмічна, медична та автомобільна промисловість. Першим етапом є підготовка цифрової моделі. виготовлення деталі починається з розробки 3D-моделі, яка створюється за допомогою програмного забезпечення CAD (Computer-Aided Design). Модель повинна бути переведена у формат, придатний для 3D-друку, зазвичай STL або 3MF. Наступним кроком є поділ цієї моделі на шари, щоб забезпечити точність та деталізацію в процесі друку. Шари, зазвичай, мають товщину від 20 до 100 мікрон. Після підготовки цифрової моделі та її розбиття на шари, готується обладнання. Порошковий матеріал, що використовується в процесі, повинен бути однорідним та мати певну фракцію – зазвичай це металевий порошок з зернами діаметром від 10 до 45 мкм. Порошок завантажується в спеціальний резервуар, і відбувається його подача на будівельну платформу. Коли матеріал готовий, наноситься перший шар порошку, який зазвичай має товщину від 30 до 100 мікрон. Для цього використовується механізм, що рівномірно розподіляє порошок по поверхні. Далі починається процес лазерного спікання. Лазерний промінь високої потужності направляється на порошковий матеріал і спікає його, створюючи тверду поверхню. Лазер сканує кожен шар за заданою траєкторією, що відповідає контуру 3D-моделі, і плавить порошок лише в необхідних місцях. Після завершення спікання одного шару платформа опускається на певну висоту, і наноситься наступний шар порошку. Цей процес повторюється для кожного шару, поки не буде сформована вся деталь. Завдяки цій послідовності кожен наступний шар з'єднується з попереднім, утворюючи єдину міцну конструкцію. Після того як деталь завершена, вона повинна охолонути. Охолодження є важливим етапом, оскільки дозволяє знизити внутрішні напруження в матеріалі і запобігти появі тріщин або деформацій. Після охолодження деталь виймається з обладнання. У процесі виробництва SLM важливо також використовувати спеціалізоване обладнання, яке складається з лазерного генератора, системи керування лазером, будівельної платформи та програмного забезпечення для підготовки моделей. Лазерний генератор створює високопотужний лазерний промінь, а система керування лазером точно контролює його рух, щоб досягти необхідної точності при створенні кожного шару. Програмне забезпечення для підготовки моделей відповідає

за переведення 3D-моделі в формат, що підходить для 3D-друку, і генерує шари, які мають бути спечені. Один з найбільш поширених програмних пакетів для цього – Magics від компанії Materialise. Важливою частиною технології є контроль якості, оскільки виготовлені деталі повинні відповідати строгим вимогам. Це включає візуальний контроль для перевірки наявності дефектів, таких як тріщини чи пористість, а також мікроструктурний аналіз, який дозволяє виявити можливі недоліки всередині матеріалу. Механічні випробування перевіряють міцність виробу, а рентгенівська дефектоскопія використовується для виявлення прихованих тріщин або дефектів.

Однією з головних переваг 3D друку металом є можливість створення комплексних геометричних форм, які важко чи неможливо зробити традиційними методами виробництва. Завдяки цій технології, тепер можна створювати деталі з більш високою точністю і якістю. Крім того, 3D друк металом дозволяє виробляти дрібні деталі з високою роздільною здатністю і деталізацією.

3D друк металом знайшов своє застосування у багатьох галузях промисловості. В авіаційній галузі 3D друк металом використовується для виробництва деталей двигунів та інших складних механізмів, які мають критичне значення для безпеки польотів. У медичній галузі 3D друк металом дозволяє створювати кісткові та зубні імплантати, які точно відповідають індивідуальним потребам пацієнта. В області ювелірних виробів 3D друк металом дає можливість створювати унікальні, індивідуальні дизайни, які неможливо відтворити вручну.

Фірми-виробники 3D-принтерів:

HBD (Китай). Продукція: спеціалізується на виробництві обладнання для 3D-друку металом. Компанія постійно впроваджує технології нового покоління в програмне забезпечення для 3D-принтерів, розробляє системи управління і створює технічні бази даних. HBD має понад 100 технологічних патентів та понад 20 авторських прав на програмне забезпечення.

Sharebot (Італія). Продукція: професійні 3D-принтери для друку прототипів та функціональних виробів будь-якого розміру.

SLM Solutions (Німеччина). Продукція: промислові 3D-принтери, що друкують металеві вироби за технологією SLM.

Представником устаткування, що працює за технологією SLM, може слугувати система селективного лазерного плавлення SLM 500HL для 3D друку металічних виробів до 500 мм (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – 3D принтер SLM 500HL

Наявність чотирьох оптоволоконних лазерів (4×400 Вт). Зручне автоматизоване керування подачею матеріалу. Максимальний обсяг робочої області побудови $500 \times 280 \times 365$ мм. Робоча зона (Ш \times Д \times В) $500 \times 280 \times 365$ мм. Конфігурація оптичної системи Twin, 2×400 Вт; Quad, 4×400 Вт; Twin, 2×700 Вт; Quad, 4×700 Вт; оптоволоконний інфрачервоний лазер IPG. Межі, що варіюються – товщини шару 20...75 мкм. Мінімальна товщина стінки виробу 0,15 мм. Швидкість побудови до $171 \text{ см}^3/\text{год}$. Мінімальна швидкість сканування – 10 м/с. Витрата захисного газу під час побудови 5...7 л/хв (аргон). Витрата захисного газу при заповненні системи 70 л/хв (аргон/азот). Вбудований програмний продукт SLM Build Processor. Розміри установки (Д \times Ш \times В) $5200 \times 2800 \times 2700$ мм. Вага установки (споряджена/порожня) 3100/2400 кг.

У якості прикладів використання можна навести такі як:

Виготовлення модифікованої паливної форсунки (рис. 4.3), яка служить для впорскування та рівномірного розподілу палива в камері згоряння. Вирішальне значення тут – забезпечити швидке, рівномірне і повне згоряння палива за рахунок його оптимального розподілу. Виконана топологічна оптимізація та друк на адитивній установці SLM Solutions (SLM-технологія). У результаті покращено функціональність виробу. Зокрема, внутрішня гратчаста структура та додаткові канали дозволили забезпечити функціональну оптимізацію та інтеграцію. Завдяки гратчастій структурі вдалося знизити масу компонента і разом з тим скоротити кількість необхідних матеріалів і ресурсів.



Рисунок 4.3 – Паливна форсунка

Реконструкція травматичного дефекту вилицевої кістки (рис. 4.4). Виготовлено індивідуальний імплантат із технічно чистого титану 2 класу на установці SLM. Відмінна біосумісність та інтеграція біоімплантату в тканини. Зменшення ваги титанового виробу за рахунок створення його порожнистої версії. Прискорена інтеграція завдяки наповненню імплантату матеріалом, взятим з клубової кістки пацієнта. Готовий виріб ідеально підійшов до пошкодженої ділянки і не вимагав припасування під час операції. Повна відсутність ускладнень та побічних ефектів після встановлення імплантату.

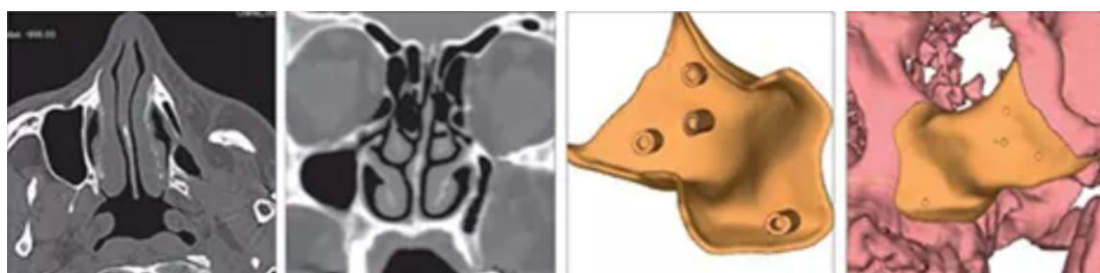


Рисунок 4.4 – Реконструкція травматичного дефекту вилицевої кістки

Оптимізація гальмівного супорта для суперкарів Bugatti Veyron та Chiron (рис. 4.5). Розробка супорта виконувалася компанією Laser Zentrum Nord протягом близько трьох місяців. Bugatti виконала моделювання процесів, розробку підтримуючих структур та здійснила 3D друк. Нова деталь була надрукована за 45 годин на 3D принтері SLM Solutions з титанового сплаву, який зазвичай використовується в авіакосмічній промисловості. Після завершення процесу 3D друку деталь була піддана термообробці в печі при температурі до 700°C для усунення залишкової напруги та забезпечення формостійкості. Потім підтримки були видалені, а поверхня деталі була відшліфована механічними, хімічними та технологічними способами, що значно покращило її втомну міцність. Контури функціональних поверхонь були оброблені на верстаті з ЧПУ протягом ще 11 годин. Восьмипоршневий моноблочний гальмівний супорт з титану – перший, виготовлений на 3D принтері, і найбільший в історії автомобільної промисловості. Також це найбільший компонент з титану, який виробляється адитивним способом.



Рисунок 4.5 – Гальмівний супорт

4.3. Метод пошарового наплавлення матеріалу (FDM)

FDM (Fused Deposition Modeling) – метод пошарового наплавлення із використанням пластикової нитки або гранул. Принцип роботи заснований на виготовленні об'єкта шляхом пошарового нанесення попередньо розплавленого гранульованого пластику або розплавленої пластикової нитки. Інша назва цієї технології – FFF (Fused Filament Fabrication). Принципова схема роботи методу FDM показана на рис. 4.6.

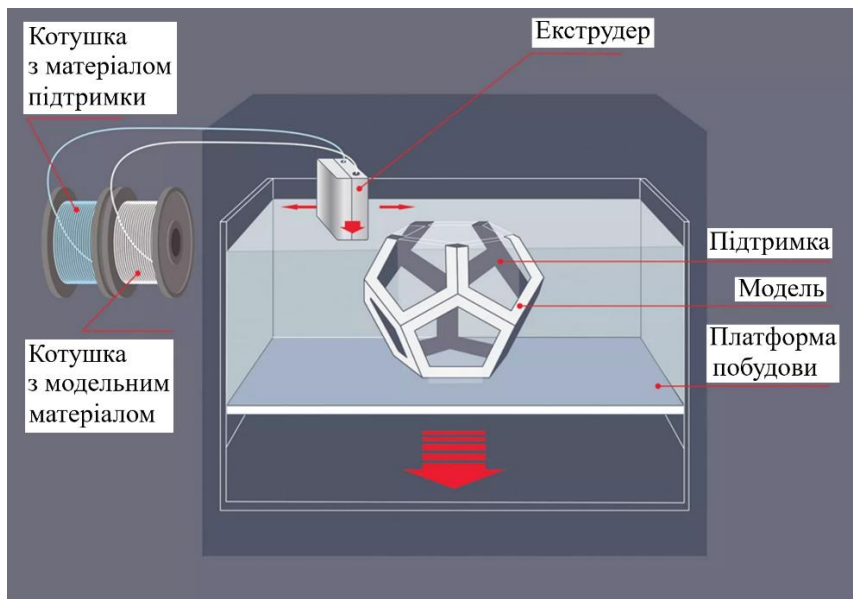


Рисунок 4.6 – Схема методу FDM

Технологія заснована на пошаровому наплавленні пластиків або композитів і дозволяє створювати вироби різного розміру зі складною геометрією.

Як витратні матеріали використовуються пластики у вигляді котушок пластикових ниток діаметром від 1,75 до 2,85 мм або у вигляді гранул. На сьогоднішній день FDM-друк успішно вирішує виробничі завдання в таких галузях промисловості, як машинобудування, архітектурне проектування, дизайн і виробництво медичних виробів.

Можна отримувати вироби з великої кількості термопластиків з найрізноманітнішими характеристиками, у тому числі прозорих, матових або блискучих полімерів, еластичних або жорстких матеріалів, а також із пластиків всіляких кольорів і розмірів.

Пластик легко піддається додатковій фізичній або хімічній обробці. До застосування технології пошарового наплавлення прибігають у випадках, коли потрібно створити міцний виріб. Якщо є високі вимоги до точності, рекомендується використовувати інші технології та принтери.

Переваги цієї технології: можливість створення складних деталей малих великих габаритів; широкий вибір термопластиків або композитів, завдяки чому можна легко підібрати необхідний за властивостями матеріал, а також вибрати кращий колір готового виробу; висока швидкість друку, що дозволяє оперативно виконувати великі та складні замовлення; можливість проведення додаткової обробки моделей; низька собівартість матеріалів і, як наслідок, кінцевого виробу; доступна ціна витратних матеріалів.

Сьогодні FDM-обладнання є найбільш затребуваним і поширеним. Це обумовлено доступністю матеріалів для даного виду друку, невеликою ціною та простотою управління адитивними установками, які використовують у роботі цю технологію.

Фірми-виробники 3D-принтерів:

Discovery3Dprinter (Іспанія). Продукція: промислові 3D принтери для друку великих виробів.

IEMAI (Китай). Продукція: промислові FDM/FGF принтери та матеріали.

PioCreat (Китай). Продукція: промислові установки для 3D друку (FDM/FGF, SLA, LCD, DLP), програмне забезпечення для 3D моделювання, виробництво власних витратних матеріалів.

Wiibooh (Китай). Продукція: професійні та промислові 3D принтери.

Sharebot (Італія). Продукція: професійні 3D принтери для друку прототипів та функціональних виробів будь-якого розміру.

Витратні матеріали – пластик. Пластик – один із найпопулярніших матеріалів для тривимірного друку за технологією FDM. Друк із пластику використовується у багатьох сферах життя, дозволяє працювати з безліччю різних матеріалів. Завдяки широкому розмаїттю пластиків, наявності у них різних властивостей, за допомогою 3D друку можна створювати дуже різні предмети, від простого посуду до функціональних моделей складних деталей і пристроїв.

Види пластиків:

ABS-пластик. Має безліч позитивних характеристик, включаючи підвищену удароміцність при високій еластичності і м'якості матеріалу, а також просту механічну обробку. Висока розчинність в ацетоні дозволяє легко склеювати деталі та згладжувати зовнішні поверхні виробів. Зазвичай ABS непрозорий, але при необхідності легко забарвлюється в будь-які кольори. Кінцеві вироби без фарбування чутливі до впливу ультрафіолету і наділені невисокими електроізоляційними властивостями.

PLA-пластик. Ключові складові PLA – це цукрова тростина та кукурудза, а в основі матеріалу лежить молочна кислота. Регулюючи її рівень при виробництві, можна отримати різні властивості полімеру, тим самим розширюючи його використання. 3D друк цим матеріалом затребувано, так як вироби з PLA мають рівну і ковзну поверхню. Матеріал нетоксичний, завдяки чому широко застосовується для виробництва різних іграшок і сувенірів. Має лише один недолік – недовговічність експлуатації. Готовий виріб може прослужити до декількох років при мінімальному використанні і температурі до +50 градусів.

PETG / PET / PETT-пластик. PET, або поліетилентерефталат – найбільш поширений вид термопластику. Для 3D друку "чистий" PET використовують рідко, застосовуючи в основному його різновид – PETG. PETG більш довговічний і має набагато меншу температуру переробки. Ще однією версією PET є PETT – більш жорсткий і досить популярний матеріал завдяки своїй прозорості.

PC-пластик (полікарбонат). Має високу міцність і зносостійкість, а також підвищеним опором фізичним впливам і термостійкістю. Витримує температуру 110°C. Матеріал прозорий, гнучкий, легко гнеться та не деформується. Відмінно підходить для використання в автомобілебудуванні, медицині та приладобудуванні.

Полієфірімід PEI. Високоякісний термостійкий пластик, який придатний для контакту з харчовими продуктами, має високу механічну міцність і жорсткість.

PVA-пластик. PVA пластик KLEMA – це водорозчинний пластик, що використовується для друку підтримки, проте має непостійне усадження та плавиться при температурі 180°C. Відмінно поєднується із PLA пластиком.

HIPS – ударостійкий полістирол – термопластичний полімер. Багато характеристик HIPS схожі на характеристики ABS, але деякі параметри відрізняються на краще: HIPS не поглинає вологу, краще переносить умови зовнішнього середовища, не схильний до розкладання. Найдовше зберігається у відкритому стані без пакування. Можна створювати вироби, які постійно контактують з водою або вологим середовищем. Що не доцільно із пластиком ABS. Трохи м'якше ABS, краще піддається механічній постобробці і також добре обробляється ацетоном, дихлорметаном, етилацетатом. Легкість і низьке водопоглинання дозволяють при дотриманні певних умов створити об'єкт, що не тоне у воді. Нетоксичний. Дозволено контакт з їжею та тілом людини та тварин. На відміну від ABS та інших поширених матеріалів для 3D друку HIPS розчинний в органічному розчиннику Д-Лімонен. Це дозволяє створювати складні моделі з інших матеріалів, але з підтримками з HIPS, які надалі можна розчинити розчинниками.

Представником устаткування, що працює за технологією FDM, може слугувати промисловий 3D принтер Super Discovery 3D Printer для виробництва великогабаритних виробів розміром до 1300 × 2500 × 1000 мм за унікальною технологією екструзії гранул пластику (рис. 4.7). Вона дозволяє значно скоротити виробничі витрати і збільшити продуктивність. Велика камера побудови. Простота експлуатації. Функція самостійного вирівнювання, що автоматично компенсує незначні нерівності під час друку. Працює з будь-якими термопластиками (ABS, ABS CF, PC CF, PPE CF, 3D850, ASA та інші). Габарити (+ завантажувальна вирва та електрична шафа) 2000 × 3590 × 3000 мм. Об'єм друку 1300 × 2500 × 1000 мм. Вага 1200 кг. Технологія FDM. Швидкість друку <6 кг/год. Максимальна температура видавлювання 450°C. Швидкість до 200 мм/сек. Товщина шару (мінімум) 0,5 мм. Мережа Ethernet. Вбудоване програмне забезпечення Simplify 3D.



Рисунок 4.7 – 3D принтер Super Discovery 3D Printer



Рисунок 4.8 – 3D принтер W400

Як приклад 3D принтера, що працює з філаментом, можна навести зручний 3D принтер для друку невеликих деталей розміром 400×400×500 мм фірми Wibooh (Китай) (рис. 4.8). Модель W400 широко застосовується в адитивному виробництві, автомобільній промисловості, освіті, ювелірній справі, мистецтві та дизайні. Висока точність та швидкість друку 30 ... 150 мм/с. Велика камера побудови 400 × 400 × 500 мм. Кольоровий сенсорний екран та зручний інтерфейс. Висока точність друку. Можливість дистанційного керування. Сигнал обриву нитки, відновлення друку після зупинки через вимкнення електрики. Технологія друку FDM. Товщина шару 0,05...0,3 мм. Сумісна ОС Windows, MAC, Linux.

Програмне забезпечення:

Voxel Dance Additive — Доступне програмне забезпечення для підготовки даних перед 3D-друком з великим набором модулів. Застосовується в різних сферах, де використовується адитивне виробництво: прототипуванні, стоматології, ювелірній справі, охороні здоров'я, освіті, машинобудуванні. Дозволяє імпортувати CAD-моделі у різних форматах, виправляти помилки у STL-форматі, редагувати конструкції. Швидка обробка даних дає можливість значно заощадити час під час друку виробів. Можливості Voxel Dance Additive: точне, швидке та геометрично правильне виправлення помилок у файлах; різноманітність підтримуваних форматів імпорту та експорту файлів AutoCAD (*.dxf, *.dwg), SolidWorks (*.sldprt, *.sldasm, *.slddrw), Rhino Files (*.3dm), 3D Manufacturing Format (*.3mf) та інших.

Зручні інструменти розміщення підтримки: конусні, об'ємні, ґратчасті, точкові та розумні підтримки (рис. 4.9). Візуалізація траєкторії шару та сканування завдяки функції слайсингу. Визначення траєкторії сканування для різних областей за допомогою штрихування.

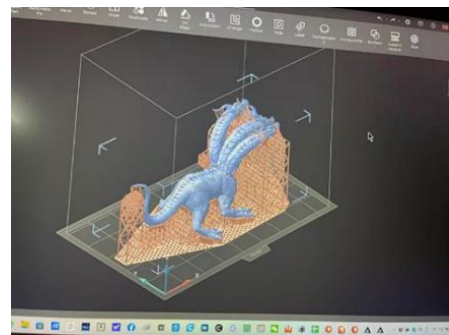


Рисунок 4.9 – Фото програми з екрану монітора

Voxel Dance Tango – програмне забезпечення для 3D друку. Можливості Voxel

Dance Tango: здатність обробляти великі файли та працювати без збоїв; висока швидкість слайсингу; автоматичне виправлення моделей за лічені секунди; спеціальні параметри слайсингу можуть зменшити зернистість друку і поліпшити якість поверхонь моделі. Алгоритм створення підтримки не пропустить жодної підтримуючої структури, необхідної для моделі, особливо на ізольованих ділянках. Операційна система Windows 10/Windows 8.1/Windows 7. Процесор Multi core Intel Series або старше, Xeon або AMD. Вільне місце на диску 4 ГБ.

Витратний матеріал: Філамент \varnothing 1,75 мм, PLA, ABS, TPU, дерево, мідь, вуглеводень, нейлон і т.д. Зразки катушок з філаментом представлені на рис. 4.10.



Рисунок 4.10 – Зразки філаменту



Рисунок 4.11 – 3D-принтер PioCreat K8

3D-принтер для друку великоформатних букв для світлодіодних вивісок PioCreat K8 (рис. 4.11). Принтер обладнаний високотехнологічним модулем, що забезпечує виняткову точність друку найскладніших елементів (похилих, що згинаються тощо). Екструдер з двома входами та одним виходом дозволяє друкувати двома кольорами, доступний широкий вибір кольорів. Автоматичне вирівнювання завдяки спеціальному сенсору для запобігання деформаціям під час друку. Автоматичне перетворення моделей з 2D на 3D. Функція відновлення друку у разі збоїв при подачі філаменту або відключення електроживлення. Один оператор може контролювати 20 машин, що призводить до зниження витрат на 50%. Технологія друку DM. Область побудови 800×800×85 мм.

Матеріал PETG/PDS/PLA. Діаметр філаменту 1,75 мм. Зразки філаменту надані на рис. 4.12.



Рисунок 4.12 – Зразки філаменту

Товщина шару 0,1...0,6 мм. Точність осі XY 0,02 мм. Швидкість <150 мм/с. Кількість екструдерів 1. Діаметр екструдерів 0,6...1,2 мм. Температура столу ≤65°C. Температура екструдера ≤260°C. Передача файлів SD картка. ОС Win10/Win8/Win7. ПЗ для слайсингу PioCreat AD. Вимоги до джерела живлення 110/220 В змінного струму. Розміри принтера 1360×1200×900 мм. Вага принтера 44 кг.

Приклади виробів надані на рис. 4.13.

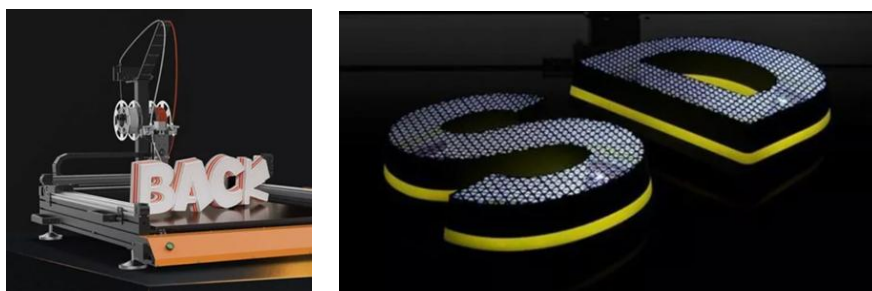


Рисунок 4.13 – Приклади виробів



Рисунок 4.14 – Промисловий 3D-принтер Ultimaker 3 Extended

Ultimaker 3 Extended (Нідерланди) – найнадійніший 3D принтер з двома екструдерами (рис. 4.14). Збільшена область друку дає можливість реалізувати практично будь-які проекти. Мінімальна товщина шару від 20 мкм. Оновлена система подачі пластику. Область друку 2 екструдерами 197×215×305 мм. Найкраща якість друку, серед FDM принтерів. Спрощений процес заміни філаменту. Інноваційна система «розумних» екструдерів. Діаметр пластику: 2,85 мм. Інтерфейси зв'язку: Wi-Fi. Максимальний розмір друку: 215×215×305 мм. Матеріал друку: пластики – ABS, PLA,

HIPS, гнучкі матеріали (гума, FLEX), нейлон, полікарбонат. Програмне забезпечення: Cura. Галузі застосування: архітектура, дизайн, реклама, макетування, медицина, прототипування, машинобудування, для освітніх закладів (наприклад, мається у розпорядженні кафедри ІТМ НТУ «ХП»). Розмір: 357×338×680 мм. Вага 13 кг.

У методі пошарового наплавлення матеріалу (FDM) широко застосовується технологія друку з розчинними підтримками. Філамент для розчинних підтримок PVA та HIPS. PVA розчиняється у воді, HIPS розчиняється в D-Limonene. D-Limonene добре підходить для обробки деталей із ABS. Натуральна запашна речовина з приємним запахом; дезінфікуючий засіб; антиоксидант; може використовуватися в чистому вигляді, чудово поєднується з іншими розчинниками. Лимонен широко поширений вуглеводень, що є основним компонентом масла апельсинової шкіри (до 80-90%). Міститься також практично у всіх цитрусових і багатьох інших ефірних оліях.

4.4. Метод прямої екструзії гранул полімеру (FGF)

FGF (Fused Granular Fabrication – пряма екструзія гранул полімеру) – один з процесів, поряд з FDM/FFF, заснованих на технології пошарового 3D друку термопластами. У FGF-принтерах наплавлення відбувається за допомогою гранул, а не нитки (філаменту), як у FDM-технології. Існують гібридні рішення, що поєднують два методи в одній системі (рис. 4.15).



Рисунок 4.15 – Порівняльна схема методів FDM/FFF і методу FGF

3D-друк гранулами забезпечує набагато більш високу швидкість друку та продуктивність, що є значною перевагою перед FDM при створенні великогабаритних деталей. Використовуючи в адитивному виробництві гранулянт і перероблені пластики замість ниток, можна скоротити витрати на матеріали більш ніж на 60%.

Принцип пересування екструдера у FGF 3D-принтері такий самий, як і у традиційному FFF-принтері, проте витратним матеріалом замість філаменту є полімерні гранули. Для переробки гранул використовують додаткові вузли, такі як бункер і шнековий екструдер. Крім порталних систем шнековий екструдер можна інтегрувати з роботом-маніпулятором, тим самим збільшивши ступінь свободи в пересуванні друкувальної голівки.

Шнек в екструдері здійснює переміщення гранул від вхідного отвору системи подачі до отвору сопла. Безпосередньо перед видавлюванням через сопло, розплавлений пластик піддається високому тиску завдяки двигуну, який обертає шнек.

У методі FGF застосовується велика кількість матеріалів як гранул, включаючи інженерні пластики. Аналогічно FFF-обладнанню при друку полімерами з високою усадкою необхідно мати термостатировану камеру

побудови. Як правило, принтери FGF мають робочий простір від 1 кубічного метра, а такий об'єм не так просто нагріти. Найчастіше використовуються полімери з дрібнорубаним вугле-або скловолоконом, наприклад, ABS, PA 6, PP і навіть PEI (полієфірїмїд). Або стабілізовані компаунди на основі базових полімерів, наприклад, PET, PP, TPU, які мають низьку усадку і не такі вимогливі до зовнішнього середовища. Для друку габаритних виробів без термостатованої камери рекомендується використовувати матеріали з усадкою трохи більше 0,65%. При цьому FGF-екструдер здатний працювати з переробленим пластиком із деталі, що друкувалася на тому ж екструдері.

Існує ряд матеріалів, доступних тільки у формі гранул, їх просто неможливо виробляти у формі нитки за рахунок високої крихкості.

Завдяки використанню сопел збільшеного діаметра та тиску, що створюється за рахунок спеціальної геометрії шнека, збільшується швидкість виходу матеріалу. Це призводить до скорочення часу друку в порівнянні з екструдером FFF без втрати якості. Наприклад, FGF-принтер із соплом такого ж діаметра, як і у FFF-принтера, буде мінімум у 3 рази продуктивнішим.

Враховуючи всі можливості (і деякі недоліки) методу FGF, сфери застосування можуть бути абсолютно різними, наприклад: оснащення для викладення композитів, модельне оснащення для лиття металів. стапелі для збирання габаритного обладнання, оснащення для лиття бетону, корпусні деталі та кронштейни транспортних засобів, екстер'єрні та інтер'єрні меблі та декор, малі архітектурні форми.

Переваги таких 3D-принтерів: економія витрат (гранули можуть коштувати на 65...90% менше, ніж філамент з того ж пластику, залежно від обсягів використовуваного матеріалу), висока швидкість друку, друк великих об'єктів, більший вибір матеріалів, нижча вартість матеріалів, унікальні композити, екологічні вигоди.



Рисунок 4.16 – Мікрогранули ABS

Витратні матеріали у методі FGF – гранули:

Мікрогранула ABS – це сополімер акрилонітрилу, бутадієну та стиролу (рис. 4.16). ABS ударостійкий, термостійкий, стійкий до розчинів лугів кислот, спиртів, легко обробляється як хімічно, так і механічно.

Мікрогранула PLA (полімолочна кислота) – це пластик, що біологічно розкладається на вуглекислий газ, воду і органіку, під дією мікроорганізмів. PLA виробляють із природних ресурсів, таких як крохмаль, отриманий з кукурудзи, цукрових буряків та пшениці. Сьогодні PLA є одним з найбільш широко використовуваних матеріалів у 3D-друку, оскільки він не виділяє шкідливих газів і легко друкується.

Мікрогранула є ідеальною сировиною для виготовлення власної мононитки на установці типу Filabot або для використання в 3D принтері, що працює на матеріалі у вигляді гранул. Мікрогранули виглядають маленькими циліндрами діаметром 1,8...2,1 мм і довжиною 1...2 мм. У своєму складі мікрогранула не містять переробленого або відновленого пластику. Для невеликих установок використання мікрогранул більш доцільно, в порівнянні зі звичайною гранулою, оскільки, мікро-гранула менше за розміром, вона швидше плавиться і створює менше повітряних порожнин в процесі надходження розплаву до сопла екструдера, що робить процес екструзії стабільним, в результаті чого кількість дефектів на виробі менше.



Рисунок 4.17 – Мікрогранули ASA

Гранули ASA – (полі) акриловий стирол акрилонітрил. Має високу жорсткість, стійкий до розбавлених кислот, мінеральних мастил, дизельного палива. На відміну від ABS-пластику, ASA-пластик стійкий до дії УФ-випромінювання, не жовтіє на відкритому повітрі, добре переробляється. ASA-пластик призначений для виготовлення плафонів ламп, зовнішніх деталей автомобілів, світлотехнічних виробів (рис. 4.17).



Рисунок 4.18 – Мікрогранули PETG

PETG (поліетилентерефталат-гліколь) гранули. – виготовлені з термопластичного полімеру поліетилентерефталату з додаванням гліколю, ці гранули забезпечують відмінні результати друку завдяки своїй міцності, гнучкості та стійкості до хімічних впливів (рис. 4.18).

Основні характеристики: прозорість – гранули мають високий рівень прозорості (до 91%), що дозволяє створювати деталі з ефектом скла; стійкість до деформації – низька усадка робить процес друку більш передбачуваним та зручним; хімічна стійкість – PETG має відмінну стійкість до хімічних речовин, що робить його ідеальним для різних застосувань.

3D-принтер фірми Pioscreat (Китай) G5Ultra – потужний настільний принтер для швидкого друку промислових деталей зі збереженням високої точності, якості та однорідності поверхні. Працює за технологією FGF – пряма екструзія гранул полімеру (рис. 4.19).

Розроблений для забезпечення високих вимог до міцності та призначений для промислових підприємств, освітніх та наукових установ, дизайн-студій, майстерень зі створення прототипів.

Pioscreat G5Ultra має відкриту систему, що дозволяє використовувати широкий асортимент витратних матеріалів. Висока швидкість друку до 220 мм/сек. Завдяки здатності нагріватися до 420°C 3D принтер дозволяє експериментувати з різними гранулами, включаючи PA-CF, PA-GF, PC-CF, PLA, PETG-GF, ABS, PS, GPPS, PP-GF, і змішувати різні види гранул. Об'єм друку 500 × 500 × 400 мм. Місткість контейнера для гранул 3000 мл. Товщина шару (мінімум) 0,2...1 мм. Температура нагрівання сопла ≤400°C. Діаметр сопла 0,2...2 мм. Продуктивність 220 мм/с. Блок живлення AC100...240V 50/60Hz. Потужність 1450 Вт. Формат друку USB-флешка / Wi-Fi. Програмне забезпечення Pioscreat_Slicer, Cura, Simlify3D. Розміри розміру принтера 765 × 890 × 1040 мм. Вага 69 кг.

Приклади виробів надані на рис. 4.20.



Рисунок 4.20 – Приклади виробів



Рисунок 4.19 – 3D принтер Pioscreat G5Ultra

Piocreteat G40 – гібридна адитивна установка з вбудованим станком ЧПУ. Призначений для виготовлення великогабаритних деталей з інженерного пластику. Велика камера побудови – 3725×2500×1330 мм (рис. 4.21).

Особливості: Завдяки вбудованому 5-осьовому фрезерному ЧПУ-верстату надрукований виріб обрізається до потрібного розміру та форми.



Рисунок 4.21 – 3D принтер Piocreteat G40

Piocreteat G40 має вбудований модуль сушіння готових виробів. У камері підтримується стабільна температура 35...50°C. Швидкість друку становить 10 м/хв, швидкість обробки – 15 м/хв. Робочий фрезерувальний простір може бути розділений на 6 зон з незалежним управлінням нагріву, що дозволяє зменшити витрати на електроенергію і забезпечити високу якість нижнього шару. Розмір шнекового екструдера – 3...8 мм. Технологія друку FGF (пряма екструзія полімерних гранул). Об'єм друку 3725 × 2500 × 1330 мм. Точність друку ± 0,02 мм/1000 мм. Товщина шару (мінімум) 0,2...1 мм. Кількість сопел 1. Діаметр сопла 2...5 мм. Розмір шнекового екструдера 3...8 мм. Блок живлення AC100 – 240V 50/60Hz. Швидкість друку 100 кг/год. або 10 м/хв. Швидкість обробки 20 м/хв. Продуктивність 220 мм/с. Габарити всієї установки 5962×4220×4800 мм. Габарити робочого простору для механічної обробки 3400×2500×1330 мм. Вага 15000 кг.

Формат друку USB-флешка/Wi-Fi. Вбудоване програмне забезпечення Creality Print. Програмне забезпечення фрезерного верстата Creality Print.

Creality Print – це самостійна розробка фірми Creality (компанії з виробництва 3D-принтерів (Китай), яка виробляє філаментні та фотополімерні 3D-принтери) – програмне забезпечення для моделювання методом наплавлення. Це практичний і простий у використанні інструмент, який допомагає віддалено керувати і контролювати 3D-принтер, а також друкувати прямо з комп'ютера.

Приклади виробів надані на рис. 4.22.

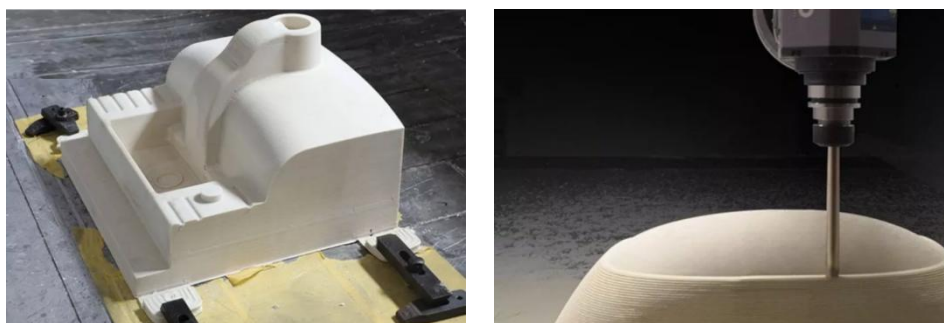


Рисунок 4.22 – Приклади виробів

Piocrete G12 – 3D-друк великих деталей. Недорогі витратні матеріали в порівнянні з іншими способами друку (рис. 4.23).

Камера побудови розміром 1200×1000×1000 мм дозволяє друкувати великогабаритні деталі, оснащення, пристосування, повномасштабні прототипи. 3D-принтер G12 широко застосовується в автомобілебудуванні, аерокосмічній промисловості, меблевому дизайні та інших галузях. Відкрита система дозволяє використовувати широкий асортимент витратних матеріалів. Температура сопла досягає 450°C, призначений для роботи з високотемпературними пластиками. Оснащений передовою системою шнекової екструзії, яка забезпечує рівномірний розподіл матеріалу та адгезію. Технологія друку FGF (пряма екструзія гранул полімеру). Об'єм друку 1200 × 1000 × 1000 мм. Товщина шару (мінімум) 0,2...1,5 мм. Кількість сопел 1. Температура нагрівання сопла $\leq 450^{\circ}\text{C}$. Діаметр сопла 0,6...6 мм. Температура столу $\leq 130^{\circ}\text{C}$. Швидкість друку 80...100 мм/с. Продуктивність 3 кг/год. Формат друку USB-флешка/Wi-Fi. Програмне забезпечення Piocrete_Slicer. Сумісні ОС: Windows XP/7/8/10 MAC/Linux. Передача файлів USB/картка пам'яті. Формат файлу .STL, .OBJ, .AMF, .3DMF. Розміри розміру принтера 2200 × 1780 × 2250 мм.



Рисунок 4.23 – 3D принтер Piocrete G12

За допомогою керуючих програм підготовки процесу побудови здійснюється конструювання технологічних підтримок виробу на платформі, поділ виробу на перерізи (шари) з фіксованою товщиною, визначення параметрів побудови кожного перерізу і далі пошаровий синтез виробу. Алгоритм роботи керуючої програми обробки надано на рис. 4.25.

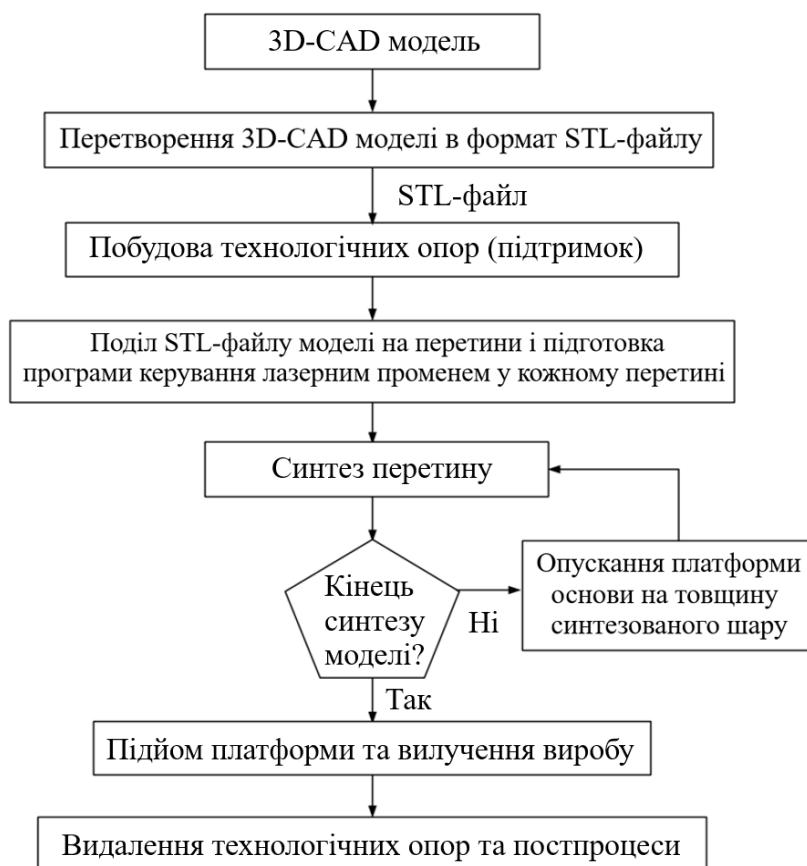


Рисунок 4.25 – Алгоритм роботи керуючої програми обробки

При стереолітографії геометричне відтворення виробу здійснюється пошарово дисперсійним затвердінням рідкого фотополімеру за допомогою UV (ультрафіолетового) лазера (фотополімеризація). Алгоритм процесу лазерної стереолітографії надано на рис. 4.26.

Промінь лазера, керований комп'ютером, проходить по поверхні рідкого полімеру, скануючи її частину в площині X-Y відповідно до конфігурації шару, що формується. У рідкому реакційноздатному середовищі породжуються активні центри (радикали, іони, активовані комплекси), які при взаємодії з молекулами мономеру викликають зростання полімерних ланцюгів, що веде до фазової зміни опроміненого середовища – затвердіння шару.



Рисунок 4.26 – Алгоритм процесу лазерної стереолітографії

Траєкторія сканування лазерного променя по кожному шару перерізу визначає, де у робочому просторі площини 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 січучи площини теоретичної моделі. Промінь сканує конфігурацію другого перерізу, потім третього і т. д. Так послідовно пошаровим нарощуванням відбувається створення тривимірного конструктивного твердотілого елемента заданої геометрії. Важливим при

підготовці та реалізації SLA способу є забезпечення стійкості виробу на платформі та стійкість оболонки виробу. Для цього на стадії комп'ютерної підготовки 3D CAD моделі за допомогою спеціальної програми конструюються зовнішні технологічні підтримки та внутрішні переборки. З їх допомогою забезпечується: підтримка виступів та консолей моделі, похилих поверхонь; запобігання розшаровування на складнопрофільних ділянках; коригування можливого викривлення шарів, що примикають до платформи; створення складових виробів із кількох частин; відділення одержаного виробу від рухомої платформи. Операції з видалення конструкції, що підтримує, проводяться поза стереолітографічного пристрою.

Переваги способу лазерної стереолітографії: можливість повної автоматизації, висока точність повторних відтворень, відсутність обмежень за складністю форми виробу, можливість виготовлення виробів великих розмірів по їх частинах з подальшим відтворенням цілого виробу в заданому обсязі. До недоліків лазерної стереолітографії можна віднести: можливість усадки при полімеризації матеріалу (фотополімеру), що може призводити до деформацій і, отже, знижувати точність; хімічну токсичність фотополімерів (до полімеризації); високу вартість фотополімерів; чутливість установки до змін температури та вологості приміщення, до вібрацій.



Рисунок 4.27 – Фотополімерна смола

Фотополімер (SLA) – композитний рідкий матеріал, який під дією променів лазера або УФ-проектора змінює свої фізичні властивості, затвердіваючи в процесі друку (рис. 4.27). Вироби з фотополімерної смоли мають більш гладку поверхню, відсутність шорсткості в порівнянні з пластиками.

Також можуть бути термостійкими, що дозволяє використовувати їх при вирішенні широкого спектра завдань. Найбільш поширені марки фотополімерів: Magna W120, Magna L90, Formula L1, Robusta G, Robusta LR, Flexa W, ZY-6808 для литва, Clear Resin V5, BioMed Flex 80A Resin, TMCTW, Plexiwire Resin Model та ін.

Ефективна лазерна стереолітографія при концептуальному моделюванні виробів і процесів збирання в машинобудуванні, в технологіях лиття, в медицині (особливо при створенні імплантатів), в архітектурі, археології, електроніці, приладобудуванні та ін.

Приклад 3D-принтера з можливістю друку надзвичайно великих та складних виробів до 2,4 м із фотополімеру ProtoFab SLA2400 DLC (рис. 4.28). Висока швидкість роботи – до 10 м/с. Широка затребуваність у будь-якій галузі промисловості, включаючи авіацію та автомобільну сферу, де є гостра необхідність друкувати великі вироби без з'єднань. Розмір камери побудови (Ш×Д×В) 2400×800×800 мм. Швидкість сканування 6 м/с (рекомендована); 10 м/с (максимальна). Товщина шару 0,1мм. Тип лазера – твердотільний лазер з діодним накачуванням Nd:YVO4. Оптична система – гальванометричний сканер SCANLAB. Розмір пучка 0,12...0,2 мм. Вбудоване програмне забезпечення Sirius Intelligent Printing Control Software/Linux або Windows. Сумісне програмне забезпечення VoxelDance Additive Температура навколишнього середовища 21...25°C. Відносна вологість менше 40%. Вимоги до джерела живлення 200...240 В змінного струму, 50/60 ГЦ, однофазний, 6А. Технологія SLA.



Рисунок 4.28 – 3D принтер ProtoFab SLA2400 DLC

Зразки виробів надані на рис. 4.29.



Рисунок 4.29 – Зразки виробів

4.6. DLP/LCD-стереолітографія

DLP (Digital Light Processing) — один із методів стереолітографічного 3D-друку, який використовує цифрові світлодіодні проєктори. На відміну від SLA-установок, що сканують поверхню матеріалу одним або декількома лазерними головками, DLP-принтери проєктують зображення цілого шару до затвердіння фотополімерної смоли, після чого наноситься новий шар матеріалу і проєктується зображення нового шару цифрової моделі.

Також на ринку представлені 3D-принтери з технологіями LCD/LSL (Liquid Crystal Display / LED Screen Light), в основі яких також лежить фотополімеризація. Засвітлення фотополімерної смоли здійснюється світлодіодною ультрафіолетовою матрицею через маску рідкокристалічного екрану, а не УФ-проєктора, як у технології DLP (рис. 4.30).

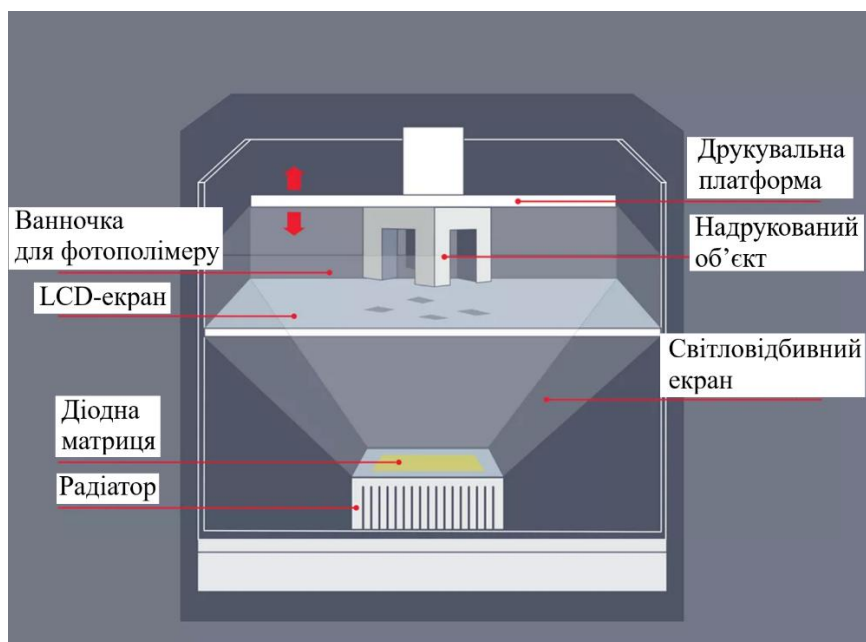


Рисунок 4.30 – Схема методу DLP/LCD

Вищевказані методи 3D-друку фотополімерами з'явилися відносно недавно, але вже демонструють прекрасні результати, порівняні за точністю і продуктивністю з оригінальною технологією SLA. Основною їх перевагою перед лазерною стереолітографією може стати нижча вартість використовуваних проєкторів і екранів у порівнянні з лазерними випромінювачами.

Переваги таких 3D-принтерів: висока швидкість друку, широкий діапазон механічних властивостей витратних матеріалів, відсутність крайових спотворень, висока точність та деталізація.

Адитивні установки, що працюють за технологією LCD, випромінюють ультрафіолетові промені за допомогою ряду світлодіодів через рідинно-кристалічний (РК) дисплей. Екран виводить лише пікселі, які потрібні для поточного шару. Швидкість 3D друку безпосередньо залежить від потужності матриці.

Технологію LCD порівнюють із DLP. Так, у 3D-принтерів, що друкують за DLP, в основі роботи лежить УФ-проектор. Він працює з використанням мікродзеркал, які направляють проєктоване на них світло. Проектори громіздкі та дорогі. РК-екрани, що використовуються в принтерах, що працюють за технологією LCD, більш компактні та доступні за ціною за рахунок дозволу друку та довговічності самого обладнання.

Але є одна особливість: РК-екран у LCD може швидко зношуватися, тоді як DLP-проектор працює довше. А в цілому при друку на 3D-принтері, що працює за технологією LCD, отримують таку ж швидкість, як при використанні DLP-пристроїв. І порівнянна якість. Вироби знаходять застосування в ювелірній промисловості та машинобудуванні, де дуже важлива точність.

У всіх 3D-принтерів, однаковий принцип дії. Щоб пошарово надрукувати виріб, знадобиться спеціалізоване програмне забезпечення. У процесі друку виріб формується на рухомій платформі принтера. Після завершення шару вона опускається на товщину шару, утворюючи новий. Готовий виріб промивають для видалення рідких залишків полімеру. Повне затвердіння відбувається під УФ лампою.

Фірми-виробники 3D-принтерів:

Wiiibox (Китай). Продукція: професійні та промислові 3D-принтери.

Rayshape (Китай). Продукція: професійні фотополімерні 3D-принтери.

Sharebot (Італія). Продукція: професійні 3D-принтери для друку прототипів та функціональних виробів будь-якого розміру.

Витратні матеріали – фотополімерна смола для 3D-друку.



Рисунок 4.31 – Смола D-HARD

Фотополімерна смола D-HARD (рис. 4.31). Ідеально підходить для виготовлення великих, твердих та міцних деталей. Смола має мінімальну усадку, завдяки чому об'єкти не будуть згинатися або деформуватися під впливом тиску. В результаті використання матеріалу виходять стійкі об'єкти, характеристики яких не змінюються з часом, за умови, що вони зберігаються в сухості далеко від ультрафіолету. Надруковані деталі мають гладку поверхню і легко піддаються постобробці.



Рисунок 4.32 – Смола S-WAX

Фотополімерна смола S-WAX (рис. 4.32). Литєва смола з найвищим вмістом справжнього парафіну. Завдяки світло-блакитному кольору відмінно підходить для виготовлення ювелірних виробів і для областей, де потрібне плавлення і подальше лиття. Містить більше 30% воску і зовсім не містить вуглецю, що дозволяє отримувати чисті, деталізовані виливки. Ідеально підходить для серійного виробництва та дозволяє обійтися без дорогої традиційної форми для лиття.

Фотополімерні смоли S-HARD, G-STRONG, G-MODEL, S-TOUGH дозволяють виготовляти високоточні та деталізовані вироби.



Рисунок 4.33 – Anycubic Colored UV Resin

Фотополімер Anycubic Colored UV Resin – професійна смола для LCD принтерів Anycubic Photon, а також для принтерів інших виробників (рис. 4.33). Полімер призначений для друку ливарних форм і може використовуватись на виробництві.

Смола має високу швидкість твердіння, що забезпечує міцність готових виробів та значно скорочує час друку. Висока адгезія до друкарської платформи та практично повна відсутність усадки робить друк ще якіснішим. Вироби зі смоли мають високу міцність і жорсткість, які так необхідні при литті. Надруковані деталі добре тримають форму та дозволяють виконати якісне лиття. Смола має стабільний склад, тому її легко зберігати.

3D-принтер Sharebot BIG (рис. 4.34), призначений для великоформатного друку фотополімерами. Ідеально підходить для виробництва дрібних партій великих моделей до 470 мм в машинобудуванні, приладобудуванні, медицині. Друк міцних об'єктів, які добре підходять для подальшої обробки. Принтер оснащений мийним баком і спеціальною програмованою УФ-пічкою CURE, яка дозволяє завершити процес затвердіння. Технологія LCD. Розміри платформи 470×240×340 мм. Роздільна здатність по осі Z 100 мкм. Точність у площині XY 137 мкм. Допуск ±68,5 мкм. Швидкість друку до 4 мм/год (залежно від фотополімеру). Програмне забезпечення Pyramis. Довжина хвилі – денне світло. Підключення USB – WiFi – Ethernet. Вага 66 кг.



Рисунок 4.34 – 3D принтер Sharebot BIG



Рисунок 4.35 – 3D принтер Anycubic Photon D2

Anycubic Photon D2 – це компактний фотополімерний DLP 3D принтер, що ідеально підходить як для домашнього так і для професійного використання (рис. 4.35). Як і всі принтери Anycubic, він дуже зручний в управлінні: всі параметри друку задаються за допомогою кольорового сенсорного дисплея на передній панелі принтера. Підключення до ПК можливе через порт USB. Використовуючи технологію 3D-друку DLP, тисячі дзеркал (DMD) концентрують світло з мінімальною дифузією безпосередньо на дно ванни для смоли, тим самим покращуючи однорідність світла та досягаючи надвисоких результатів друку. Розмір експозиції 95,42 см². Роздільна здатність проектора: 2560×1440 пікселів. Час експозиції ≥ 2,5 с/шар. Розмір друку 165×131×73 мм. Розмір машини 438×236×226 мм. Вага машини 4 кг.

4.7. Селективне лазерне спікання (SLS)

SLS (Selective Laser Sintering) – селективне (виборче) лазерне спікання, одна з найбільш широко застосовуваних адитивних технологій. Принцип дії SLS полягає у точковому спіканні пластикових порошків із різними компонентами лазерним променем (рис. 4.36).

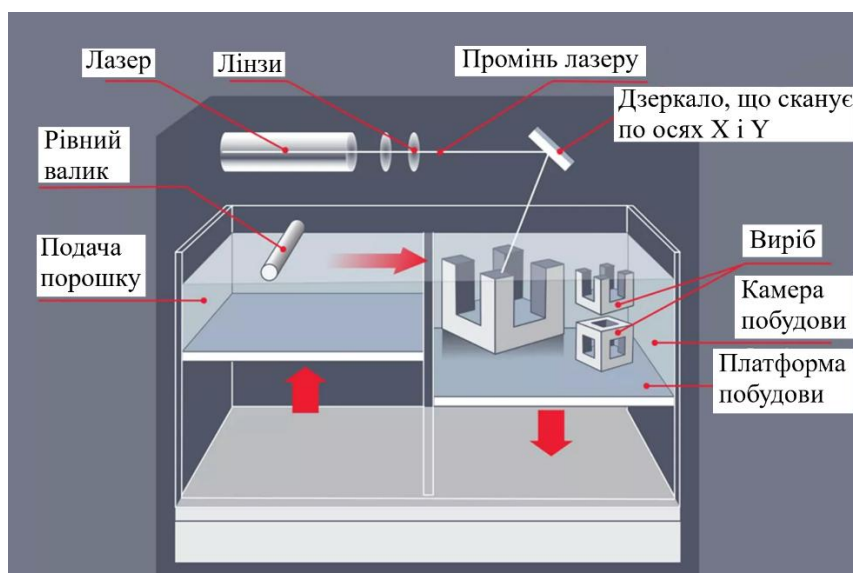


Рисунок 4.36 – Схема методу SLS

SLS дозволяє пошаровим нарощуванням створювати не тільки модель або прототип виробу, а й власне кінцевий виріб. Для виготовлення використовуються різні порошки – поліаміди, полікарбонати, віск, нейлон, кераміка, метали. Спосіб запропонований Карлом Декартом в 1986 р. (США) і спочатку установки вироблялися фірмою DTM Corp. Sinterstation 2060, Sinterstation 2500 та ін. Технологічні комплекси містять зазвичай наступні складові: 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 ролика, що вирівнює, наноситься на платформу носія. Керований промінь CO₂ лазера сканує поверхню порошку відповідно до конфігурації заданого перерізу і ініціює локальне вибіркоче оплавлення порошкової маси. Ділянки шару порошку, що потрапили в зону впливу лазерного променя, приймають при цьому задану форму перерізу.

Платформа носія циклічно опускається. Підігрів камери знижує витрати енергії лазера на нагрівання порошку, знижує рівень деформацій. Спосіб передбачає подачу до камери нейтрального газу для виключення окислення порошку при нагріванні.

До переваг способу SLS можна віднести невисоку вартість використовуваних матеріалів, їх нетоксичність, відсутність технологічних підтримок, можливість одночасного виготовлення кількох виробів (у різних «горизонтах»), широкий спектр матеріалів, можливість виготовлення виробу частинами; високу міцність і можливість отримання остаточних виробів (пряме вирощування). Области використання – авіаційна, автомобільна, електронна, електро-технічна та ін. галузі промисловості, а також медицина (імпланти), нафтохімія, тобто будь-які галузі, де потрібно швидке прототипування, створення моделей, одиничних екземплярів або малих серій функціональних виробів складної форми.

Експериментально доведено можливість використання таких порошків: метал (Ni), полімер (поліамід або полікарбонат); біметал (Ni, Fe, Al або латунь + припій) та інтерметалоїд (Ni-Ti, Ti-Al, Ni-Al); кераміка (Al+ZrO₂).

SLS-друк дозволяє за лічені години створювати кінцеві вироби, що володіють прекрасними механічними характеристиками – підвищеною міцністю, відмінною якістю і високою точністю побудови. Крім того, вони відрізняються стійкістю до впливу температури, еластичністю і підвищеною пружністю. А завдяки широкому асортименту витратних матеріалів у виробників є можливість друкувати моделі будь-якої складності.

Дана технологія 3D-друку не вимагає підтримок, оскільки в якості них виступає невикористаний порошок, який згодом може повторно використовуватися для друку. Це забезпечує безвідходний процес виробництва та дозволяє відтворювати навіть найскладнішу геометрію виробів, яку не можна досягти за допомогою традиційних методів.

3D-принтери, що працюють за технологією SLS, відмінно підходять для виготовлення міцних пластикових виробів з високим ступенем деталізації, безліччю вигинів. Їх також застосовують для створення високоточних, міцних тестових зразків, прототипів, використовують у дрібносерійному виробництві.

Головні плюси друку на принтері SLS: висока продуктивність і швидкість побудови виробу, відмінні механічні властивості готових моделей, немає необхідності в підтримуючих структурах, принтери SLS ідеально підходять для створення великих об'єктів і великосерійного виробництва, широкий вибір пластиків для використання. За допомогою методу селективного лазерного спікання легко забезпечується підвищена швидкість друку. Це відбувається через те, що не потрібно повністю розплавляти порошок, через що сильно зростає продуктивність обладнання. Після закінчення процесу друку отриманий прототип іноді потрібно обробити, так як вироби на виході володіють шорсткою поверхнею і пористою структурою.

Фірми-виробники 3D-принтерів:

Kings 3D Printing (Китай). Продукція: промислові установки для адитивного виробництва (SLA, SLS), програмне забезпечення для 3D-моделювання, виробництво власних витратних матеріалів, включаючи нейлоновий композитний порошок.

ProtoFab (Китай). Продукція: промислові установки для 3D-друку (SLA, SLS, SLM), витратні матеріали.

Formlabs (США). Продукція: повний набір обладнання для друку та постобробки, аксесуарів до нього, програмного забезпечення.

Sinterit (Польща). Продукція: розробка 3D принтерів, що друкують за технологією SLS та витратних матеріалів до них (3D принтери Sinterit).

Найбільш популярний продукт компанії SINTERIT – це 3D принтери SINTERIT Lisa та Lisa Pro.

Витратні матеріали – Поліамід/Нейлон (рис. 4.37).



Рисунок 4.37 – Витратні матеріали

Nylon 11 – спеціальний матеріал у формі порошку для друку 3D. Це високопродуктивний нейлон на біологічній основі для виготовлення за технологією SLS пластичних та міцних функціональних деталей. Застосовується у функціональному прототипуванні та виробництві дрібних партій виробів.

Nylon 12 SLS – порошок спеціально розроблений для друку SLS. Цей міцний матеріал показує відмінну деталізацію у 3D-друку, завдяки чому знаходить широке застосування в інженерній справі.

Nylon 12 White – порошок для SLS 3D-друку, характеристики якого аналогічні звичайному Nylon 12. Білий Nylon 12 White так само здатний друкувати деталізовані елементи з високою точністю розмірів та ідеально підходить для деталей кінцевого використання.

Nylon 12 GF зі склом – новий матеріал для друку SLS. Завдяки високому вмісту скла, матеріал має підвищену структурну жорсткість і термічну стабільність. Відмінно підходить для функціонального прототипування або готових виробів, які будуть працювати в складних промислових умовах. Nylon 12 GF створює тверді, стабільні, функціональні деталі.

Formlabs Polypropylene Powder – порошок для SLS 3D принтера Formlabs Fuse 1+30W для виготовлення робочих прототипів та міцних деталей кінцевого використання, які є хімічно стійкими, пластичними, зварюваними та водонепроникними.

Представник типу 3D друку SLS – 3D принтер Formlabs Fuse 1+30W (рис. 4.38). Область друку 165×165×300 мм. Максимальний розмір деталі – 159×159×295 мм. Швидкість побудови 10 мм/годину. Товщина шару 110 мікронів. Час запуску – 60 хвилин. Підключення до мережі Ethernet, Wi-Fi, USB 2.0. Місткість бункера 8,5 кг PA12 Nylon. Програмне забезпечення – PreForm.

Системні вимоги – Windows 7 (64-бітна) та вище, Mac OS X 10.12 і вище, OpenGL 2.1. 4 ГБ оперативної пам'яті (рекомендується 8 ГБ). Габарити 677×668×1059 мм. Вага 114 кг.



Рисунок 4.38 – 3D принтер Formlabs Fuse 1+30W

Результати численних досліджень, проведених у галузі АМ-процесів формоутворення виробів та інших дослідженнях, показали, що існує значний потенціал для підвищення продуктивності та економічності. Один з перспективних шляхів досягнення більш ефективного використання адитивних технологій полягає у підвищенні ефективності процесів конструкторської та технологічної підготовки.

Покращення технологічної підготовки складних виробів з використанням адитивних методів пов'язане з підвищенням ефективності оптимізаційних задач, що стосуються підготовки вихідної 3D-моделі виробу до АМ-процесів формоутворення.

Сучасні дослідження в галузі адитивних технологій зосереджені на вирішенні проблем, пов'язаних з необхідністю усунення недоліків принципу пошарової побудови. Недоліки такого підходу полягають у низькій точності та продуктивності, обмеженому діапазоні фізико-механічних та хімічних властивостей матеріалів, а також в особливостях технологічної підготовки. Враховуючи ці проблеми, дослідники активно використовують можливості сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій для розробки ефективних методів підготовки вихідної 3D-моделі виробу до АМ-процесів формоутворення. При розробці складних виробів одержаних за допомогою адитивних методів пошарової побудови виникають нові проблеми на етапах конструкторської та технологічної підготовки, зокрема, у розробці конструкції, аналізі технологічності та моделюванні особливо для виробів зі складною геометрією.

Для ефективної реалізації можливостей адитивних технологій на першому етапі конструкторської підготовки необхідно створити САД-модель виробу, незалежно від її типу: твердотільна, поверхнева або полігональна. Проте для забезпечення оптимальної реалізації можливостей АМ-методів, необхідно розробляти правила DFAM (Design for Additive Manufacturing) та формати файлів 3D-моделей, які забезпечать ефективну реалізацію цих технологій. Дослідження в цьому напрямку включають вирішення проблем пошарової побудови, які мають важливе значення на етапах технологічної підготовки виробництва АМ.

На етапі технологічної підготовки спочатку вирішується задача ефективного планування процесу пошарової побудови, яке гарантує точність і успішність АМ-формування виробу. Сучасні програмні засоби, що

постачаються разом з АМ-установками, виконують повний процес планування та виконання задач технологічної підготовки. Тим не менш, більшість завдань є загальними для всіх адитивних технологій, і тому можуть бути оптимізовані шляхом розробки ефективних алгоритмів для їх виконання в інтегрованій системі технологічної підготовки. Це дозволяє скоротити час підготовки 3D-моделі виробу до АМ-процесів, зменшуючи час експлуатації установки. Розвиток цього напрямку досліджень пов'язаний з обчислювальними проблемами, включаючи вибір методики, алгоритмів розрахунку та оптимізації.

У сфері АМ-виробництва існують значні обмеження, пов'язані з матеріалами, які використовуються для пошарової побудови виробів. Багато досліджень спрямовані на розширення асортименту матеріалів та використання матеріалів з кращими характеристиками. Дослідження в галузі виробництва нових матеріалів, а також покращення їх властивостей, є однією з головних проблем в цій сфері і належить до третьої групи проблем.

Четверта група проблем, яку потрібно вирішити, пов'язана зі забезпеченням передачі даних від САД-моделі до задач технологічної підготовки АМ-процесів пошарової побудови. На сьогоднішній день вивчаються питання, пов'язані з передачею даних на всіх етапах життєвого циклу виробу. Ці проблеми включають визначення режиму та вмісту переданих даних, а їх розв'язання потребує розробки ефективних алгоритмів передачі даних.

Контроль виробів зі складною формою зазвичай виконується з використанням установок реверсного інжинірингу. Такі установки можуть працювати як на основі контактних, так і безконтактних методів. Є проблеми контролю, обумовлені складними геометричними формами виробів. На сьогодні існує проблема стандартизації визначення фізико-механічних властивостей виробів зі складним складом матеріалів та вираженою анізотропією властивостей у результаті пошарової побудови. Всі перераховані проблеми належать до групи проблем контролю.

Декілька досліджень розглядають проблему вибору методу адитивного виготовлення, з урахуванням геометрії 3D-моделі виробу.

Основними задачами технологічної підготовки АМ-процесів є: вибір методу виготовлення і матеріалу виробу, планування завантаження обладнання, відпрацювання конструкції на технологічність, визначення стратегії виготовлення, структурна оборотна декомпозиція, раціональна орієнтація

виробу на робочій платформі, масштабування триангуляційних моделей (технологічна компенсація усадки матеріалу), вибір стратегії розсічення 3D-моделі для створення набору перетинів, завдання параметрів формоутворення шарів і т. д. Схему виконання задач технологічної підготовки процесів селективного лазерного спікання представлено на рис. 4.39.

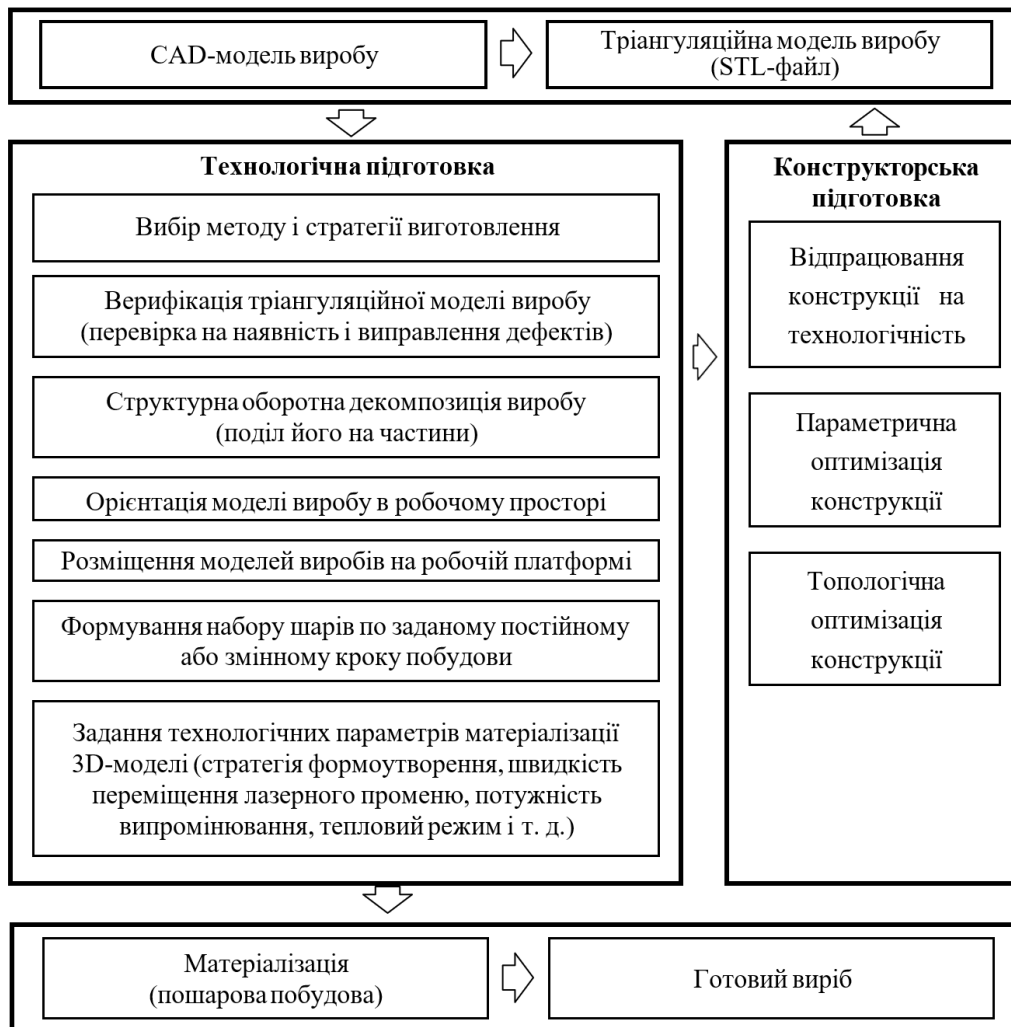


Рисунок 4.39 – Послідовність виконання задач технологічної підготовки до матеріалізації виробу адитивними методами

Загалом, задачі, пов'язані з технологічною підготовкою АМ-процесів, взаємопов'язані і впливають на різні аспекти процесів виготовлення та властивостей виробів, оскільки виникають від загальних обмежень. Наприклад, при визначенні раціональної орієнтації виробу, розміщенні та створенні структур підтримки. Оскільки деякі поверхні потребують підтримки при формуванні пошаровою побудовою, конструкція структур підтримки визначається попередніми задачами, які впливають на площу поверхонь, що

потребують підтримки, та на їх об'єм. У таких випадках орієнтація виробу зазвичай вибирається за критерієм мінімізації площі звисаючих поверхонь. Крім того, орієнтація впливає на фізико-механічні властивості виробу через його анізотропію, що виникає внаслідок пошарового формування. Сила адгезії між шарами матеріалу є меншою, ніж усередині шару, а похибка формування поверхні, усадка матеріалу та час виготовлення також залежать від напрямку побудови.

Один зі способів значного підвищення продуктивності методу SLS – структурна декомпозиція виробу та виготовлення щільно розташованих складових частин з мінімальною кількістю завантажень установки. Зазвичай, цей підхід використовують для виробів великих розмірів, які не вміщуються в робочий простір установки.

Вибір стратегії нарізки 3D-моделі при створенні набору перетинів визначає точність, якість поверхні і час виготовлення. Висока точність досягається шляхом збільшення кількості шарів, що, в свою чергу, збільшує час виготовлення. Оптимізація за заданою похибкою побудови дозволяє забезпечити баланс між часом та точністю.

Визначення параметрів і стратегії формування шарів є ключовим етапом у процесі створення виробу за допомогою SLS-технології. Ці параметри, включаючи траєкторію обходу треків променю лазера, мають прямий вплив на фізико-механічні властивості матеріалу та час побудови. Траєкторія обходу треків визначається за допомогою геометрії треків, параметрів процесу формування та порядку обходу їх. Розв'язання цієї задачі вимагає розгляду обчислювальних та технологічних аспектів підготовки АМ-процесів.

Аналізуючи вихідну 3D-модель виробу з урахуванням стратегії формування шарів, можна визначити оптимальну орієнтацію виробу в робочій області побудови установки. Це робиться за допомогою матриці перетворення для системи координат 3D-моделі виробу, яка враховує критерій орієнтації відносно напрямку побудови. Вихідна 3D-модель може бути в форматі тріангуляційної моделі (STL-файлу) або CAD-моделі. Раціональна орієнтація виробу є важливим фактором для більшості процесів SLS-способу і може суттєво впливати на якість та властивості матеріалу виробу.

У багатьох методах адитивного виготовлення висота виробу по осі Z прямо пов'язана з загальним часом побудови і, отже, з кінцевою собівартістю

деталі. В цьому випадку припускається, що час для виготовлення кожного шару є приблизно постійним за однакових умов формування і незалежно від складності та площі перетину матеріалу в шарі. Отже, час виготовлення прямо залежить від кількості шарів, але зв'язок між часом та кількістю шарів буде відрізнятися в залежності від обраної стратегії нарізки 3D-моделі.

Низька якість поверхні, особливо на важливих поверхнях, призведе до збільшення часу на остаточну обробку і, отже, збільшення собівартості виготовлення.

Для оцінки якості поверхонь виготовленого виробу можуть бути використані різноманітні статистичні характеристики, що залежать від орієнтації виробу. Зокрема, можуть бути враховані площа поверхонь, які найбільш схильні до появи дефектів у вигляді «сходинок», що виникають через пошарову побудову. Також важливими критеріями є площа контакту виробу з платформою установки, площа поверхні, яка контактує з опорною конструкцією та фізико-механічні властивості деталі. Оскільки пошарове виготовлення може призводити до анізотропії властивостей виробу, цей фактор також може бути врахований при оцінці якості. Крім того, можуть бути визначені величина відхилень форми поверхонь та показник шорсткості.

У дослідженнях з розсічення (нарізки) 3D-моделей виробів виділяють дві стратегії – з постійним та змінним кроком пошарової побудови. При змінному кроці побудови використовується заданий критерій, який аналізує 3D-модель на поточному шарі для визначення кроку побудови. Результатом процедури нарізки є набір контурів перетинів і значень товщини шару.

Для створення одиничного зрізу полігональної 3D-моделі (у форматі STL- файлу) використовується горизонтальна площина XY. Реалізація даної задачі включає в себе дві складності: визначення товщини шару (кроку побудови) та визначення геометрії контуру.

Стандартний підхід до нарізки передбачає використання однакової товщини шарів при постійному кроці побудови. Однак цей метод не враховує особливостей геометрії виробу, що може призвести до зменшення точності виготовлення. З метою усунення цієї проблеми були розроблені адаптивні методи, які використовують змінний крок побудови.

У процесі формування шару матеріалу важливу роль відіграє стратегія формоутворення, що визначає шлях рухів (використання сопла, плями

лазерного променю та ін.). Рухи можуть мати різну конфігурацію, яку характеризують треки – лінійні або криволінійні. Треки бувають внутрішні, які формують внутрішній матеріал виробу, та зовнішні, що відповідають за поверхні виробу. Геометрія внутрішніх треків та параметри формоутворення, такі як діаметр плями лазерного променю, потужність лазерного випромінювання, швидкість переміщення тощо, мають вплив на фізико-механічні властивості виробу. Зовнішня конфігурація траєкторій та параметри формоутворення, такі як величина зсуву треку від контуру, кількість проходів тощо, визначають точність та шорсткість поверхонь виробів.

Щодо технології SLS використовуються дві стратегії формоутворення: еквідистантна та растрова. На сьогодні існує велика кількість різноманітних підходів до вирішення проблем, пов'язаних із визначенням внутрішньої та зовнішньої траєкторії рухів у процесі формоутворення. До них належать: розробка растрової стратегії формування на основі воксельної моделі або шляхом визначення точок переривання прямолінійних треків руху; використання еквідистантних кусково-прямолінійних та криволінійних треків траєкторій для поліпшення точності формоутворення поверхні; визначення раціональної траєкторії з урахуванням оптимального співвідношення точності та часу побудови; оптимізація фізико-механічних властивостей виробу, зокрема, його жорсткості та міцності; підвищення якості адгезії між шарами за допомогою прогнозування температурних процесів.

Завдання технологічної підготовки для виготовлення складних виробів з використанням SLS-процесів були вирішені з використанням комп'ютерної системи, яка була розроблена на кафедрі «Інтегровані технології машинобудування» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (екранні знімки наведені на рис. 4.40).

Система технологічної підготовки для матеріалізації складних виробів адитивними методами містить інструменти дослідження, які використовують прикладну статистику. Методика роботи включає наступні етапи: імпорт STL-файлів моделей в базу даних геометричних характеристик, пошаровий аналіз 3D-моделі для оцінки можливості виготовлення, створення воксельної 3D-моделі для аналізу розподілу елементарних об'ємів та використання робочого простору, колірна візуалізація для перевірки коректності тріангуляційної 3D-моделі та експортування даних в формати: STL, AMF/PLY. Така методика дозволяє вирішувати задачі, такі як визначення раціональної

орієнтації виробу та порівняльна оцінка ефективності різних варіантів розміщення 3D-моделей виробів в робочому просторі.

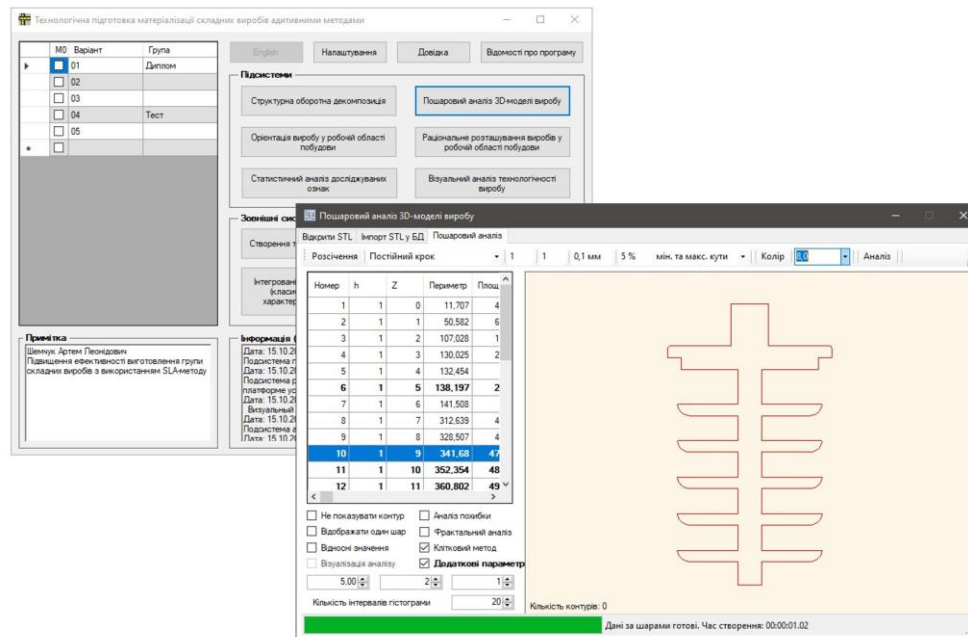


Рисунок 4.40 – Екранні форми системи технологічної підготовки SLS-процесів

Для покращення ефективності використання SLS-процесів при виготовленні групи виробів використовувалась методика, що базується на вивченні статистичних характеристик технологічних параметрів пошарової побудови. Початковою інформацією для SLS-установок є CAD-модель або полігональна 3D-модель виробу. Якщо використовується CAD-модель, то для отримання триангуляційної 3D-моделі використовується CAD-система. У проведених дослідженнях використовувалась CAD-система Materialise Magics.

Для отримання 3D-моделі виробу можуть використовуватись різні джерела даних, такі як креслення, аналітичні залежності, фотографії або хмари точок, які були отримані вимірювальними системами. Однак основними вимогами до триангуляційної 3D-моделі виступають її замкненість та зв'язність. Крім того, до додаткових вимог до триангуляційних моделей належать відсутність вироджених граней та уникнення накладання їх на інші грани.

Недотримання вимог до 3D-моделі промислового виробу може призвести до помилок під час виконання задач технологічної підготовки для АМ-процесів. Процес матеріалізації 3D-моделі з використанням SLS-технологій включає кілька етапів, таких як проектування CAD-моделі, візуалізація, доробка та оптимізація конструкції виробу, перетворення у формат STL, трансформація з урахуванням умов оптимізації, проектування технологічних конструкцій, підготовка до роботи SLS-установки та матеріалізація 3D-моделі. Після цього проводиться контроль відповідності вимогам щодо геометричних та фізико-механічних властивостей виробу та коригування моделі в разі потреби. Наступні етапи включають повторне одержання виробу та його верифікацію, а також обробку поверхні виробу в разі необхідності.

Для досягнення максимальної точності і уникнення помилок в процесі створення складних виробів за допомогою SLS-технологій, необхідно провести етапи контролю, оптимізації конструкції і верифікації. Перед початком виготовлення виробу необхідно мати 3D-модель з коректною тріангуляцією і оптимізованою конструкцією. Оптимізована конструкція розробляється в CAD-системах, а перевірка коректності тріангуляції також виконується в цих програмах.

SLS-установки використовують два формати вихідних даних – STL і SLC (Slice). Файл SLC містить набір 2D-перетинів для SLS-установок і створюється з використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

Система селективного лазерного спікання на базі установки Vanguard Si2 SLS (рис. 4.41) призначена для адитивного виготовлення кінцевого виробу (без стадії отримання моделі прототипу).

Основні характеристики установки Vanguard Si2 SLS: максимальна потужність лазерної системи CO₂ 100 Вт; розмір плями лазерного променя 0,47 мм; точність побудови за координатними осями X, Y 0,178 мм; товщина шару побудови 0,076...0,500 мм.



Рисунок 4.41 – Установка селективного лазерного спікання Vanguard Si2 SLS

Для виготовлення складних виробів за допомогою процесів SLS використовується комп'ютерна система, розроблена на кафедрі «Інтегровані технології машинобудування» НТУ «ХПІ». Система включає установку Vanguard Si2 SLS від 3D Systems (США), охолоджувач, станцію відриву BOS, високотемпературну піч Laser Oven, систему забезпечення газоподібним азотом і змішувач порошоків. Установка Vanguard Si2 SLS має два режими роботи – стандартний і продуктивний, що дозволяє зменшити час побудови в 2 рази. Швидкість сканування може бути налаштована в межах 7,5...10 м/с, а робочий простір порівняно з 3D-принтером Ultimaker 3 Extended більший – 381×330×457 мм (X×Y×Z). Основні етапи процесу формування на установці Vanguard Si2 SLS включають первісну подачу порошку, вирівнювання шару після проходу ролика, процес спікання і подальший прохід ролика для нанесення матеріалу для наступного шару.

У вакуумній камері здійснюються процеси з робочими сумішами. Станція від'ємного тиску BOS використовується для очищення виробу від залишків порошку з метою подальшої інфільтрації та повторного використання. Змішувач порошоків дозволяє змішувати нові порошки з використаними, які залишилися в робочій зоні після формоутворення.

Для високотемпературного (до 1070°C) спікання металевих та керамічних порошоків, випалювання сполучної речовини, розплавлення бронзи та інфільтрації використовується піч Laser Oven.

Для виготовлення SLS-виробів використовуються порошки з матеріалів таких як віск, алюміній, сталь, кераміки та інші. Система селективного лазерного спікання Vanguard Si2 SLS використовує безпечні та нетоксичні матеріали, що легкі у використанні, зберіганні, утилізації та переробці.

Для даної роботи використовувалися порошки поліаміду DuraForm PA. Цей матеріал забезпечує високу якість поверхні та легкість механічної обробки. Крім того, він є екологічно безпечним, вологостійким та зберігає свої функціональні властивості при температурах до 100°C.

Щоб забезпечити гладкі поверхні, використовуються різноманітні методи обробки, такі як полірування та згладжування нерівностей у вакуумній станції відриву BOS та піскоструминній камері. При необхідності подальша обробка поверхонь виконується з використанням ручного електроінструменту.

4.8. Багатоструменевий 3D-друк (MJP)

MJP (MultiJet Printing) – багатоструменеве моделювання за допомогою фотополімерного або воскового матеріалу (рис. 4.42).

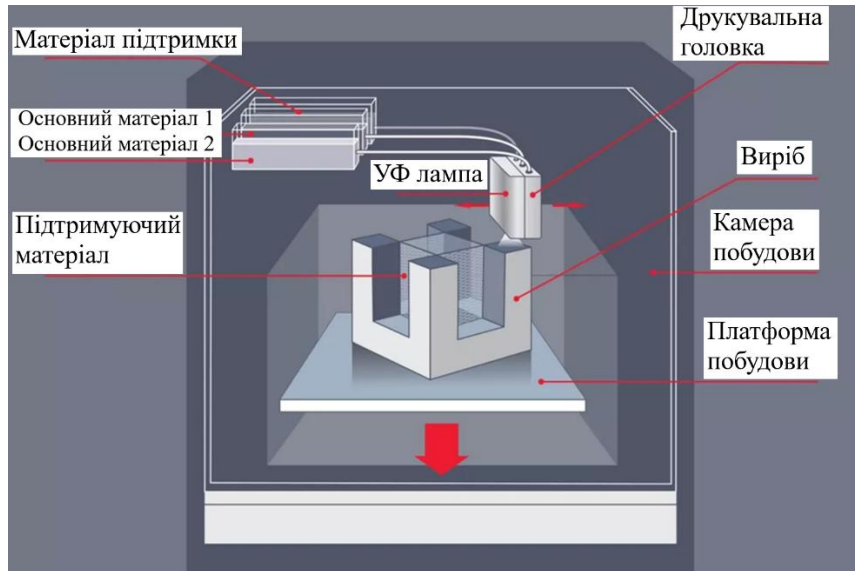


Рисунок 4.42 – Схема методу MJP

Принцип друку нагадує струменевий. В основі технології – друкуюча головка з цілою батареєю дрібних сопел, розташованих лінійно в кілька рядів. Кількість сопел починається від 96 для молодших моделей принтерів і сягає 448 для топових моделей. Одне сопло – одна дрібна крапля модельного матеріалу для побудови виробу.

Друкуючий блок рухається вздовж робочої поверхні та наносить шар рідкого полімеру. Слідом за друкованим блоком слідує УФ-лампа, яка засвічує щойно нанесені частинки матеріалу, внаслідок чого той твердне, формуючи заданий виріб.

Крім основного матеріалу в процесі друку використовується допоміжний (або матеріал підтримки) – VisiJet S300. Це воскова структура, яка є опорою для навісних елементів майбутньої моделі. Після закінчення друку воскові підтримки виплавляються у спеціальній печі.

3D-принтери, що працюють за технологією MJP, можуть працювати з восковими та фотополімерними матеріалами.

Друк воском здійснюється двома головками: однією наноситься більш твердий віск основної деталі, другий більш м'який або легкоплавкий для друку підтримки. Отримані деталі зручно застосовувати для створення ливарних форм, коли воскова заготовка легко виплавляється з форми при температурі в 60°C.



Рисунок 4.43 –
Віск Flash Forge
FFWJ1100 Purple
Building Wax

Віск для 3D принтера FlashForge FFWJ1100 Purple Building Wax (рис. 4.43) призначений для друку на воскових 3D принтерах. Віск використовується як основний матеріал для створення воскових моделей для лиття. Дозволяє друкувати з високою точністю і деталізацією, тому може використовуватися в будь-яких галузях – від авіаційної до ювелірної промисловості. Має досить низьку температуру плавлення та низьку зольність, що дозволяє досягти високої якості готових виробів. Віск нешкідливий для людини і не є токсичним.

Віск для 3D принтера FlashForge FFMS 3100 White Supporting Wax 1 – професійний восковий матеріал для MJP 3D-принтерів, таких як Flashforge WaxJet400. Це нетоксичний восковий матеріал. Він ідеально підходить для лиття по виплавленим моделям, таких як ювелірні вироби, точне лиття та аерокосмічна промисловість. Зняття підкладки без рук. Цей 100% чистий восковий матеріал повністю розчиняється в суміші безводного спирту, ізопропанолу при температурі 43°C. Відмінна стійкість до окислення та термічна стабільність. При зберіганні при кімнатній температурі в закритому вигляді віск може зберігатися близько 5 років, після відкриття 20 днів.

3D-моделювання та 3D-друк восків на MJP-принтері надає можливість отримувати моделі, що виплавляються для виготовлення як ювелірних виробів (рис. 4.44) так і інших, наприклад емалевих чаш (рис. 4.45).



Рисунок 4.44 – Воскова модель та ювелірні прикраси



Рисунок 4.45 – Емалеві чаші

Емаль має широку гаму кольорів і відома здатністю зберігати колір протягом століть. Своїм блиском вона нагадує дорогоцінне каміння і тому використовується ювелірами та дизайнерами для створення прикрас та художніх виробів високого класу. Використовуючи цифрові технології, у тому числі 3D-друк воском, можна позбутися від складних процедур, характерних для традиційних методів, і скоротити виробничий цикл виготовлення таких виробів. Далі використовується лиття за моделями, що виплавляються для отримання, в даному випадку, емалевих чаш з необробленого металу. Висока точність воскового 3D-друку дозволяє відобразити деталізовані візерунки. У процесі друку моделі формуються відразу цілісними, з чіткими та яскравими візерунками на них.

VisiJet M3-X – полімерний матеріал, що повністю імітує властивості ABS-пластику. (рис. 4.46). Ідеальний для швидкого прототипування, перевірки форми, дизайну, функціональності. Дуже міцний та стійкий до впливу високих температур. Застосовується для друку широкого спектру виробів у різних сферах: виробництво, дизайн, металургія, машинобудування, медицина та інших. Його використовують скрізь, де необхідні дуже міцні моделі з заздалегідь відомими характеристиками.



Рисунок 4.46 – Полімер VisiJet M3

VisiJet M3 Crystal – напівпрозорий та дуже міцний пластик. Прекрасно підходить для перевірки функціональності, виробництва готової продукції та прототипів. Має шостий клас біосумісності, завдяки чому може застосовуватися в медицині. З нього виготовляють дуже міцні деталі та складні конструкції з певним ступенем прозорості, коли необхідний візуальний доступ усередину виробу.

VisiJet M3 Navy – універсальний матеріал синього кольору, призначений для виготовлення пластикових моделей різної форми та сфер застосування. Забезпечує високу деталізацію та якість поверхонь. Може використовуватися для друку майстер-моделей, що випалюються. Використовується

для економічного друку різних виробів у різних галузях. Крім того, цей матеріал застосовують для виробництва майстер-моделей, що випалюються, за якими виготовляються ливарні форми. Сфери застосування: промисловість, медицина, ювелірне виробництво, металургія, автомобілебудування, приладобудування

VisiJet M3 Techplast — сірий пластиковий матеріал, що забезпечує економічний 3D-друк моделей для різних сфер. Крім того, він може застосовуватися для створення майстер-моделей, що випалюються. Застосовується для друку широкого спектра виробів у різних сферах: виробництво, дизайн, металургія, машинобудування, медицина та інші. Крім того, цей матеріал може застосовуватися для виробництва випалюваних майстер-моделей.

VisiJet M3 Procast – цей матеріал синього кольору забезпечує найкращу якість моделей для точного лиття. Ідеально підходить для високоточного виробництва: тонких медичних інструментів, ювелірних виробів, мікроелектроніки, металевих деталей. Використовується для створення високоточних майстер-моделей, що випалюються. Прототипи, створені з використанням цього матеріалу, забезпечують високу деталізацію та якість поверхонь. Сфери застосування: ювелірне виробництво, мікроелектроніка, медицина, стоматологія, автомобілебудування, приладобудування.

Приклади виробів, виготовлених з полімерного матеріалу приведені на рис. 4.47.



Рисунок 4.47 – Вироби з полімерного матеріалу

FlashForge WaxJet 400 (Китай) (рис. 4.48) – професійний 3D-принтер для друку високоточних та максимально гладких восків в ювелірній галузі, промисловості та стоматології.

Стабільна подача матеріалу за рахунок нерухомості основного модуля друку при рухомій платформі побудови. Закрита камера побудови, що дозволяє ізолювати процес друку від зовнішніх впливів: пилу, мікроскопічного сміття або зайвої вологи. Сумісність з двома видами матеріалів: 100% фіолетовим воском FFWJ1100 і восковим матеріалом підтримки FFMS3100 білого кольору. Технологія MJP. Матеріал – Віск. Область побудови 289×218×150 мм. Роздільна здатність 1200×1200×1600 точок на дюйм. Товщина шару 0,016 мм. Сумісна ОС Windows 7/Windows 10 (64bit). Вбудоване програмне забезпечення WaxJetPrint. Розміри принтера 1352×775×1600 мм. Вага 480 кг.



Рисунок 4.48 – 3D принтер FlashForge WaxJet 400



Рисунок 4.49 – 3D принтер ProJet 3500 HDMax

3D принтер ProJet 3500 HDMax Фірми 3D SYSTEMS (США) (рис. 4.49) забезпечує максимальну якість 3D друку при великих габаритах області побудови 298×185×203 мм. Точність друку 16 мкм. Товщина шару 16...32 мкм.

Працює з окремою лінійкою матеріалів VisiJet. Це спеціально розроблені полімери, які застосовуються в обладнанні компанії 3D SYSTEMS. Ці матеріали володіють різними фізичними та механічними властивостями і підходять для різних завдань. Матеріали, що застосовуються: VisiJet® X, VisiJet® Crystal, VisiJet® Proplast, VisiJet® Navy, VisiJet® Techplast, VisiJet® Procast. Матеріал підтримки VisiJet S300. Вага принтера 323 кг. Програмне забезпечення ProJet® Accelerator.

4.9. Струменевий друк сполучною речовиною (Binder Jetting)

Binder Jetting – адитивна технологія, яка полягає в шаровому склеюванні композитного порошку сполучною речовиною (як правило, на основі гіпсу або кварцового піску) (рис. 4.50). Як витратні матеріали можуть використовуватися пісок, гіпс, полімери, метали, кераміка. Наприклад, промислові ВJ-принтери Robotech дозволяють виготовляти складні форми із силікатного піску для подальшого лиття металів.

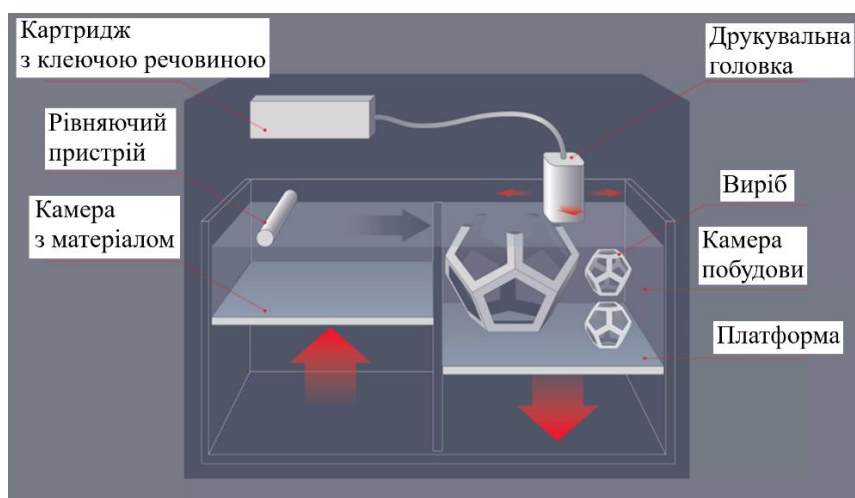


Рисунок 4.50 – Схема методу ВJ

У камері побудови 3D-принтера рекоутер розрівнює порошок до утворення тонкого шару, після чого друкувальна головка наносить на шар сполучну речовину. Потім порошок наноситься повторно і процес повторюється.

Переваги таких 3D-принтерів: виготовлення промислових виробів з унікальною складною геометрією, у тому числі великогабаритних, швидке та економічне виробництво високоточних ливарних форм, надруковані піщані форми не потребують випалу, їх можна відразу використовувати для лиття, якість друку вище, ніж у FDM-принтерів, Binder Jetting не вимагає генерації підтримки.

Технологія ВJ була розроблена в Масачусетському технологічному інституті в 1993 році, а потім придбана американською компанією Z Corporation, і пізніше компанією 3D Systems. Технологія широко застосовується в промисловості у розробці та виробництві.

Binder Jetting, як і випливає з назви (binder – сполучна речовина, jetting – нанесення упорскуванням, струменевий друк), включає нанесення рідкого сполучного, подібно нанесення чорнила на папір в струминному принтері.

На відміну від більшості інших технологій 3D-друку, ВJ дозволяє створювати повнокольорові моделі, для чого треба лише додати барвник у сполучну речовину. Можливе нанесення барвника не тільки на зовнішній шар, а й на будь-яку глибину, що зробить такий малюнок украй стійким до будь-яких дій.

Після друку за технологією ВJ, отримані вироби вимагають постобробки, різної для різних матеріалів друку.

При 3D-друку металом за технологією ВJ використовуються металеві порошки різного складу і полімерне сполучне. Ця технологія дозволяє друкувати металом деталі, які неможливо створити традиційними методами виробництва – в першу чергу йде мова про створення внутрішніх структур деталі, вони можуть бути будь-якої форми та складності. Технологія дає можливість друкувати різними металами і неметалевими матеріалами, у тому числі нержавіючою сталлю, міддю, карбідом вольфраму, титаном, керамікою та композитами.

Після завершення друку деталі повинні пройти обробку, яка надає їм характеристики міцності суцільнометалевого виробу – випалювання сполучного та/або спікання. Для цього надруковані деталі поміщають у піч та витримують у заданих температурних режимах.

Спікання проводиться при температурі в 97 відсотків від температури плавлення матеріалу друку. Під час спікання деталі піддаються усадці, що враховується заздалегідь, під час моделювання деталі для друку.

Binder Jetting дозволяє друкувати піском ливарні форми (рис. 4.51), для подальшого лиття металів, а керамікою і композиційними сумішевими матеріалами – всілякі вироби, у тому числі декоративні, чому дуже сприяє можливість 3D-друку повнокольорових моделей. Для кольорового друку в 3D-принтері використовуються дві друкувальні



Рисунок 4.51 – Ливарна форма

головки: одна для нанесення

сполучного, інша для нанесення фарби. Щоб підсилити механічну міцність моделі, вона піддається спіканню.

Для 3D-друку за технологією VJ можна використовувати різні сипучі матеріали, у тому числі натуральний пісок і штучний кремнезем. Виготовлення піщаних ливарних форм за технологією VJ дозволяє отримувати форми з високою точністю розмірів, у стислі терміни та за низькою вартістю.

Кількість матеріалів для VJ-3D-друку з часом збільшується, розробляються нові типи сировини, але є кілька основних, що найчастіше застосовуються в Binder Jetting:

Кремнеземний пісок. Для 3D-друку моделей із високою стійкістю до підвищених температур слід вибрати саме цей матеріал. Кремнеземний пісок дозволяє досягти приголомшливих результатів при литті металів в надруковані з нього піщані форми.

Повнокольоровий друк піщаником або гіпсом. Такі деталі крихкі і не розраховані на механічні навантаження, зазвичай це декоративні або демонстраційні моделі такі, що дозволяють побачити можливості повнокольорового друку, наочні посібники для навчання, предмети інтер'єрного декору, дублі витворів мистецтва та інших експонатів для музеїв.

Нержавіюча сталь. Надруковані з нержавіючої сталі деталі можуть бути застосовані в будь-якій області, замінюючи литі або виконані за іншими традиційними технологіями. Готові моделі мають високу міцність і відмінні механічні властивості, а також високу стійкість до корозії.

Карбід вольфраму. 3D-друк карбідом вольфраму за технологією VJ з наступним запіканням дозволяє отримати насадки, що мають високу твердість, для ріжучого інструменту.

Сполучним матеріалом (Binder) у технології VJ є:

Enviroset 3D Jet Resin – низьков'язка термореактивна фуранова смола, спеціально виготовлена для використання у всіх 3D принтерах, для формування піщаних стрижнів та форм. Вона підходить для використання з усіма типами металів. Enviroset 3D Jet Resin являє собою термореактивну фуранову смолу, яка реагує в присутності сильного кислотного каталізатора при температурі навколишнього середовища, з утворенням затверділого сполучення. Фуранова смола не містить азоту і є низьководяним, незворотним

формальдегідом і фенольною композицією. Вона забезпечує низьку в'язкість та високу міцність на розтяг у обробленому піску.

RoboBind (Фуранова смола). Сполучний склад «RoboBind» у процесі друку струменево розподіляється в зоні побудови на поверхні активованого піску, вступаючи в реакцію з активуючою речовиною, пошарово формує майбутню модель.

Рекомендовані кислотні каталізатори (активатори) для попередньої обробки друкованої підкладки – TW-40 (для максимальної міцності) і TC-50 (для швидкого очищення деталей).



Рисунок 4.52 – RoboActive

Активуєча речовина RoboActive (рис. 4.52) використовується для холодного плакування піску. Щільність: 1,25 – 1,30 г/см³; вміст п-толуолсульфокислоти не менше 60%; стандартні витрати: 0,3% від маси піску. При зниженні середнього розміру зерна менше 120 мкм при однорідності понад 80%, рекомендовано збільшення витрат до 0,45%.



Рисунок 4.53 – Промисловий принтер Robotech SandUltra 2000

Промисловий принтер Robotech SandUltra 2000 (рис. 4.53) розроблений спеціально для використання в металургійній галузі. Для зберігання кварцового піску використовують бункер. Цей матеріал подається через сопло або форсунку на поверхню, де скріплюється сполучною речовиною.

Матеріал–пісок. Область побудови 2000×1040×800 мм. Товщина шару 0,15...0,5 мм. Сумісна ОС Windows 7/8/10/11. Програмне забезпечення Robotech. Розміри принтера 10300×2500×3200 мм.

4.10. Повнокольоровий 3D-друк (CJP)

CJP (Color Jet Printing) – технологія адитивного виробництва, заснована на пошаровому склеюванні та фарбуванні композитного порошку. Використовується в 3D принтерах 3D Systems. Принципова схема роботи наведена на рис. 4.54.

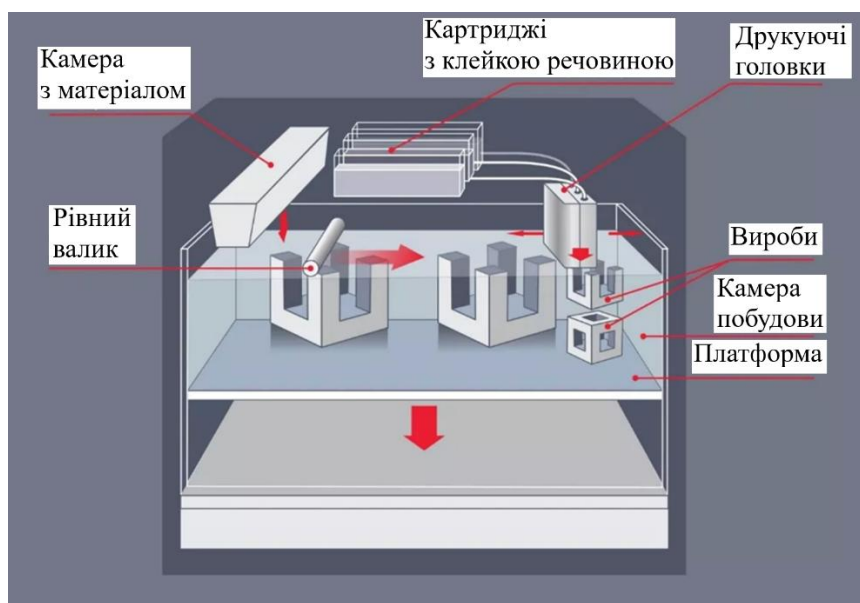


Рисунок 4.54 – Схема методу CJP

CJP – технологія, яка застосовується у 3D-принтерах компанії 3D Systems серії ProJet CJP ×60. Раніше технологія називалася 3D Printing чи 3DP. З її допомогою можна швидко створювати як монохромні, і кольорові прототипи з композитного порошку. Відсутня потреба у матеріалі підтримки, можлива перевірка виробів на ергономічність.

В основі роботи CJP лежать два матеріали – основний і сполучний. Основний матеріал (VisiJet PXL Core) або порошковий пластик служить для побудови шарів виробу, сполучний матеріал склеює і фарбує разом частинки в потрібних місцях, формуючи виріб.

3D-принтер, що працює за технологією CJP, складається з двох частин: камера побудови виробу, в яку завантажується модельний матеріал, та камера очищення, де відбувається видалення зайвого матеріалу.

Виробництво прототипу відбувається пошарово. Спочатку матеріал моделі поступово тонким шаром розподіляється по всій поверхні плат-

форми камери побудови. Потім на цей шар наноситься сполучна речовина, склеюючи і фарбуючи частинки матеріалу між собою згідно комп'ютерної 3D-моделі.

Після нанесення клею платформа зміщується на товщину шару (0,1016 мм). Після зміщення друкуюча голівка знову починає свій запрограмований рух, вирощуючи модель шар за шаром.

СJP, в порівнянні з іншими технологіями, має низьку собівартість виробленого прототипу, забезпечуючи при цьому високу швидкість 3D-друку і якість моделей. Це досягається за рахунок низької вартості матеріалу та його безвідходного використання. Один матеріал є як для побудови моделі, так і для її підтримки під час процесу 3D-друку. Також це єдина технологія, яка здатна передавати кольори поліграфічної палітри СМУК.

Технологія СJP дозволяє створювати різнокольорові моделі, а також відтворювати на їх поверхні різні текстури у високій роздільній здатності. Доступна палітра СМУК досягає 390000 відтінків і наноситься в процесі друку спільно з клейкою речовиною.

Мінімальний розмір елемента, який можна створити за технологією СJP, варіюється в діапазоні від 0,4 до 0,1 мм. Така точність друкованих головок систем тривимірного друку дозволяє створювати моделі з поверхнями різних ступенів складності.

Технологія СJP дозволяє друкувати моделі з дуже тонкими стінками. Мінімально можлива товщина стінки, що не прогинається і не руйнується під власною вагою, становить 0,5 мм. При цьому товщина кожного шару лежить в діапазоні від 0,089 до 0,102 мм.



Рисунок 4.55 – VisiJet PXL Core

У технології СJP використовується універсальний гіпсовий композит – матеріал VisiJet PXL Core (рис. 4.55) яскраво-білого кольору, що використовується і для побудови моделі, і для її підтримки. Не проклеєний матеріал, що залишився після друку, автоматично фільтрується і використовується повторно.

Моделі, створені з використанням цього композитного порошку, відмінно підходять для візуального аналізу, презентацій, оцінки

зовнішнього вигляду. Крім того, матеріал VisiJet PXL значно краще передає колірну гаму, а також деталізацію текстур і зображень вироблених прототипів.

Більшість матеріалу підтримки видаляється 3D-принтером автоматично. Але, оскільки матеріал підтримки це порошок, то для досягнення більш якісного очищення поверхні прототипу від найдрібніших частинок використовуються спеціальні камери очищення моделей. Такі камери або вже вбудовані в системи тривимірного друку ProJet ×60 або поставляються окремо. Видалення порошку здійснюється за допомогою стисненого повітря і повністю виключає пошкодження готової моделі або її частин.



Рисунок 4.56 – HARZ Labs Binder

Як сполучна речовина використовуються біндери HARZ Labs Binder призначені для друку гіпсом (рис. 4.56). Різні відтінки біндери дозволяють створювати повнокольорові вироби. Біндери були розроблені з урахуванням особливостей сучасних 3D принтерів для друкування гіпсом, а також матеріалів різних виробників. Склади мають тривалий термін зберігання. Сполучна речовина робить друк стабільним і продовжує термін служби друкарських головок. Переваги HARZ Labs Binder: повноцінна палітра кольорів; підходять для 3D принтерів різних виробників; тривалий термін зберігання.

Універсальний кольоровий 3D принтер для виготовлення виробів професійної якості ProJet 660 Pro (рис. 4.57) дозволяє створювати об'єкти з яскравим насиченим кольором. Конфігурацією принтера передбачений колірний діапазон 6 мільйонів кольорів. Що стосується функціоналу приладу, кольоровий 3D принтер ProJet 660 Pro має просту і зручну систему управління та ергономічний інтерфейс. Він оснащений такими корисними функціями як самодіагностика, а також має ряд автоматичних налаштувань. У представленому пристрої використовуються спеціальні картриджі зі сполучною



Рисунок 4.57 – 3D принтер ProJet 660 Pro

рідиною для основного матеріалу. Вони виконані в закритому корпусі, легко вставляються та замінюються. Як витратний матеріал використовується нетоксичний композит VisiJet PXL.

Кольоровий 3D принтер ProJet 660 Pro працює на високій швидкості і необхідні вироби виробляються за лічені години, на противагу дням і навіть тижням, звичним для традиційних способів виготовлення. При цьому, на великій області побудови можна розмістити відразу декілька моделей, що значно прискорює процес виробництва. Така промислова установка може обслуговувати конструкторське бюро, дизайнерську студію або дослідницьку лабораторію.

Висока швидкість 3D друку. Відображення найвищої якості передачі кольору. П'ять друкувальних головок, які забезпечують рівномірний і точний розподіл матеріалу та кольору. Готові моделі не потребують постобробки. Автоматизоване завантаження та збирання порошку для подальшого використання. Завдяки великому об'єму робочої зони (254×381×203 мм), 3D-принтер може друкувати дуже габаритні моделі, не витрачаючи час на поділ моделі на частини та подальшу склейку для формування цілого виробу. Велика камера також дозволяє друкувати одночасно безліч маленьких моделей.

Застосовується для швидкого відтворення тривимірних моделей; для малого серійного виробництва тривимірних моделей; для створення реалістичних тривимірних моделей; для створення тривимірних моделей з високоточним ступенем деталізації; для функціонального тестування тривимірних моделей; для створення тривимірних кольорових моделей, які не вимагають додаткового забарвлення; для створення великогабаритних трьохвимірних моделей; для друку потрібних логотипів безпосередньо на тривимірній моделі.

Приклади друку надані на рис 4. 58.



Рисунок 4.58 – Приклади друку

4.11. Пряма лазерна наплавка (DED)

Пряме лазерне наплавлення (DED) – метод прямого підведення енергії та матеріалу (рис. 4.59). Це одна з технологій пошарового нарощування синтезу об'єктів. Вона передбачає подачу матеріалу як порошку чи дроту у місце побудови (наплавлення на деталь) з допомогою лазера.

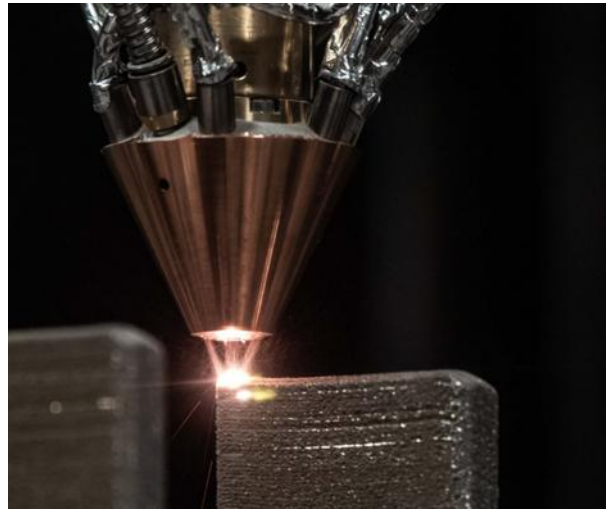


Рисунок 4.59 – Пряма лазерна наплавка

DED технологія 3D друку виконується в автоматичному режимі під керуванням програмного комплексу верстата, гарантуючи найкращі результати.

DED технологія – один з різновидів адитивних виробничих технологій. Вона передбачає виготовлення продукції на основі даних цифрової моделі, шляхом пошарового додавання матеріалу. Знайшла вона застосування і при лазерній наплавці – генерованому виробничому методі, що застосовується для металевих сплавів.

Технологія прямого наплавлення реалізується із застосуванням лазерних верстатів. У робочому процесі спрямований промінь лазера діє на оброблювану деталь, формуючи на ній ванну розплаву. До неї надходить або спеціальний дріт, або газопорошок (через сопло). Тут він переходить в рідкий стан, забезпечуючи з'єднання з вихідним матеріалом. Після охолодження на поверхні формуються з'єднувальні валики або структури певної конфігурації і розмірів, а то і абсолютно нові деталі.

У зону обробки також подається струмінь захисного газу, переважно аргону. Оптичний вузол верстата під керуванням програмного комплексу сам переміщається по деталі, створюючи грані, лінії. Однакова товщина шару забезпечується системою вбудованих сенсорних датчиків.

Широке застосування технологія прямого підведення енергії та матеріалу отримала в різних виробничих галузях. Це більше, ніж звичайний тривимірний друк. Її використовують для виконання різних виробничих

завдань, починаючи від покриття та ремонту компонентів і аж до комплексного виробництва заготовок та деталей. Найбільш широко вона застосовується у: авіаційній промисловості; аерокосмічній галузі; машинобудуванні; суднобудуванні; медицині; стоматології; енергетиці; нафтохімічній промисловості; будівництві будівель, споруд; виготовленні сувенірної продукції; рекламній промисловості та ін.

Застосовується лазерне наплавлення і при ремонті дорогих заготовок. Актуально це для виробів із спеціальних нікелевих сплавів. При їх ціні деталь вигідніше відремонтувати, ніж купувати нову. Завдяки високій точності робіт, мінімальному термічному навантаженню, відтворюваність буде багатого вищою, ніж у класичних методів заварювання.

Переваги прямого лазерного наплавлення (DED):

Оперативність виконання. Швидко створюються і тонкі, і досить об'ємні структури. Універсальність застосування. Тривимірні наплавлення різної конфігурації та рівня складності можна отримувати навіть на поверхнях складних форм, з перепадами висот. Нерідко цим методом виконують вирівнювання елементів, зміну їхньої геометрії. Великий вибір робочих матеріалів. Верстати можна оснастити кількома ємностями для порошків. Їх можна використовувати або у чистому вигляді, або на їх основі виготовляти суміші. Можна формувати багатошарові структури з різних матеріалів. Допускає роботу із заготовками великого розміру, тими, що не поміщаються у монтажну площину 3D-принтера. Простота заміни додаткових матеріалів. Міняти робочі матеріали можна вже в ході технологічного процесу, не вдаючись до складних маніпуляцій. Підходить виготовлення захисного покриття. Лазерним наплавленням на поверхню заготовки можна нанести шар особливого матеріалу, що забезпечує її захист від надмірного механічного та хімічного впливу, корозії, зносу. Нема деформації заготовки. Заготовка у процесі піддається мінімальному термічному впливу. Виключаються її деформації, підвищується якість. Мінімальні вимоги до фінішної обробки при з'єднанні великих зазорів. Лазерна наплавка формує товсті однорідні шви, що дозволяє з'єднувати заготовки з різних матеріалів. Поверхня часто не вимагає фінішної обробки.

Етапи 3D-друку за DED-технологією:

1. Підготовка матеріалу. Як вихідний матеріал для DED-друку використовуються металічні порошки або дріт. Матеріал подається через сопло, яке

знаходиться в безпосередній близькості від зони впливу енергії, забезпечуючи точну подачу та осадження.

2. Джерело енергії. Для розплавлення матеріалу застосовується концентроване джерело енергії. Найчастіше використовуються лазери, проте також можуть використовуватися електронні промені і плазмові дуги. Джерело енергії створює локалізовану зону плавлення, куди подається вихідний матеріал, забезпечуючи його ефективне розплавлення і осадження.

3. Осадження матеріалу. Під дією джерела енергії матеріал розплавляється і осаджується на підкладці або безпосередньо на деталі, що виготовляється. Процес контролюється системою управління, яка забезпечує точне переміщення сопла і рівномірний розподіл матеріалу. Це гарантує високу точність і якість деталей, що виготовляються.

4. Побудова шару за шаром. Процес осадження та плавлення матеріалу повторюється доти, доки не буде сформована вся деталь. Технологія DED дозволяє створювати складні геометричні форми, а також відновлювати пошкоджені частини існуючих деталей, що робить її незамінною в промисловості.

У прикладі 3D принтерів, що працюють за технологією DED можна навести наступні.



Рисунок 4.60 – 3D принтер Modulo 400

осадження 10Vx і лазер потужністю 500 Вт, розподільник порошку з 2 чашами по 1,5 л. Асортимент промислових насадок для осадження забезпечує

3D принтер для металу Modulo 400 (фірма BEAM – FIVES, Франція) – це обладнання DED (рис. 4.60). Завдяки повній інтеграції всіх необхідних периферійних пристроїв у корпус машини, вона легко поміщається в транспортний контейнер або традиційну вантажівку, що дозволяє транспортувати та експлуатувати її у віддалених місцях.

Стандартні технічні характеристики верстата: верстат з 5 безперервними осями Siemens 840D, головка

точно, змінне по ширині осадження з використанням високоякісних волоконних лазерних джерел потужністю від 500 до 4000 Вт.



Рисунок 4.61 – 3D принтер AZ600

Щоб розв'язати проблеми з порошковими принтерами, фірма Mitsubishi Electric (Китай) випустила AZ600, перший у світі (за даними дослідження Mitsubishi Electric на 24 лютого 2022 р) металевий 3D-принтер з дротяною подачею матеріалу і лазером, який поєднує в собі одночасне 5-осьове просторове управління і цифрову технологію (рис. 4.61). Цей продукт реалізує високоякісний, високоточний 3D-друк і робить внесок у виробництво, яке враховує свій вплив на навколишнє середовище за рахунок зниження споживання енергії та відходів.

4.12. LENS (Laser Engineered Net Shaping) – формування за допомогою лазерної інженерної мережі

Технологія лазерної обробки (LENS) була розроблена спільно Sandia National Laboratories та Pratt & Whitney, а потім компанією Optomec, Inc. в 1997 році (патент США 6046426, 2000).

Спосіб базується на подачі через сопло на підкладку порошку і одночасно його оплавлення променем лазера. Сопло з порошком може бути з одного боку з підкладкою або коаксіально з лазерним променем. Скріплення з попереднім шаром полегшується тим, що струмінь порошку оплавляється променем лазера, що підігріває одночасно і попередній шар.

Laser Engineered Net Shaping (LENS) використовує керовані комп'ютером лазери, які за кілька годин зварюють потоки металевих порошоків, що подаються повітрям, в індивідуальні деталі та виробничі форми. Ця технологія дозволяє отримувати форми, досить близькі до кінцевого продукту, щоб виключити необхідність грубої обробки. Однією із цілей LENS є виготовлення невеликих партій деталей або форм високої щільності.

Кожне сопло спрямовує струмінь металевго порошку в центральну точку під собою. Одночасно ця точка нагрівається потужним лазерним променем. Лазер і струмені залишаються нерухожими, тоді як модель і її підкладка переміщуються, щоб забезпечити нові цілі, на які безперервно наноситься метал. Спочатку це робиться на підкладці, а потім на нарощених шарах, поки не буде завершена бажана геометрія поперечного перерізу з виробництвом тривимірного металевго виробу. Це складна операція, оскільки високі температури ускладнюють формування точних, гладких об'єктів із розплавлених металів. Цю технологію можна використовувати з широким спектром металів, включаючи титан, сталь, мідь та алюміній.

Схематичне зображення LENS способу надано на рис. 4.62.

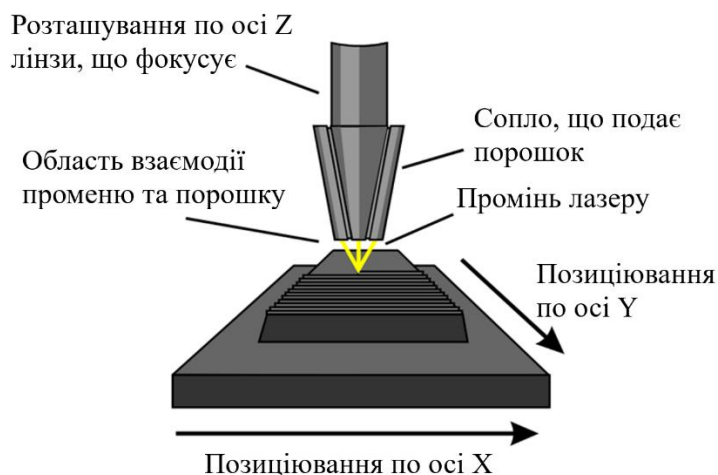


Рисунок 4.62 – Схематичне зображення LENS способу

На відміну від SLM, в якому використовується порошковий шар, компонент виготовляється з використанням технології LENS шляхом подачі порошку через сопло для впорскування та опромінення лазерним променем з високою щільністю енергії для розплавлення та осадження на монтажну пластину пошарово. Після осадження кожного шару монтажна платформа рухається вниз контрольованим чином. Хоча технологія LENS була в основному розроблена для виробництва складних геометричних компонентів, вона також ідеально підходить для ремонту та відновлення пошкоджених компонентів і структур. LENS-процес, який використовується для виробництва компонентів з металокераміки, що використовується для виготовлення різальних інструментів. У цьому процесі порошок матеріалу упорскується в розпалену ванну на поверхні твердої підкладки, створеної потужним лазерним променем.

Технологія LENS може використовуватися з різноманітними матеріалами, включаючи метали, сплави, кераміку та композити. До металів, які можуть використовуватися в LENS, належать хром, кобальт, гафній, індій, літій, марганець, молібден, ніобій, реній, стронцій, вольфрам, ванадій, цинк та цирконій. Серед сплавів, що зазвичай використовуються, можна назвати алюміній-літієві, берилієво-мідні, нержавіючі сталі (наприклад, 316, 17-4 PH), титанові сплави (наприклад, Ti-6Al-4V) та нікелеві сплави (наприклад, Inconel 625, Inconel 718, Nimonic 263). Кераміка, зокрема оксид алюмінію (Al_2O_3) та діоксид цирконію (ZrO_2), також може оброблятися методом LENS. Крім того, виготовляються композити з керамічним наповнювачем. Хоча основна увага приділяється цим типам матеріалів, деякі дослідження вивчають використання полімерів в адитивному виробництві з використанням лазерів, хоча і не в контексті традиційних систем LENS, розроблених для металів та кераміки. Універсальність LENS у роботі з різними класами матеріалів підкреслює її потенціал для створення функціонально градієнтних матеріалів та композитних структур за один процес. Здатність послідовно осаджувати різні порошки або змішувати їх в осаджуваній головці відкриває можливості для регулювання властивостей матеріалу в межах одного компонента. Нержавіючі сталі (наприклад, 316, 17-4 PH) використовуються завдяки їхній корозійній стійкості та міцності. Титанові сплави (наприклад, Ti-6Al-4V) застосовуються в аерокосмічній та біомедичній галузях через їхнє високе співвідношення міцності до ваги та біосумісність. Нікелеві сплави (наприклад, Inconel 625, Inconel 718, Nimonic 263) є критично важливими для високотемпературних застосувань в аерокосмічній та енергетичній галузях завдяки їхнім чудовим механічним властивостям та стійкості до тепла та корозії. Оксид алюмінію (Al_2O_3) зазвичай використовується для виготовлення керамічних деталей методом LENS. До порошкових матеріалів, придатних для використання в технології LENS, висуваються певні вимоги. Розмір частинок є критично важливим фактором. Optomec рекомендує діапазон розмірів частинок 40...150 мкм для ефективного формування методом LENS. Частинки розміром менше 50 мкм можуть мати погану плинність через сили Ван дер Ваальса. Збільшення розміру частинок зазвичай покращує плинність до певної межі. Сферичність також важлива для плинності. Сферичні та гладкі частинки, як правило, мають кращі характеристики плинності. Несферичні порошки, особливо з нерегулярною формою та гострими краями, можуть призвести до підвищеної пористості в кінцевому виробі. Плинність є вирішальною для стабільного подання порошку під час процесу

LENS. Погана плинність може призвести до нестабільного осадження та дефектів у виготовленій деталі. Фактори, що впливають на плинність, включають розмір частинок, форму, розподіл за розміром, поверхневі властивості, чистоту, кристалічність та міжчастинкові сили. Хімічний склад повинен бути точно контрольованим для досягнення бажаних властивостей матеріалу в кінцевому продукті. Домішки та зміни в складі можуть впливати на процес плавлення, мікроструктуру та механічні властивості. Вміст вологи в порошку слід мінімізувати, оскільки це може вплинути на плинність та призвести до пористості. Порошки часто слід просушувати перед використанням для видалення вологи. Насипна щільність порошку повинна бути високою (більше 50% від щільності твердого матеріалу) для забезпечення повністю щільних деталей. Розподіл частинок за розміром в ідеалі повинен відповідати кривій нормального розподілу, зазвичай в діапазоні 45...105 мкм для певних застосувань, таких як електронно-променеве плавлення (EBM), яке має схожість з LENS у процесах на основі порошку. Взаємодія між характеристиками порошку (розмір, форма, плинність) та хімічним складом є критично важливою для успішного виробництва методом LENS. Навіть, здавалося б, незначні зміни можуть призвести до значних відмінностей у якості та продуктивності кінцевої деталі. Процес лазерного плавлення дуже чутливий до того, як порошок поглинає енергію та надходить у розплавлену ванну.

Стабільний розмір та форма частинок забезпечують рівномірне поглинання енергії та плинність, тоді як точний хімічний склад гарантує досягнення запланованих властивостей матеріалу.

Основними параметрами процесу LENS є: потужність лазера, яка визначає кількість енергії, що доставляється лазером для плавлення порошку. Зазвичай використовуються потужні лазери (від 3 кВт до 4 кВт). Важливим фактором є також щільність потужності (потужність на одиницю площі). Швидкість сканування визначає швидкість переміщення лазерного променя по порошковій постілі або підкладці. Швидкість подачі порошку – це кількість порошку, що подається в розплавлену ванну за одиницю часу, яка точно регулюється системою подачі порошку. Діаметр лазерної плями – це розмір сфокусованого лазерного променя на поверхні матеріалу, який залежить від фокусувальної лінзи та може регулюватися шляхом розфокусування. Відстань між шарами визначає товщину кожного шару нанесеного матеріалу. Відстань між сканами (крок сканування) – це відстань між паралельними лініями лазерного сканування в межах одного шару. Швидкість потоку газу-носія –

це швидкість потоку інертного газу, що використовується для транспортування порошку до осаджувальної головки та захисту розплавленої ванни від атмосферного забруднення. Температура підкладки: попередній нагрів підкладки може впливати на термічну поведінку процесу. Робоча відстань – це відстань між лінзою та оброблюваною деталлю. Збільшення потужності лазера, як правило, збільшує тепловкладення, що призводить до більшої розплавленої ванни, кращого сплавлення та вищої щільності. Однак надмірна потужність може спричинити перегрів, випаровування та пористість. Недостатня потужність призводить до недостатнього сплавлення та пористості. Потужність лазера впливає на щільність енергії, яка є критично важливою для належного плавлення та з'єднання. Вищі швидкості сканування зменшують час взаємодії між лазером та порошком, що призводить до меншого тепловкладення і потенційно викликає недостатнє сплавлення та збільшення пористості. Нижчі швидкості сканування збільшують тепловкладення, що може призвести до більших розплавлених ванн, збільшення накопичення тепла та потенційно грубішої мікроструктури. Швидкість сканування впливає на щільність енергії та лінійну масову щільність (швидкість подачі порошку, поділена на швидкість сканування). Швидкість подачі порошку повинна бути збалансована з потужністю лазера та швидкістю сканування для забезпечення належного плавлення та запобігання дефектам. Занадто висока швидкість подачі може призвести до недостатнього плавлення та пористості, тоді як занадто низька може спричинити перегрів. Співвідношення швидкості подачі порошку до швидкості сканування (лінійна масова щільність) є важливим параметром. Менші розміри лазерної плями призводять до вищої щільності енергії, забезпечуючи точніші деталі та потенційно кращу точність. Однак вони також можуть призвести до меншої глибини фокусу. Більші розміри плями можуть збільшити швидкість побудови та стабільність процесу, особливо при вищій потужності лазера та товщині шару. Розмір плями впливає на форму розплавленої ванни та швидкість охолодження. Розфокусування лазерного променя може регулювати розмір плями та впливати на поведінку розплавленої ванни та властивості деталі. Збільшення товщини шару може покращити швидкість побудови, але також може збільшити пористість та зменшити роздільну здатність дрібних деталей. Тонші шари, як правило, призводять до вищої щільності та кращої якості поверхні, але можуть збільшити час побудови. Глибина розплавленої ванни повинна бути достатньою для з'єднання з попереднім шаром, що пов'язано з товщиною шару. Відстань між сканами впливає на перекриття між

лазерними сканами. Невідповідна відстань може призвести до утворення прогалин або надмірного накопичення матеріалу, що впливає на щільність та точність розмірів. Швидкість потоку газу-носія в першу чергу впливає на подачу порошку до розплавленої ванни та захист від атмосферного забруднення. Оптимальна швидкість потоку забезпечує стабільний та рівномірний потік порошку. Попередній нагрів підкладки може зменшити термічні градієнти під час побудови, потенційно знижуючи залишкові напруження та покращуючи з'єднання між шарами. Робоча відстань впливає на розмір лазерної плями та щільність енергії на поверхні побудови. Підтримка правильної робочої відстані є критично важливою для стабільного плавлення та осадження. Параметри процесу в LENS є взаємозалежними, і їх оптимізація вимагає комплексного підходу. Зміна одного параметра часто потребує коригування інших для підтримки бажаної якості деталі. Наприклад, збільшення потужності лазера може вимагати збільшення швидкості сканування або швидкості подачі порошку, щоб уникнути перегріву. Аналогічно, зміна товщини шару, ймовірно, вплине на оптимальну потужність лазера та швидкість сканування. Досягнення високоякісних деталей за допомогою LENS залежить від точного контролю та оптимізації цих параметрів процесу, що може бути складним і залежним від матеріалу. Емпіричні дослідження та потенційно методи машинного навчання є цінними для визначення оптимальних наборів параметрів для конкретних матеріалів та застосувань. Зв'язки між параметрами процесу та якістю отриманої деталі часто є нелінійними та залежать від властивостей матеріалу. Для встановлення технологічних карт для різних матеріалів необхідні систематичні експерименти та моделювання.

Технологія LENS має ряд значних переваг порівняно з традиційними методами обробки та іншими технологіями адитивного виробництва. Однією з ключових переваг є здатність виробляти деталі дуже складних форм, включаючи складні геометричні елементи та внутрішні порожнини, які неможливо або важко отримати за допомогою традиційної механічної обробки. Крім того, LENS має можливість ремонтувати та модифікувати існуючі компоненти, що є значною перевагою в таких галузях, як аерокосмічна, для відновлення дорогих деталей, наприклад, лопаток турбін. Технологія також дозволяє виготовляти деталі з різних матеріалів за один процес, що дає змогу створювати функціонально градієнтні матеріали та композити. Завдяки швидкому затвердінню та дрібній зернистій структурі, LENS забезпечує

виробництво матеріалів високої щільності з відмінними механічними властивостями. Порівняно з традиційним виробництвом, LENS має потенціал для швидкого прототипування та скорочення термінів виконання замовлень, що сприяє прискоренню розробки та перевірки продукції. Крім того, LENS забезпечує ефективніше використання сировини порівняно з методами субтрактивного виробництва, що призводить до зменшення відходів. За розмірами виробів, LENS, як правило, перевершує деякі інші технології адитивного виробництва, такі як SLM. Ще однією важливою перевагою є можливість виготовлення деталей на вимогу, що зменшує потребу у великих запасах запасних частин. Здатність LENS до ремонту відрізняє її від багатьох інших процесів адитивного виробництва, які в першу чергу орієнтовані на створення нових деталей. Це пропонує унікальну цінність для обслуговування високоцінних компонентів. Ремонт існуючих деталей за допомогою LENS може бути значно економічно вигіднішим та швидшим, ніж їх заміна, особливо для складних або виготовлених на замовлення компонентів. Незважаючи на численні переваги, технологія LENS має певні обмеження та недоліки. Вартість обладнання та порошкових матеріалів є відносно високою. Після виготовлення вироби часто потребують подальшої обробки, наприклад, для покращення якості поверхні та досягнення необхідної точності розмірів, оскільки шорсткість поверхні після побудови може бути значною. Існують також обмеження щодо максимальних розмірів виробів, хоча вони, як правило, більші, ніж у SLM. Контроль параметрів процесу для досягнення стабільних та високоякісних результатів є складним завданням, що вимагає кваліфікованих операторів та ретельної оптимізації. У виготовлених виробках може спостерігатися пористість та інші дефекти, якщо параметри процесу не були належним чином оптимізовані. Нерівномірний розподіл тепла під час процесу може призвести до варіацій механічних властивостей у межах однієї деталі. Технологія LENS зазвичай не підходить для великосерійного виробництва порівняно з традиційними методами, такими як лиття під тиском. Через пошаровий принцип побудови може спостерігатися анізотропія механічних властивостей. Компроміс між гнучкістю та складністю, які пропонує LENS, та необхідністю кваліфікованої експлуатації та подальшої обробки підкреслює важливість досвіду для ефективного використання цієї технології. Хоча LENS може створювати складні деталі, досягнення бажаної якості вимагає глибокого розуміння параметрів процесу та поведінки матеріалу, що часто потребує досвідченого персоналу та додаткових кроків після побудови. Обмеження у великосерійному виробництві свідчать про те, що

LENS найкраще підходить для застосувань, пов'язаних з індивідуалізацією, складними геометріями, ремонтом або невеликими обсягами виробництва, де переваги переважають вартість одиниці продукції. Для масового виробництва стандартизованих деталей традиційні методи виробництва часто залишаються економічно вигіднішими завдяки економії на масштабі.

Виробник металевих систем 3D-друку Optomec (США) запустив дві нові системи прямого осадження енергії (DED) у керованій атмосфері на основі технології серії LENS (Laser Engineered Net Shaping) DED LENS CS 600 і CS 800 (рис. 4.63) з контрольованою атмосферою. Побудовані на основі технології 3D-друку LENS, системи використовують високопотужні лазери для створення повністю щільних деталей із металу, кераміки чи композитних матеріалів, і їх можна використовувати для додавання металу до наявних деталей для ремонту чи нанесення покриттів. Стандартні системи LENS оснащені системою лінійного тривісного руху, яку можна оновити за допомогою змінного поворотного столу користувача. Нові машини CS 600 і 800 оснащені контролером Siemens 840D, який забезпечує плавний 3D-друк від трьох до одночасних п'яти осей.

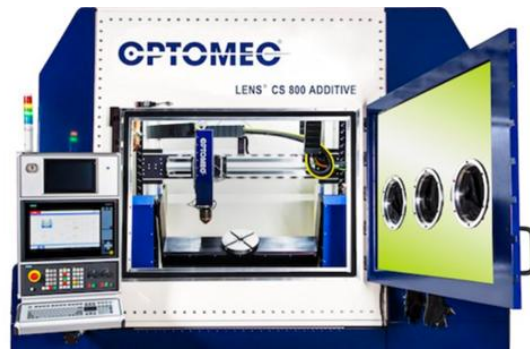


Рисунок 4.63 – 3D принтер LENS CS 800

Технологія LENS знаходить широке застосування в різних галузях промисловості. В аерокосмічній промисловості вона використовується для виготовлення та ремонту критично важливих компонентів для літаків та ракетних двигунів, таких як лопатки турбін, структурні елементи та спеціалізовані деталі двигунів. LENS також застосовується для виробництва легких деталей складної геометрії для безпілотних літальних апаратів та супутників. Ремонт зношених або пошкоджених аерокосмічних компонентів високої вартості за допомогою LENS дозволяє значно продовжити термін їхньої служби та зменшити витрати на заміну. Технологія сприяє розробці та випробуванню нових матеріалів та сплавів, спеціально розроблених для аерокосмічних застосувань з покращеними експлуатаційними характеристиками. Крім того, LENS забезпечує можливість виготовлення запасних частин на вимогу, що знижує витрати на зберігання та скорочує терміни виконання замовлень. Аерокосмічна промисловість значно виграє від використання LENS завдяки

високій вартості та складності своїх компонентів, де ремонт та виготовлення на вимогу пропонують суттєві переваги. Аерокосмічні деталі часто вимагають спеціалізованих матеріалів та складних конструкцій, що робить традиційне виробництво дорогим та тривалим. LENS надає гнучку та ефективну альтернативу як для виробництва, так і для технічного обслуговування. У медичній промисловості технологія LENS використовується для створення індивідуальних медичних імплантатів, розроблених з урахуванням анатомії конкретного пацієнта. Вона також застосовується для виготовлення спеціалізованих хірургічних інструментів зі складними функціональними елементами та для виробництва прототипів медичних пристроїв. Можливість створення імплантатів, розроблених для конкретного пацієнта за допомогою LENS, має величезний потенціал для персоналізованої медицини, покращуючи їхню відповідність, функціональність та результати лікування. Традиційні імплантати часто мають стандартні розміри, що вимагає компромісів у їхній відповідності. LENS дозволяє створювати імплантати, які ідеально відповідають унікальній анатомії пацієнта, що потенційно призводить до кращої інтеграції та зменшення ускладнень. В автомобільній промисловості технологія LENS знаходить застосування в прототипуванні автомобільних компонентів та виготовленні спеціалізованих або малосерійних деталей. Вона також використовується для виготовлення інструментальної оснастки для виробництва автомобільних деталей. Хоча оптичні лінзи для автомобільних застосувань, такі як фари та ліхтарі, зазвичай виготовляються іншими методами, наприклад, литтям під тиском, LENS може бути використана для швидкого прототипування цих оптичних компонентів. Хоча LENS не є основним методом для масового виробництва в автомобільній промисловості, вона може бути цінною для швидкого прототипування та створення спеціалізованих деталей зі складними конструкціями, які було б важко або дорого виготовити традиційними методами. Автомобільна промисловість значною мірою залежить від прототипування для розробки нових транспортних засобів, і LENS може прискорити цей процес, дозволяючи швидко ітерувати та тестувати складні конструкції компонентів. В енергетичній галузі технологія LENS може використовуватися для виготовлення та ремонту компонентів газових турбін, обладнання для виробництва електроенергії та, можливо, для нових технологій, таких як виробництво водню (хоча це прямо не згадується в наданих фрагментах для LENS). Оптичні лінзи також є критично важливими для різних енергетичних технологій, таких як сонячні концентратори та інспекція акумуляторів. В інструментальному виробництві LENS

застосовується для виготовлення спеціалізованої оснастки, включаючи прес-форми для лиття під тиском та штампи, зі складними елементами та каналами охолодження. У загальному машинобудуванні LENS використовується для створення індивідуальних деталей, функціональних прототипів та малосерійного виробництва в різних секторах. Застосування LENS в інструментальному виробництві є значним, оскільки дозволяє створювати складні конструкції прес-форм з інтегрованими елементами, такими як канали охолодження, що потенційно покращує ефективність та якість масово вироблених деталей з інших матеріалів. Традиційне виготовлення прес-форм може бути тривалим та дорогим, особливо для складних конструкцій, тоді як LENS пропонує більш прямий спосіб створення цієї оснастки.

4.13. DMD (Direct Metal Deposition) – пряме нанесення металу

Інтегрована технологія Direct Metal Deposition (пряме нанесення металів) дозволяє виготовляти, ремонтувати та переробляти промислове оснащення, наносити зміцнюючі покриття та будувати дослідні зразки виробів із стандартних промислових металів. Технологія DMD дозволяє виготовляти металеві деталі із 100% щільністю. DMD поєднує п'ять загальновідомих технологій: лазери, CAD, CAM, сенсори і порошкову металургію (рис. 4.64).

У ході процесу DMD промінь лазера фокусується на металевій заготівлі, тривимірній металевій прес-формі (деталі, що приблизно відтворює форму об'єкта) або пошкодженій металевій деталі, створюючи зону розплавленого металу. Тонкий струмінь металевого порошку впорскується в зону розплаву, збільшуючи його об'єм. Ціліснометалева деталь будується пошарово в

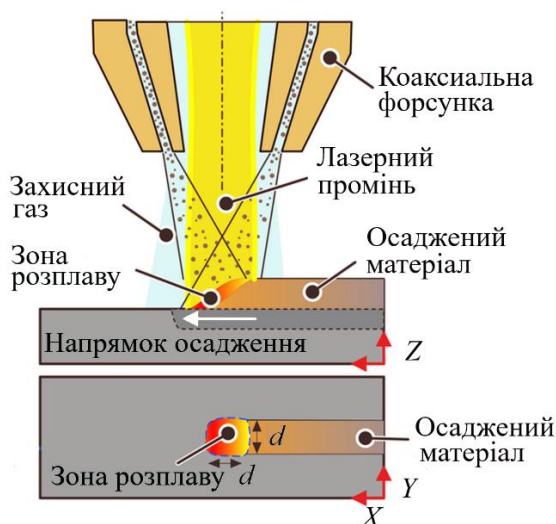


Рисунок 4.64 – Схема методу DMD

результаті переміщення променя лазера та струменя порошку під керуванням комп'ютера, відповідно до даних CAD файлу. Технологія DMD поєднує

в собі особливості лазерної стереолітографії (SLA) і вибіркового лазерного спікання (SLS). DMD створює деталі таких металів і сплавів, як інструментальні сталі, титан, алюміній, мідь, нержавіюча сталь, іридій та інконель, а також з металокерамічних композитів. За своїми характеристиками (межа плинності, подовження, ударна в'язкість, питома міцність) DMD метали відповідають або навіть перевершують характеристики «звичайних» металів. Процес DMD дозволяє швидко змінювати склад металу шляхом інжекції у розплав різних типів металевих порошків. Це дає можливість створювати гібридні металеві композити. Деякі особливості DMD особливо незамінні при виготовленні промислових форм з інструментальної сталі. Що особливо важливо, ця технологія створює повністю насичені форми або формотворні 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).

4.14. 3DW (Three Dimensional Welding) – тривимірна наплавка (зварювання)

3D-зварювання – це форма адитивного виробництва, де матеріал додається шар за шаром для створення тривимірного об'єкта. Процес виготовлення виробу за технологією 3DW надано на рис. 4.65.

За допомогою дугового зварювання пошарово наплавляється метал у вигляді простих форм, з яких потім складаються складніші структури. Використовується дві керуючі системи: CNC для зварювального робота та файли STL CAD для пошарової побудови. Установка оснащена системами термоконтролю, інтерактивного охолодження середовища, видалення парів та механічних частинок. Тривимірне зварювання (3D-зварювання) стосується процесів зварювання, що використовуються для

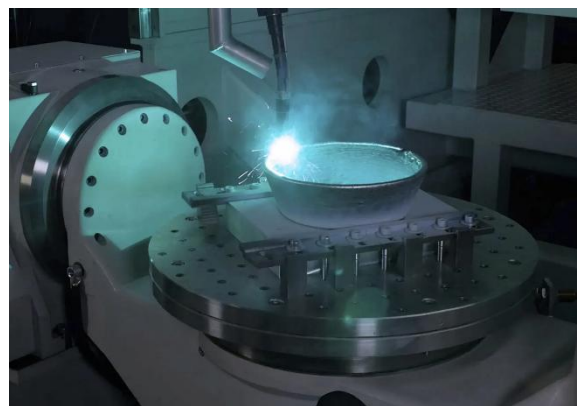


Рисунок 4.65 – Процес виготовлення виробу

створення металевих деталей шляхом їх пошарового нарощування, ефективно створюючи тривимірні форми з 3D-моделі. Ця техніка адитивного виробництва може бути використана для створення складних геометрій, яких важко або неможливо досягти за допомогою традиційного зварювання або механічної обробки. Використання зварювальних технологій для отримання об'ємних металевих виробів дозволяє суттєво знизити собівартість їх виготовлення за одночасного підвищення продуктивності порівняно з SLS- та SLM-процесами. Найбільш перспективною зварювальною технологією адитивного виробництва об'ємних виробів є плазмово-дугова технологія із застосуванням дротів чи порошків. Вона дозволяє при порівняно малих теплотах отримувати якісні об'ємні вироби з товщиною стінки від 3 до 50 мм із сплавів на основі Fe, Ni, Co, Cu, Ti, Al, а також композиційних матеріалів, що містять тугоплавкі компоненти.

Представником 3D принтерів для тривимірного зварювання може слугувати GTarc60-5 (рис. 4.66).

3D принтер Gefertec GTarc60-5 працює за унікальною технологією за допомогою нарощування металу дуговим зварюванням, що дозволяє створювати одночасно точні та міцні вироби. Принтер виготовлений із високоточних та міцних деталей, що забезпечує високу надійність даної установки. 3D принтер Gefertec GTarc60-5 завдяки своєму функціональному оснащенню та робочій камері дозволяє побудувати вироби розміром до 0,06 м³ і масою до 200 кг. 3D принтер Gefertec GTarc60-5 дозволяє друкувати вироби зі складною геометрією. Таке оснащення значно полегшує роботу оператора, що відповідно позначається на швидкості побудови та якості продукції, що виробляється. Побудова проводиться по всіх трьох осях. Принтер поєднує технічно налагоджені і перевірені методи дугового зварювання використовуючи систему автоматизованого проектування CAD. Побудова по всіх осях забезпечує максимальну гнучкість щодо обсягу об'єкта та створює необхідні умови для високоякісного адитивного виробництва металевих моделей. У принтер інтегрована система фрезерної установки Gtarc, яка дозволяє негайну та необхідну обробку продукту побудови. GTarc60-5 оснащений інтуїтивно простим блоком



Рисунок 4.66 – 3D принтер GTarc60-5

керування SIEMENS, розробленим спеціально для верстатів. Таке оснащення значно полегшує роботу оператора, що відповідно позначається на швидкості побудови та якості продукції, що виробляється. Доступ до робочої області машини здійснюється через рулонні двері, робочий стіл – висувається з камери побудови, для полегшення навантаження чи завантаження деталей з допомогою крана.

4.15. WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – дротяно-дугове адитивне виробництво

WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – це технологія адитивного виробництва, яка використовує дугову зварку для створення металевих деталей пошарово, на основі 3D-моделі. Це як 3D-друк, але замість пластику використовується металева проволока, а замість екструдера – зварювальний пальник. Фото процесу WAAM зображено на рис. 4.67.

Тривимірний об'єкт створюється за допомогою промислового зварювального робота шляхом нанесення послідовних шарів зварювального дроту за даними цифрової моделі. В Україні з 2016 року за цим методом працює компанія «Тріада-Велдінг». У 2019 році компанія «Тріада-Велдінг» отримала грант Програми USAID «Конкурентоспроможна економіка України» (КЕУ). Протягом тривалого часу, у рамках грантової діяльності/грантового проекту: «Розробка нових цифрових технологій виробництва», проводила дослідження та вирощувала зразки методом пошарового зростання металу методом WAAM. Лабораторні дослідження підтвердили відмінні результати роботи (матеріали: нержавіюча сталь, жароміцна нержавіюча сталь, сталь Inconel 718, Al та алюмінієві сплави та ін.). Для моделювання використовуються спеціальні програмні продукти, які дозволяють створити весь процес майбутнього роботизованого друку деталі, візуалізувати, контролювати та аналізувати всі процеси під час друку на кожному етапі.



Рисунок 4.67 – Процес WAAM

У якості роботів використовуються, наприклад, роботи-маніпулятори фірми YASKAWA, яка поставляє замовникам продуктивні та надійні перетворювачі частоти, серводвигуни, мехатроніку та високотехнологічну робототехніку.

Автором самого терміна «мехатроніка» є Тецуро Морі, старший інженер YASKAWA Electric, який запропонував ще в 1969 році об'єднати два поняття: «меха-», від слова механіка, і «-троніка», від слова електроніка. Спочатку цей термін став торговою маркою, зареєстрованою в 1972 році, але після поширення поняття мехатроніки компанія YASKAWA Electric відмовилася використовувати такий товарний знак.

Процес починається із створення 3D-моделі деталі у CAD-програмі.

Металевий дріт подається до зони зварювання, де електрична дуга розплавляє її. Розплавлений метал осаджується на підкладку, потім шар за шаром формується бажана форма деталі. Процес контролюється роботизованою системою, що забезпечує точність та повторюваність.

Переваги WAAM: WAAM дозволяє створювати великі металеві деталі, що робить його корисним для виробництва компонентів таких галузей, як суднобудування, аерокосмічна та енергетична; WAAM мінімізує кількість відходів, оскільки матеріал наноситься лише там, де це потрібно; WAAM дозволяє створювати складні геометричні форми, які важко чи неможливо виготовити традиційними методами; багато металів і сплавів, придатних для зварювання, можуть використовуватися в WAAM; WAAM може бути швидше ніж деякі інші адитивні процеси, особливо для великих деталей.

Недоліки: WAAM може зажадати фінішної механічної обробки досягнення ідеальної чистоти поверхні; великі деталі, створені за допомогою WAAM, можуть вимагати підтримки під час друку, щоб уникнути деформації.

Області застосування: суднобудування – виробництво гребних гвинтів, деталей корпусу та інших компонентів; аерокосмічна промисловість – виготовлення деталей для літаків та космічних апаратів; енергетика – виробництво компонентів для електростанцій та обладнання; автомобілебудування – створення деталей двигунів, вихлопних систем та інших компонентів; будівництво – створення металевих конструкцій та елементів.

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

BPM був винайдений Біллом Мастерсом і був запатентований у 1987 році. Мастерс заснував Perceptions Systems Inc. а у 1992 році їхню назву було змінено на BPM Technology Inc. Білл Мастерс вперше описав BPM як пиж (снаряд, що складається з невеликих шматочків матеріалу). «Коли ви стріляєте великою кількістю пижів, вони починають набувати форми, і якщо ви можете контролювати напрямок пижів і рух пристрою, який їх стріляє, ви можете створити будь-яку бажану форму». Схема процесу BPM зображена на рис. 4.68.

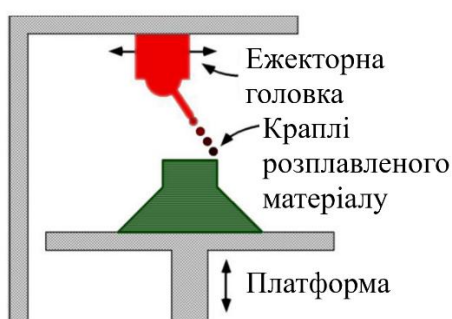


Рисунок 4.68 – Схема процесу BPM

BPM базується на принципі чорнильного друкувального пристрою. Формування шаровим нарощуванням здійснюється за рахунок того, що окремі маленькі крапельки термопластичного матеріалу, вилітаючи з «друкуючої» головки, застигають у необхідному місці спочатку на підтримуючій платформі, а потім – попереднього шару. Установки різних фірм відрізняються кількістю застосовуваних «друкуючих» головок – від 2-х до 5-ти. В останньому випадку відпадає необхідність використання конструкцій, що підтримують. Система виробництва балістичних частинок використовує п'єзоелектричний струменевий механізм для розпилення крапель розплавлених матеріалів, які холодним способом зварюються разом на попередньо нанесеному шарі. Шар створюється шляхом переміщення сопел крапель у напрямках X та Y. Після формування шару базова пластина опускається на задану відстань, і новий шар створюється поверх попереднього. Для забезпечення безперервного потоку матеріалів, що виходять з сопла, розроблено набір п'єзоелектричних елементів, які на основі тиску збуджують датчики сопла та забезпечують потік матеріалів. Матеріали можна наносити у вигляді крапель. Коли осаджуваний матеріал стикається з холодною підкладкою, напівтверда форма швидко переходить у тверду, і матеріал певною мірою зварюється з попередніми шарами. З іншого боку, електричне поле використовується для спрямування крапель або потоку матеріалів у потрібні місця та формування необхідного дизайну та геометрії. Нагадує процес повторного

семплювання чорнила, але з тією різницею, що це 3D-процес, який контролюється комп'ютерним процесором. ВРМ може проводитися в захищеній атмосфері, що забезпечує високу геометричну точність та якість поверхні без необхідності подальшої обробки виготовлених деталей. Переваги: потребує мінімальної постобробки; низька токсичність; мінімальне енергоспоживання; низька вартість матеріалів та витрат; ВРМ не має обмежень за розміром; процес дозволяє використовувати будь-які термопластики; завдяки цьому немає жодної небезпеки для здоров'я.

4.17. PJM/MJM (Poli/Multi Jet Modeling) – однострумене/багатострумене відтворення

У Poly Jet або Multi Jet Modeling (PJM/MJM) рідкі акрилові полімери наносяться шарами на будівельну платформу за допомогою друкуючої головки з одним або декількома соплами і затвердіють під впливом УФ-ламп. Друкувальна головка переміщається по платформі траєкторіями, заздалегідь заданими моделлю, поки шар не буде повністю надрукований. УФ-лампи розташовані безпосередньо на голівці, що друкує, і затвердіють пластик відразу після його нанесення. Інтенсивність УФ-випромінювання регулюють таким чином, щоб верхній шар не затвердів повністю, завдяки чому досягається стабільне з'єднання між накладеними шарами. Після того, як останній рівень надрукований, УФ-лампи проходять через весь компонент кілька разів, щоб завершити затвердіння. Схема технології MJM надана на рис. 4.69.

Метод адитивного виробництва або метод 3D-друку, відомий як Multi Jet Modeling (MJM), використовує шари фотополімеру, розташовані один над одним і зроблені твердими за допомогою УФ-світла. Цей метод та-

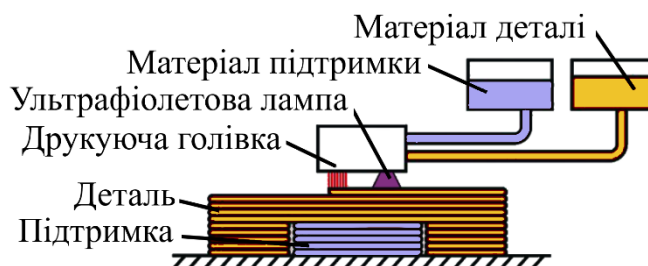


Рисунок 4.69 – Схема процесу MJM

кож відомий як метод струменевого або поліструменевого друку. У 2000 році компанія Objet-Geometries розробила перший 3D-принтер, який розпорошував краплі фотополімеру і робив їх твердими за допомогою УФ-світла. Вони

розробили технологію, яку назвали Poly Jet, та отримали безліч патентів. Саме тому процес має кілька назв.

Перевага Multi Jet Modeling полягає в тому, що, в залежності від обладнання, що використовується, в соплі можна змішувати різні матеріали, щоб можна було отримати абсолютно різні колірні відтінки або ступеня твердості для компонентів, які можна фарбувати, різати або шліфувати в процесі обробки.

За цим способом модель будується з використанням техніки, подібної до струменевого друку на звичайному принтері, але в трьох вимірах. Робочий орган – «друкарська головка». Включає 352 сопла, можливо до 1536, що утворюють лінійну решітку: струмінь з кожного сопла видає спеціально розроблений термополімерний матеріал там, де він необхідний за керуючою програмою. 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.

Моделі MJM мають високу точність та високий рівень деталізації з тонкою структурою. На моделях немає залишків полімеру, і необхідно видалити тільки матеріал, що підтримує. Завдяки точним формам, які можуть бути створені, дизайнери можуть обґрунтовано перевіряти свої розробки та виявляти потенційні помилки чи слабкі місця на ранній стадії. Це означає значне підвищення ефективності процесу розробки продукту та скорочення часу виходу на ринок. Ще одне популярне застосування, в якому економія часу також відіграє вирішальну роль, це ефективне виготовлення майстер-моделей для геометрично точного лиття.

Використовується широкий спектр матеріалів у цій категорії. Змішуючи різні смоли, можна робити різноманітні композитні матеріали з різними характеристиками та перевагами. Ці матеріали також добре підходять для постобробки. Через високу розмірну стабільність та довговічність матеріалу вироблених компонентів 3D-друк з використанням процесів Poly Jet або Multi Jet вважається високотехнологічним рішенням в області адитивних виробничих процесів. Крім того, метод відрізняється великою різноманітністю матеріалів, які можна ефективно інтегрувати в один об'єкт. Multi Jet-моделювання дозволяє одночасно обробляти різні матеріали за один друк.

Ці переваги окупаються у багатьох відношеннях. Наприклад, взаємодія кольорових та прозорих матеріалів дозволяє особливо наочно уявити внутрішню структуру компонентів. Також можна комбінувати матеріали з різними характеристиками, наприклад, деталі із твердого пластику можна комбінувати з м'яким гумовим покриттям. Нарешті, існує можливість створення нових композиційних матеріалів з гібридними властивостями шляхом з'єднання особливим чином речовин з різними фізичними властивостями. Бажаний ступінь твердості або фарбування може бути точно визначений за допомогою відповідної пропорції змішування.

Результатом процесу Poly Jet або Multi Jet є функціональні компоненти, які вражають своїм високим рівнем роздільної здатності деталей та якістю поверхні. Складні геометричні форми з малою товщиною стінок та точністю контуру можуть бути виготовлені із широкого спектру матеріалів. Створені об'єкти ідеально підходять як концептуальні моделі, оскільки особливо реалістично передають естетику та функціональність кінцевого продукту. Вони набирають популярність у багатьох секторах, включаючи електротехніку, автомобілебудування, медичні технології, архітектуру та сектор споживчих товарів, де використовуються філігранні моделі, наприклад, у дизайні ювелірних виробів чи розробці іграшок. Ще одна популярна сфера застосування, де вирішальну роль також відіграє економія часу, – це ефективне виготовлення майстер-моделей для геометрично точного лиття. Завдяки гладкій структурі поверхні та високій розмірній стабільності форми, виготовлені в процесі Poly Jet або Multi Jet, відразу ж готові до використання в наступних процесах, таких як вакуумне лиття.

Принтери, засновані на цій технології, випускаються компанією 3D Systems. У зв'язку з патентними обмеженнями є й назви, які використовуються іншими виробниками принтерів: PolyJet (Photopolymer Jetting, компанія Stratasys), DODBet (Drop-On-Demand Jet, компанія Solidscape). Прикладом принтера, що працює за технологією MJM може слугувати компактний принтер Solidscape 3Z max (рис. 4.70).

При власних розмірах 558×495×419 мм і вагою 34 кг дозволяє створювати



Рисунок 4.70 – Принтер Solidscape 3Z max

моделі розмірами до 152×152×101 мм, забезпечуючи роздільну здатність 5000×5000 dpi (197×197 точок/мм) по осях X, Y і 8000 dpi (158 точок/мм) по осі Z.

У цих принтерах використовується віск двох типів: більш тугоплавкий (95...115°C для власно моделей і легкоплавкий (50...72 °C) для підтримувальних структур, які потім видаляються при низьких температурах за допомогою спеціального розчину.

4.18. LLM (Layer Laminate Manufacturing) – спосіб моделювання нашаруванням

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 лише контурувати (а не створювати), технології за способом LLM є більш продуктивними. Опори не потрібні. Строго кажучи, технології LLM комбінують вирізування шарів та нарощування виробу за їх допомогою.

Використовувані матеріали – папір, синтетичні матеріали, метали, кераміка, дерево. Метали зварюються, кераміка спікається, решта склеюється. LLM вироби дуже міцні, тому підходять для лиття в піщані форми, для точного лиття, вакуумного лиття, для піщаних спечених стрижнів, високотемпературного формоутворення. До цієї 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. LOM заснований на використанні ламінування: лазерний промінь вирізує контури перерізу листового матеріалу для кожної січної площини шаруватої 3D CAD моделі. Площа перерізу не сканується. Конструктивні елементи послідовно вирізаються з окремих листів клейкого папіру, фольги, пластику, металу, кераміки, композитів завтовшки 50...500 мкм. Новий шар з'єднується з попереднім за рахунок прокатки термоваликом.

Методика LOM була розроблена в середині 80-х років XX століття Міхаїлом Фейгенмом. Патент на її використання отримано компанією Helisys Inc. 1998-го. Проте вже 2000 року підприємство припинило існування і його наступником у галузі стала компанія Cubic Technologies.

За LOM технологією шари ламінованого паперу, пластику або металу з клейовим покриттям послідовно склеюються і розрізаються ножом або лазерним різак. Об'єкти, надруковані за допомогою цієї технології, можуть бути модифіковані додатково шляхом механічної обробки або свердління після друку. Типова роздільна здатність шару для цього процесу визначається вихідним матеріалом і зазвичай становить від одного до декількох аркушів копіювального паперу.

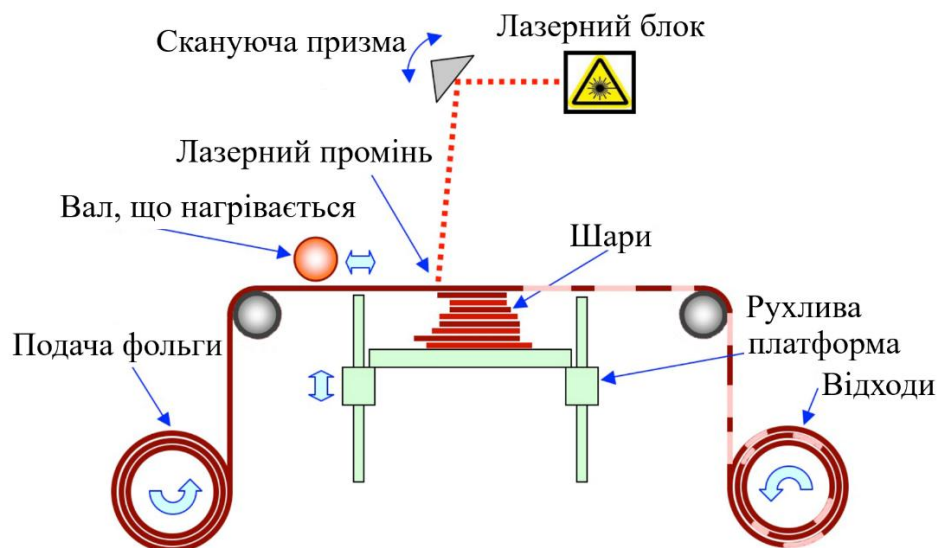


Рисунок 4.71 – Схема процесу LOM

Процес виконується так (рис. 4.71): лист приклеюється до підкладки за допомогою нагрітого валика; лазер відстежує бажані розміри прототипу; лазер наносить штрихування на недеталізовані області для полегшення видалення відходів; платформа з готовим шаром від'їжджає донизу, звільняючи місце для проходу; новий аркуш матеріалу розкочується та укладається на місце; платформа опускається у нове положення прийому наступного шару; процес повторюється до того часу, доки буде готова повна модель чи прототип.

Вихідні дані розраховуються для кожного шару (аркуша фольги) в 3D форматі CAD даних про конструкцію і передаються в систему управління LOM установки, де і створюються за допомогою спеціального програмного

забезпечення поперечні перерізи деталі. Области зайвого матеріалу розрізаються на квадрати в єдиних координатах кожного зрізу для подальшого видалення. При вирізанні контуру та розрізання зайвих областей фольги лазер проникає тільки на певну заздалегідь розраховану глибину. Внаслідок нарощування вирізанних лазером перерізів з листового матеріалу формується точна тривимірна модель. Поверхні зрізів допрацьовуються (шліфуються, поліруються, фарбуються, покриваються лаком).

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

Компанія Mcor Technologies використовує варіант технології LOM, який отримав назву «Вибіркове ламінування» або SDL. Цей метод передбачає нанесення клею тільки в місцях, що входять до складу розрахункової моделі, що полегшує процес видалення зайвого матеріалу (рис. 4.72). На відміну від стандартної технології на основі лазерного різання, SDL використовує механічне різання за допомогою леза з карбїду вольфраму. Це дозволяє дещо знизити вартість пристроїв.



Рисунок 4. 72 – 3D принтер Mcor Matrix Plus

Переваги способу: лазерний промінь вирізує тільки контури перерізу, тобто розкроює листи і не впливає на матеріал усередині перерізу, тим самим зберігаючи його вихідні властивості, виключаючи фізико-хімічні перетворення, значне усадження та деформації матеріалу; можливість вибору нетоксичних та дешевих матеріалів; немає необхідності в технологічних підпорах; установки відносно дешеві, легко керовані, малогабаритні, швидко освоюються персоналом. До недоліків можна віднести наступне: спосіб має обмеження за складністю конструкції виробу, оскільки для складнопрофільних моделей утруднено, а часом неможливо видалення зайвого матеріалу. З цим пов'язані й більші можливі втрати матеріалу. При видаленні відходів можливе пошкодження моделі. Є небезпека розшарування моделі при допрацюванні поверхні для зниження шорсткості.

Питання для самоперевірки

1. Що таке адитивне виробництво?
2. Перелічіть основні методи адитивних технологій.
3. Поясніть принцип методу селективного лазерного плавлення (SLM)
4. Поясніть принцип методу пошарового наплавлення матеріалу (FDM)
5. Які витратні матеріали застосовуються у методі адитивної технології FDM?
6. Поясніть принцип методу прямої екструзії гранул полімеру (FGF).
7. Яка різниця у методі FDM/FFF і методі FGF.
8. Які витратні матеріали застосовуються у методі адитивної технології FGF?
9. Поясніть принцип методу лазерної стереолітографії (SLA).
10. Поясніть алгоритм роботи керуючої програми обробки у методі лазерної стереолітографії (SLA).
11. Який алгоритм процесу лазерної стереолітографії?
12. Які витратні матеріали застосовуються у методі лазерної стереолітографії (SLA)?
13. Поясніть принцип методу DLP/LCD-стереолітографії.
14. Які витратні матеріали застосовуються у методі DLP/LCD-стереолітографії ?
15. Поясніть принцип методу селективного лазерного спікання (SLS).
16. Які витратні матеріали застосовуються у методі SLS?
17. Яка послідовність виконання задач технологічної підготовки до матеріалізації виробу адитивними методами?
18. Поясніть принцип методу багатоструменевого 3D-друку (MJP).
19. Які витратні матеріали застосовуються у методі MJP?

20. Поясніть принцип методу струменевого друку сполучною речовиною (Binder Jetting).
21. Які витратні матеріали застосовуються у методі BJ?
22. Поясніть принцип методу повнокольорового 3D-друку (CJP).
23. Які витратні матеріали застосовуються у методі CJP?
24. Поясніть принцип методу прямої лазерної наплавки (DED).
25. Поясніть принцип методу формування за допомогою лазерної інженерної мережі (LENS).
26. Поясніть принцип методу прямого нанесення металу (DMD).
27. Поясніть принцип методу тривимірної наплавки (3DW).
28. Поясніть принцип методу дротяно-дугового адитивного виробництва WAAM.
29. Поясніть принцип методу виготовлення з використанням балістики частинок BPM.
30. Поясніть принцип методу одноструменевого/багатоструменевого відтворення RJM/MJM.
31. Поясніть принцип способу моделювання нашаруванням LLM.
32. Поясніть схему процесу LOM.

Література

1. ANSI/ASME B89.4.1-1997. Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring Machines. New York: ASME, 1997.
2. Яковенко І.Е., Пермяков О.А., Музичка Д.Г., Горбулик В.І. Перспективи розвитку реверсивного інжинірингу в машинобудівній галузі // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. № 1(11), 2025. – С. 108–115. – ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2025.1(11).24.
3. ISO 10360. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Geneva: ISO, 2000–2022.
4. JIS B 7440. Testing of Coordinate Measuring Machines. Tokyo: Japanese Standards Association, 2003.
5. National Physical Laboratory (NPL), UK [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.npl.co.uk>.
6. Renishaw Metrology – Official Website [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.renishaw.com>.
7. ZEISS Metrology – Official Website [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.zeiss.com/metrology>.
8. Hexagon Manufacturing Intelligence – Official Website [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hexagonmi.com>.
9. Mitutoyo Corporation – Official Website [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mitutoyo.com>.
10. FARO Technologies – Official Website [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.faro.com>.
11. Flack D. Coordinate Measuring Machines and Systems. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 312 p.

12. Hocken R.J., Pereira P.H. Coordinate Measuring Machines and Systems. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 448 p.
13. Bosch J.A. Coordinate Measuring Machines and Systems. – New York: Marcel Dekker, 1995. – 422 p.
14. Leach R.K. Fundamental Principles of Engineering Nanometrology. – Amsterdam: Elsevier, 2010. – 324 p.
15. Yoshizawa T. (Ed.). Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications. – Boca Raton: CRC Press, 2015. – 580 p.
16. Грищук В.Й., Грищук Ю.В. Координатно-вимірвальні машини. Теорія та практика. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 364 с.
17. Мельник М.М. Методи контролю точності в машинобудуванні. – Київ: Наукова думка, 2010. – 286 с.
18. Збірник наукових праць НТУУ "КПІ". Серія: Приладобудування, автоматизація та інформаційно-вимірвальні технології. – 2015–2023 pp.
19. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Метрологія та вимірвальна техніка. – Вип. 2016–2022.
20. ДСТУ ISO 10360-2:2005. Геометричні специфікації виробів (GPS). Приймальні та перевірочні випробування для координатно-вимірвальних машин (КВМ). – [Чинний від 2005-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2005.
21. Кобрынский А.Е, Левковский Е. И.//Автоматизация измерений при применении координатных измерительных машин. Станки и инструмент.1979, №1.
22. Серков Н. А. Измерение пространственно-сложных поверхностей на координатных измерительных машинах//Станки и инструмент 1982 №11.
23. Теоретичні основи структурно-параметричного геометричного моделювання виробів машинобудування В. В. Ванін, Г. А. Вірченко, П. М. Яблонський; КПІ ім. Ігоря Сікорського Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 223 с.
24. ISO/ASTM. 52900: 2017 Additive Manufacturing — General Principles — Terminology. American Society for Testing and Materials (ASTM

- International): West Conshohocken, PA, USA. 2017. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>. (дата звернення: 15.02.2018).
25. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer Verlag, New York, 2010. 473 p.
 26. Jiménez M., Romero L., Domínguez I.A., Espinosa M. del M. and Domínguez M. Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. Complexity in Manufacturing Processes and Systems 2019. HindawiArticle ID 9656938, 2019. 30 p.
 27. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer Science, 2015. 510 p.
 28. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок [и др.]; под ред. А.И. Грабченко. Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. 416 с.
 29. Rosen D.W. What are Principles for Design for Additive Manufacturing? 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2014). 26-28 May 2014, Singapore. doi: 10.3850/978-981-09-0446-3_027.
 30. Wohlers Report 2016. 3D Printing and additive manufacturing state of the industry. Annual worldwide progress report. 2016. URL: <https://wohlersassociates.com>.
 31. Wohlers report 2014: 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Annual worldwide progress report. Fort Collins, CO: Wohlers Associates. 2014. URL: <https://wohlersassociates.com>.
 32. Технические характеристики BigRep ONE. Сайт компании BIGREP. 2017. URL: <https://bigrep.com/ru/bigrep-one/технические-характеристики>.
 33. Чернышов С.И. Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий на основе статистического прогнозирования: дис... канд. техн. наук: 05.02.08. Харьков, 2006. 327 с.
 34. Грабченко А.И., Доброскок В.Л. Сучасні технології матеріалізації комп'ютерних моделей: Навч. посібник. Х.: НТУ "ХПИ", 2009. 86 с.
 35. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Чернышов С.И., Гаращенко Я.Н. Систематика интегрированных генеративных технологий формообразования. Сучасні технології у машинобудуванні: Збірник наукових статей. Том 1. Харків: НТУ "ХПИ", 2006. С. 312-342.

36. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления / Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И., Вerezуб Н.В., Витязев Ю.Б., Кнут Х., Лиерат Ф. Под. ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко. Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2002. 140 с.
37. Bourell D., Kruth J.P., Leu M., Levy G., Rosen D., Beese A.M., Clare A. Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 2017. pp. 659–681.
38. Khorasani A., Gibson I., Veetil J.K., Ghasemi A.H. A review of technological improvements in laser-based powder bed fusion of metal printers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 108(4), 2020. pp. 191-209.
39. Gao W. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering / W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C.C.L. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, P.D. Zavattieri. *Computer-Aided Design*, December 2015, Vol. 69. P. 65-89.
40. Ranjan R., Samant R., Anand S. Design for manufacturability in additive manufacturing using a graph based approach. In: *ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2015. pp. 1-10. doi: 10.1115/MSEC2015-9448.
41. Yang S., Zhao Y.F. Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(1-4), 2015. pp. 327-342.
42. Boyle I., Rong Y., Brown D.C. A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(1), 2011. pp. 1–12.
43. Doubrovski Z. Optimal design for additive manufacturing: Opportunities and challenges. *ASME 2011*, pp. 1-12.
44. Barnawal P. Design and evaluation of feedback system in design for manufacturability. *Graduate Theses and Dissertations*, 14789. 2015. 90 p. URL: <http://lib.dr.iastate.edu/etd/14789>.
45. Ponche R., Kerbrat O., Mognol P., Hascoet J.-Y. A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 30, 2014. pp. 389-398.
46. Rosen D.W. Research supporting principles for design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 9 (4), 2014. pp. 225-232.
47. Kuo T.C., Huang S.H., Zhang H.C. Design for manufacture and design for

- 'X': concepts, applications, and perspectives. *Computers and Industrial Engineering*, 41 (3), 2001. pp. 241-260.
48. Hietikko E. Design for additive manufacturing - DFAM. *The international journal of engineering and science (IJES)*. Vol. 3. Issue 12. December 2014. p. 14-19.
 49. Asadollahi-Yazdi E., Gardan J., Lafon P. Integrated design in additive manufacturing based on design for manufacturing. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* Vol:10, No:6, 2016. p. 1115-1122.
 50. Kulkarni P., Marsan A., Dutta D. A review of process planning techniques in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 6(1), 2000. pp. 18-35. doi: 10.1108/13552540010309859.
 51. Algardh J. Thickness dependency of mechanical properties for thin-walled titanium parts manufactured by electron beam melting (EBM) / J. Algardh, T. Horn, H. West, R. Aman, A. Snis, H. Engqvist, J. Lausmaa, O. Harrysson. *Additive Manufacturing*, Vol. 12, Part A, October 2016, pp. 45-50. doi: 10.1016/j.addma.2016.06.009.
 52. Гаращенко Я.Н. Современное оборудование и программное обеспечение обратного инжиниринга промышленных изделий / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, С.И. Чернышов, Я.Н. Гаращенко. *Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. Вип. 5. Харків: НТУ «ХП», 2010. С. 138-152.*
 53. Гаращенко Я.Н. Обратный инжиниринг промышленных изделий с использованием оптико-цифровой установки объемного сканирования Imetric Iscan / В.Л. Доброскок, С.И. Чернышов, Д.П. Сидорчук. *Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. Вип. 4. Харків: НТУ «ХП», 2010. С. 123-135.*
 54. Raigar J., Sharma V.S., Srivastava S., Chand R., Singh J. A decision support system for the selection of an additive manufacturing process using a new hybrid MCDM technique. *Sādhanā*, 45(1), 2020.
 55. Park, H.S., Tran, N.H. A Decision Support System for Selecting Additive Manufacturing Technologies. *Proceedings of the 2017 International Conference on Information System and Data Mining - ICISDM'17. 2017. pp. 151- 155. doi: 10.1145/3077584.3077606.*
 56. Lohithaksha M.M., Sube S., Vittal P., Manoj Kumar T. Part segregation based on particle swarm optimisation for assembly design in additive manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*,

- 32:7, 2019. pp. 705-722. doi: 10.1080/0951192X.2019.1610577.
57. Oh Y., Zhou C., Behdad S. Part decomposition and assembly based (Re) design for additive manufacturing: A review. *Additive Manufacturing*, 2010. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.018.
 58. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>.
 59. GE Reports. (2016). GE Aviation Uses 3D Printing to Build Jet Engine Parts. <https://www.ge.com/news/reports>.
 60. Siemens AG. (2020). Additive manufacturing of gas turbine parts. <https://www.siemens.com/press>.
 61. Семененко В.І., Савченко І.В. (2019). *Основи технологій адитивного виробництва: теорія і практика*. — Київ: НТУУ «КПІ». ISBN: 978- 966-622-891-5.
 62. Кузьмін В.А. (2017). *Моделювання технологічних процесів у адитивному виробництві*. — Київ: Академперіодика.
 63. Лазерна поверхнева обробка матеріалів /Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. Харків : ФОП Панов А.М., 2020. 100 с.
 64. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О. Технологія лазерного кольорового маркування сталей. *Вісник ХНАДУ*.2020. Вип. 88. С. 137-142.
 65. Бабанін, В. І. Лазерна техніка та її застосування: Підручник. – К.: Либідь, 2017. – 312 с.
 66. Скуратовський, І. В., Шевченко, О. П. *Геоінформаційні системи та лазерне сканування в геодезії*. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. – 228 с.
 67. Войтенко, О. М. *Основи тривимірного моделювання на основі лазерного сканування*. – Харків: ХНАМГ, 2019. – 180 с.
 68. Trimble Inc. *3D Laser Scanning Basics: A Guide to Reality Capture and LiDAR Technology*. – Sunnyvale, CA: Trimble, 2021. – 92 p.
 69. Zhang Y. AM feature and knowledge based process planning for additive manufacturing in multiple parts production context / Y.Zhang, A.Bernard // *In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. – 2014. – P. 1259–1276 [Electronic recourse]. – Access mode : <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2014-099-Zhang.pdf>.
 70. Wohlers Report 2016. *3D Printing and additive manufacturing state of the industry. Annual worldwide progress report*. – 2016 [Electronic recourse]. –

Access mode: <https://wohlersassociates.com>.

71. Stoyan Y. Packing of convex polytopes into a parallelepiped / Y.Stoyan, N.Gil, G.Scheithauer // Preprint MATHNM-06-2004. – Dresden, 2004. – P. 32.
72. Bezdek K. Classical topics in discrete geometry / K.Bezdek. – New York: Springer, 2010 [Electronic recourse]. – Access mode : 10.1007/978-1-4419-0600-7.
73. Wohlers Report 2016, (2016), «3D Printing and additive manufacturing state of the industry. Annual worldwide progress report», [Online], available at: <https://wohlersassociates.com>.
74. Mirotin, L.B., Bul'ba, A.V. and Demin, V.A. (2009), Logistika, tehnologija, proektirovanie skladov, transportnyh uzlov i terminalov, Feniks, M., 408 p.
75. Diegel O., Nordin A., Motte D. Additive Manufacturing Technologies. A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing, P. 19–39. DOI: 10.1007/978-981-13-8281-9_2.
76. Sanjay S., Guha P. M. Optimization of Binder Jetting Using Taguchi Method. Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2017. Vol. 69, No3. DOI: 10.1007/s11837-016-2231-4.
77. Beth E. Carroll, Todd A. Palmer, Allison M. Beese Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. Acta Materialia, 2015. Vol. 87, 1, April P. 309–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>.
78. Svetlizky D., Das M., Zheng B., Vyatskikh A. L., Bose S., Bandyopadhyay A., Schoenung J. M., Lavernia E. J., Eliaz N. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. Materials Today, 2021. Vol. 49, October P.271–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.
79. Perez M., Carou D., Rubio E. M., Teti R. Current advances in additive manufacturing. 13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 2019. 17-19 July.
80. Colosimo B. M., Qiang H., Tirthankar D., Tsung, Fugee Opportunities and challenges of quality engineering for additive manufacturing. Quality Engineering for Advanced Manufacturing, 2018. Vol. 50, Is. 3. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1487726>.
81. Rafiquzzaman Md., Maksudul Md. I., Rahman Md. H., Talukdar Md. S., Hasan Md. N. Mechanical property evaluation of glass–jute fiber reinforced polymer composites. Polymers for advanced technologies, 2016. Vol. 27, Is.

- 10, October. P. 1308–1316. DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.3798>.
82. Xu X., Awad A., Robles-Martinez P., Gaisford S., Goyanes A., Basit A. W. Vat photopolymerization 3D printing for advanced drug delivery and medical device applications. *Journal of Controlled Release*, 2021. Vol. 329, 10 January. P. 743–757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.008>.
 83. Calvert P. Inkjet printing for materials and devices. *Chem Mater*, 2001. Oct 15;13(10). P. 3299–3305.
 84. Calvert P., Crockett R. Chemical solid free-form fabrication: making shapes without molds. *Chem Mater*, 1997. Mar 18; 9(3). P. 650–663.
 85. Vat Photopolymerization 3D Printing of Nanocomposites: A Literature Review / Medellín A. and others *J. Micro Nano-Manuf.* 2019, Sep 7(3). P. 031006. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4044288>.
 86. Osch V. Th, Perelaer J., Laat Aw., Schubert Us. Inkjet printing of narrow conductive tracks on untreated polymeric substrates. *Adv Mater*, 2008. Jan 18; 20 (2). P. 343–345.
 87. Sirringhaus H., Kawase T., Friend R. High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits. *Science*, 2000. Dec 15;290(5499) P. 2123– 2126.
 88. Shimoda T, Morii K, Seki S, Kiguchi H / Inkjet printing of light-emitting polymer displays. *Mrs Bulletin*, 2003. Nov, 28(11). P. 821–827.
 89. Bharathan J., Yang Y. Polymer electroluminescent devices processed by inkjet printing: I. Polymer light-emitting logo. *Appl Phys Lett*, 1998. May 25;72(21). P. 2660 –2662.
 90. Kordás K., Mustonen T., Tóth G. Inkjet printing of electrically conductive patterns of carbon nanotubes. *Small*, 2006. Aug, 2(8–9). P. 1021–1025.
 91. Liu Y., Cui T., Varahramyan K. All-polymer capacitor fabricated with inkjet printing technique. *Solid State Electron*, 2003. Sep 1;47(9). P. 1543 – 1548.
 92. Liu R., Wang Z., Sparks T., Liou F., Newkirk J. Aerospace applications of laser additive manufacturing. *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*, 2017. P. 351–371. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0>.
 93. Najmon J.C., Raeisi S., Tovar A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, 2019. P. 7–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>.
 94. Parandoush P., Lin D. A review on additive manufacturing of polymer fiber composites. *Composite Structures*, 2017. Vol. 182, 15 December. P. 36–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.

95. Temperature FDM 3D Printing for the Manufacture of Patient-Specific Immediate Release Tablets / Okwuosa T. C. and others. *Pharmaceutical Research*, 2016. Vol. 33. P. 2704–2712.
96. Melocchi A., Parietti F., Maroni A., Foppoli A., Gazzaniga A., Zema L. Hot-melt extruded filaments based on pharmaceutical grade polymers for 3D printing by fused deposition modeling. *International Journal of Pharmaceutics*, 2016. Vol. 509, Is. 1–2, 25 July. P. 255–263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.05.036>.
97. Gong H., Snelling D., Kardel K., Carrano A. Comparison of Stainless Steel 316L Parts Made by FDM- and SLM-Based Additive Manufacturing Processes. *JOM*, 2019. Vol. 71. P. 880–885.
98. Plott J., Tian X., Shih A. J. Voids and tensile properties in extrusion-based additive manufacturing of moisture-cured silicone elastomer. *Additive Manufacturing*, 2018. Vol. 22, August. P. 606–617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.010>.
99. Turner B. N., Strong R., Gold S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid prototyping journal*, 2014. Vol. 20, Is. 3, 14 Apr. P. 192–204. DOI: 10.1108/RPJ-01-2013-0012.
100. Xin W., Man J., Zuowan Z., Jihua G., David H. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 2017. Vol. 110, 1 February. P. 442–458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
101. Kalsoom U., Nesterenko P. N., Paull B. Recent developments in 3D printable composite materials. *RSC Adv.*, 2016. № 6. P. 60355-60371. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6RA11334F>.
102. Pedram P., Dong L. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 2017. Vol. 182, 15 December. P. 36 – 53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
103. Svetlizky D., Das M., Zheng B., Vyatskikh A. L., Bose S., Bandyopadhyay A., Schoenung J. M., Lavernia E. J., Eliaz N. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 2021. Vol. 49, October. P. 271–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.
104. Jiaqi H., Qian C., Hao J., Bin Z., Lei L. A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 2020. Vol. 15, Is. 2. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1708027>.

105. Gülcan O., Günaydın K., Tamer A. The State of the Art of Material Jetting – A Critical Review. *Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing II, Polymers*, 2021. Special Issue 13(16). P. 2829. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162829>.
106. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. *Material Jetting Additive Manufacturing Technologies*, 2020. P. 203–235.
107. Dong H., Carr W. W. An experimental study of drop-on-demand drop formation. *Physics of Fluids*, 2006. 18. P. 072102. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2217929>.
108. Sun S., Brandt M., Easton M. *Powder bed fusion processes: An overview. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*, 2017. P. 55 – 77. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6>.
109. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. *Powder Bed Fusion. Additive Manufacturing Technologies*. P. 125–170.
110. Awad A., Fina F., Goyanes A., Gaisford S., Basit A. W. 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering. *International Journal of Pharmaceutics*, 2020. Vol. 586, 30 August. P. 119594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594>.
111. Santos L.M.S., Ferreira J.A.M., Jesus J.S., Costa J.M., Capela C. Fatigue behaviour of selective laser melting steel components. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2016. Vol. 85, Part A, October. P. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.08.011>.
112. Nandy J., Sarangi H., Sahoo S. A Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2019. Vol. 6. P. 280–316.
113. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review. *International Materials Reviews*, 2016. Vol. 61, Is. 5. DOI: <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>.
114. Mekonnen B. G., Bright G., Walker A. A. Study on State of the Art Technology of Laminated Object Manufacturing (LOM). *CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future*, P. 207–216. Part of the *Lecture Notes in Mechanical Engineering* book series (LNME).
115. Huang J., Wang Q. Q. and J. A Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Advanced Digital and Other Processes, Processes*, 2020. 8(9). P. 1138. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8091138>.
116. Unkovskiy A., Schmidt F., Beuer F., Li P., Spintzyk S., Fernandez P. K. *Stereolithography vs. Direct Light Processing for Rapid Manufacturing of*

- Complete Denture Bases: An In Vitro Accuracy Analysis. *Digital Workflows and Material Sciences in Dental Medicine*, 2021. Special Issue 10(5). P. 1070. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm10051070>.
117. Ono I. M. D., Abe K. Ph. D, Shiotani S. Ph. D., Hirayama Y. Ph. D. Producing a Full-Scale Model From Computed Tomographic Data with the Rapid Prototyping Technique Using the Binder Jet Method. *Journal of Craniofacial Surgery*, 2000. №11(6), November. P. 527–537.
 118. Hodder K. J., Chalaturnyk R. J. Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand. *Additive Manufacturing*, 2019. Vol. 28, August. P. 649–660. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.008>.
 119. Šljivić M., Fragassa C., Pavlović A., Kraišnik M., Ilić J., Stanojević M. Additive manufacturing of functional parts based on material extrusion technology. *Contemporary Materials*, 2016. VII-2, Vol. 7, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.7251/COMEN1602178S>.
 120. Moore J. P., Williams C. B. Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting. *Rapid prototyping journal*, 2015. Vol. 21, Issue 6, 19 Oct. P. 675–685. DOI: 10.1108/RPJ-03-2014-0031.
 121. Jabari E., Liravi F., Davoodi E., Lin L., Toyserkani E. High speed 3D material-jetting additive manufacturing of viscous graphene-based ink with high electrical conductivity. *Additive Manufacturing*, 2020. Vol. 35, October. P. 101330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101330>.
 122. Yang L., Tang S.-y., Fan Z.-t., Jiang W.-m., Liu X.-w. Rapid casting technology based on selective laser sintering. *China Foundry*, 2021. Vol. 18. P. 296–306.
 123. Padmakumar M. Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2020. Vol. 7. P. 338–371.
 124. Nakagawa T., Kunieda M., Liu S.-D. Laser Cut Sheet Laminated Forming Dies by Diffusion Bonding. *Proceedings of the Twenty-Fifth International Machine Tool Design and Research Conference* P. 505–510.
 125. Gokuldoss P. K., Kolla S., Eckert J. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials*, 2017. № 10(6). P. 672. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10060672>.
 126. Small W. R., Panhuis M. Inkjet printing of transparent, electrically conducting single-walled carbon-nanotube composites. *Small*, 2007. № 3(9).

- Sep 3. P. 1500–1503.
127. Kim K., Zhu W., Qu X. 3D optical printing of piezoelectric nanoparticle–polymer composite materials. *ACS Nano*, 2014. № 8 (10), Jul. 29. P. 9799–9806.
 128. Wu J., Yuan C., Ding Z. Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers. *Sci Rep*, 2016. Apr. 13.6. P. 24224.
 129. Kokkinis D., Schaffner M., Studart A. R. Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials. *Nat Commun*. 2015. Oct. 23.6. P. 8643.
 130. Liu W.; Du Pont, J. N. Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by Laser Engineered Net Shaping. *Scr. Mater*, 2003. № 48, P. 1337–1342.
 131. Heer B., Bandyopadhyay A. Silica coated titanium using Laser Engineered Net Shaping for enhanced wear resistance. *Addit. Manuf*, 2018. № 23. P. 303–311.
 132. Das M., Balla V. K., Kumar T. S. S., Bandyopadhyay A., Manna I. Tribological, electrochemical and in vitro biocompatibility properties of SiC reinforced composite coatings. *Mater. Des*, 2016. № 95. P. 510–517.
 133. Li Y., Hu Y., Cong W., Zhi L., Guo, Z. Additive manufacturing of alumina using laser engineered net shaping: Effects of deposition variables. *Ceram. Int*, 2017. № 43. P. 7768–7775.
 134. Niu F., Wu D., Zhou S., Ma G. Power prediction for laser engineered net shaping of Al₂O₃ ceramic parts. *J. Eur. Ceram. Soc*, 2014. № 34. P. 3811–3817.
 135. Wu D. J., Niu F. Y., Ma G. Y., Zhang B., Yan S. Process optimization for suppressing cracks in laser engineered net shaping of Al₂O₃ ceramics. *JOM*, 2016. № 69. P. 557–562.
 136. Ma G., Wang J., Niu F., Sun B., Wu D. Influence of powder distribution on the Al₂O₃ thin-wall ceramic formed by laser engineered net shaping. *Chin. J. Lasers*, 2015. P. 42. P. 0103006.
 137. Niu F., Wu D., Ma G., Zhang B. Additive manufacturing of ceramic structures by laser engineered net shaping. *Chin. J. Mech. Eng*, 2015. № 28. P. 1117–1122.
 138. Dehoff R. R., Sarosi P. M., Collins P. C., Fraser H. L., Mills M. J. Microstructural evaluation of LENSTM deposited Nb-Ti-Si-Cr alloys. *MRS Online Proc. Libr. Arch*, 2002. № 753. P. 2–7.
 139. Fischer P., Karapatis N., Romano V., Glardon R., Weber H. P. A model for the interaction of near-infrared laser pulses with metal powders in selective laser sintering. *Appl Phys A*, 2002. № 74(4), Apr. 1. P. 467–474.

140. Prakash K. S., Nancharaih T., Rao V. S. / Additive manufacturing techniques in manufacturing an overview. *Mater Today Proc.*, 2018. Jan 1, 5(2). P. 3873–3882.
141. Wong K. V., Hernandez A. A review of additive manufacturing. *ISRN Mech Eng*, 2012. Aug, 16.
142. Singh S., Ramakrishna S., Singh R. Material issues in additive manufacturing: a review. *J Manuf Process*, 2017. № 25, Jan 1. P.185–200.
143. Williams J. D., Deckard C. R. Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process. *Rapid Prototyp J.*, 1998. № 4 (2). Jun 1. P. 90–100.
144. Duan B., Wang M., Zhou W. Y., Cheung W. L., Li Z. Y., Lu W. W. Three-dimensional nanocomposite scaffolds fabricated via selective laser sintering for bone tissue engineering. *Acta Biomater*, 2010. № 6 (12), Dec 1. P. 4495–4505.
145. O’Neill P., Jolivet L., Kent N. J., Brabazon D. Physical integrity of 3D printed parts for use as embossing tools. *Adv. Mater. Process. Technol.*, 2017. № 3. P. 308–317.
146. Anunmana C., Ueawitthayasuporn C., Kiattavorncharoen S., Thanasrisuebwong P. In vitro comparison of surgical implant placement accuracy using guides fabricated by three different additive technologies. *Appl. Sci.*, 2020. № 10. P. 7791.
147. Nowacki J. Siczekiewicz N. Problems of determination of MultiJet 3D printing distortions using a 3D scanner. *Arch. Mater. Sci. Eng.*, 2020. № 103. P. 30–41.
148. Perelaer J., Hendriks C.E., Laat A.W., Schubert U.S. One-step inkjet printing of conductive silver tracks on polymer substrates. *Nanotechnology*, 2009. № 20 (16), Mar 31. P. 165303.
149. Kordás K., Mustonen T., Tóth G. Inkjet printing of electrically conductive patterns of carbon nanotubes. *Small*, 2006. № 2(8–9), Aug. P. 1021–1025.
150. Shimoda T., Morii K., Seki S., Kiguchi H. Inkjet printing of light-emitting polymer displays. *Mrs Bulletin.*, 2003. № 28 (11), Nov. P. 821–827.
151. Sirringhaus H., Kawase T., Friend R. H. High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits. *Science*, 2000. № 290 (5499), Dec 15. P. 2123–2126.
152. Van O. T. H., Perelaer J., Laat A. W., Schubert U. S. Inkjet printing of narrow conductive tracks on untreated polymeric substrates. *Adv Mater*, 2008. № 20 (2), Jan. P. 18343–345.

153. Singh M., Haverinen H. M., Dhagat P., Jabbour G. E. Inkjet printing—process and its applications. *Adv Mater*, 2010. № 22 (6), Feb. 9. P. 673– 685.
154. Gans De B. J., Duineveld P. C., Schubert U. S. Inkjet printing of polymers: state of the art and future developments. *Adv Mater*, 2004. № 16 (3), Feb. 3. P. 203–213.
155. Guo R., Ren Z., Bi H., Xu M., Cai L. Electrical and thermal conductivity of polylactic acid (PLA)-based biocomposites by incorporation of nanographite fabricated with Fused deposition modeling. *Polymers.*, 2019. № 11(3), Mar. P. 549.
156. Caminero M. Á., Chacón J. M., García-Plaza E., Núñez P. J., Reverte J. M., Becar J. P. Additive manufacturing of PLA-based composites using fused filament fabrication: Effect of graphene nanoplatelet reinforcement on mechanical properties, dimensional accuracy and texture. *Polymers*, 2019. № 11(5), May, P. 799.
157. Serra T., Planell J. A., Navarro M. High-resolution PLA-based composite scaffolds via 3-D printing technology. *Acta Biomater*, 2013. № 9 (3), Mar. 1. P. 5521–5530.
158. Lam C. X., Savalani M. M., Teoh S. H., Hutmacher D. W. Dynamics of in vitro polymer degradation of polycaprolactone-based scaffolds: accelerated versus simulated physiological conditions. *Biomed Mater*, 2008. № 3 (3), Aug 8. P. 034108.
159. Weng Z., Wang J., Senthil T., Wu L. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. *Mater Des.*, 2016. № 102, Jul 15. P. 276–283.
160. Горії Т., Кіріхара С., Міямото Ю. Вільне виготовлення об'єктів з суперсплавів за допомогою 3D мікрозварювання // *Матеріали та дизайн*. 2009. Т. 30, № 4. С. 1093-1097.
161. Вибіркова лазерна плавильна машина SLM 500 | SLM Solutions. URL: <https://slm-solutions.com/products/machines/selective-laser-melting-machine-slm-500> (дата звернення: 23 жовтня 2017 року).
162. Грабченко А.І., Доброскок В.Л. Сучасні технології матеріалізації комп'ютерних моделей: Навч. посібник. – Х.: НТУ "ХПІ", 2009. – 86 с.
163. 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.
164. 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

165. Paulo Jorge Bártolo. Stereolithography: Materials, Processes, and Applications. 2011. DOI:10.1007/978-0-387-92904-0. ISBN: 978-0-387-92903-3
166. 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.
167. Gebhardt, A. (2011). Understanding additive manufacturing.
168. Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
169. Degnan, M. (2017). *3D Printing Techniques and Processes*. Cavendish Square Publishing, LLC.
170. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., ... & Khorasani, M. (2021). Material jetting. *Additive Manufacturing Technologies*, 203-235.
171. Singla, G. (2016). 3D Printing: Innovative Technology towards New Horizons. *International Journal of Science, Engineering and Computer Technology*, 6(2), 158-160.
172. Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873- 3882.
173. Zacharias, J. (2022, July). Comparison of Additive Manufacturing and Traditional Manufacturing. In *The 2nd Advanced Manufacturing Student Conference (AMSC22) Chemnitz, Germany 07–08 July 2022 (Vol. 7, p. 55)*.
174. Turner, M. (2015). The current state, outcome and vision of additive manufacturing. *Journal of Welding and Joining*, 33(6), 1-5.
175. 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)*.
176. Kumar, M. B., Sathiya, P., & Varatharajulu, M. (2021). Selective laser sintering. *Advances in additive manufacturing processes*. China: Bentham Books, 28-47.
177. 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.

178. Pinkerton, A. J. (2015). Advances in the modeling of laser direct metal deposition. *Journal of laser applications*, 27(S1), S15001.
179. Lewis, G. K., & Schlienger, E. (2000). Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition. *Materials & Design*, 21(4), 417-423.
180. 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.
181. 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).
182. Carneiro, O. S., Silva, A. F., & Gomes, R. (2015). Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design*, 83, 768-776.
183. 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.
184. Atwood, C., Griffith, M., Harwell, L., Schlienger, E., Ensz, 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.
185. Hofmeister, W., Wert, M., Smugeresky, J., Philliber, J. A., Griffith, M., & Ensz, M. (1999). Investigating solidification with the laser-engineered net shaping (LENSTM) process. *Jom*, 51(7), 1-6.
186. Mohan Pandey, P., Venkata Reddy, N., & Dhande, S. G. (2003). Slicing procedures in layered manufacturing: a review. *Rapid prototyping journal*, 9(5), 274-288.
187. 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).
188. Kamble, P., Chavan, S., & Karunakaran, K. P. (2018). Multi-jet fluid deposition in 3D printing: a review.
189. 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.

190. Greulich, M., Greul, M., & Pintat, T. (1995). Fast, functional prototypes via multiphase jet solidification. *Rapid Prototyping Journal*, 1(1), 20-25.
191. Пермяков О.О., Яковенко І.Є., Калініченко В.А., Скиба О.С., Южкович П. : зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. № 2 (8) 2023. – С. 91–99. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2 (8).10.
192. Abella RJ, Daschbach JM, McNichols RJ Reverse engineering industrial applications (1994) *Computers and Industrial Engineering*, 26 (2), pp. 381 - 385 DOI: 10.1016/0360-8352 (94) 90071-X.
193. Raja V., Fernandes KJ Reverse Engineering : An Industrial Perspective. (2008) *Springer Series in Advanced Manufacturing*, pp. 1 – 239.
194. Maintenance Repair and Operations (MRO) Market Size, Share & Trends Analysis Report By MRO Type (Industrial MRO, Electrical MRO, Facility MRO, Other MRO Types) and By Region(North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM) Forecasts, 2022-2030. URL: <https://straitresearch.com/report/maintenance-repair-and-operations-market> (дата звернення: 24.04.2025).
195. Maintenance Repair and Operations (MRO) Market Size, Share, Trends and Forecast by Provider, MRO Type, and Region, 2025-2033. URL: <https://www.imarcgroup.com/maintenance-repair-operations-market> (дата звернення: 24.04.2025).
196. Промисловість України у 2016–2020 роках статистичний збірник *Industry of Ukraine / За ред. І. Петренко. Державна служба статистики України, 2021. – 296с.*
197. Reverse Engineering Service Market Overview. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/reverse-engineering-service-market> (дата звернення: 24.04.2025).
198. Power Plant Maintenance Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, by Power Plant Type, by Services, by Equipments : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031 URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/power-plant-maintenance-market-A47448> (дата звернення: 24.04.2025).
199. *The American Heritage Dictionary, Second College Edition. Houghton Mifflin Co., 1985.*

Навчальне видання

ДОЛЯ Віктор Миколайович
КЛОЧКО Олександр Олександрович

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ У РЕВЕРСНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ

Навчальний посібник
для магістрів спеціальності
G09 «Прикладна механіка» денної та заочної форм навчання

Відповідальний за випуск Третяк Т.Є.

Роботу до видання рекомендував Федорович В.О.

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 112.

Підп. до друку 30.10.2025 р. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 7,4.

Видавничий центр НТУ «ХПІ», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002 Свід-
цтво про державну реєстрацію № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронне видання