

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

Тришин П.Р.

ТЕКСТИ (конспект) лекцій з дисципліни

«Smart-технології в машинобудуванні»

для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка»
освітньої програми «**Технології машинобудування**»

Тексти (конспект) лекцій з дисципліни «Smart-технології в машинобудуванні» для студентів всіх форм навчання спеціальності G9 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології машинобудування» галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво» / Укл. П.Р. Тришин – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 85 с.

Укладач: П.Р. Тришин, PhD, доцент каф. ТМБ

Рецензент: Н.В. Гончар, канд.техн.наук, доцент каф. ТМБ

Відповідальний
за випуск С.І. Дядя, канд.техн.наук, доцент каф. ТМБ

Затверджено
на засіданні кафедри ТМБ
протокол № 1
від 06.08.2025 р.

Рекомендовано до видання НМК
машинобудівного факультету
протокол № 1
від 26.08.2025 р.

ВСТУП

Сучасне машинобудування перебуває на етапі глибокої трансформації, що зумовлена розвитком цифрових технологій, автоматизації та інтелектуальних систем. Традиційні методи проєктування й виробництва поступово доповнюються та інтегруються з новітніми підходами, які отримали назву Smart-технології. Вони поєднують у собі можливості обробки великих обсягів даних, комп'ютерного моделювання, адитивного та гібридного виробництва, що дозволяє створювати високоефективні та конкурентоспроможні вироби.

Застосування smart-технологій у машинобудуванні забезпечує:

- скорочення термінів проєктування і виготовлення продукції;
- зниження витрат матеріалів та енергії;
- підвищення точності й якості деталей;
- створення конструкцій нових типів, які були неможливими при традицій-

них методах.

У цьому конспекті лекцій розглядаються ключові напрями впровадження Smart-технологій у сучасному машинобудуванні, серед яких:

1. Гібридне виробництво – поєднання традиційних і адитивних методів обробки.
2. Генеративний дизайн – використання алгоритмів і штучного інтелекту для створення оптимальних конструкцій.
3. Зворотний інжиніринг та 3D-сканування – відтворення геометрії та цифрових моделей існуючих об'єктів.
4. Адитивні технології – пошарове нарощування матеріалу для виготовлення деталей.
5. 4D-друк – новий напрям, що передбачає створення виробів, здатних змінювати свою форму чи властивості під впливом зовнішніх факторів.

Розуміння і засвоєння цих технологій є необхідною умовою підготовки сучасних фахівців машинобудівної галузі, які повинні не лише орієнтуватися у традиційних виробничих процесах, а й володіти знаннями та навичками роботи з інноваційними інструментами, що визначають обличчя промисловості майбутнього.

1. ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ У МАШИНОБУДУВАННІ

Штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН) мають величезний потенціал не тільки для прискорення та розширення процесу проектування, але й для відкриття його для конструкторів із меншим технічним досвідом. Хоча деякі елементи ШІ доступні в програмних продуктах для проектування та моделювання сьогодні, вони лише трохи охоплюють ті потреби, які необхідні в конструюванні.

Інтерес до програмного забезпечення для генеративного дизайну зростає, оскільки ці рішення стають все більш потужними, складними та доступними. Вони можуть значно прискорити час запуску у виробництво деталей та машин, використовуючи ШІ для автоматизації деяких найбільш трудомістких етапів проектування.

Параметричне проектування (створення проекту шляхом введення числових параметрів, тобто висоти, довжини, вартості, матеріалів, ваги тощо) та ШІ – це пов'язані, але різні концепції. Параметричне проектування дозволяє проектувальникам створювати гнучкі та легко модифіковані моделі, засновані на взаємопов'язаних та змінних розмірах та характеристиках. З іншого боку, ШІ має на увазі виконання завдань проектування, які зазвичай потребують людського інтелекту.

Генеративний дизайн, що є поєднанням двох підходів, використовує обчислювальні процеси для дослідження величезного (більшого, ніж люди можуть собі уявити) простору дизайну та створення безлічі (навіть тисяч) альтернативних варіантів дизайну.

Алгоритми, керовані ШІ, що використовуються в генеративному дизайні, можуть переміщатися по безлічі можливостей дизайну, враховуючи різні обмеження та цілі дизайну. Алгоритми, які «керуються ШІ», – це ті, що можуть коригувати внутрішні параметри для прогнозування чи прийняття рішень без програмування. Алгоритми, керовані ШІ, можуть розпізнавати шаблони, які можуть бути відразу очевидні людям.

У контексті генеративного дизайну алгоритм на основі ШІ може використовувати методи машинного навчання для розуміння переваг у дизайні або навчання на історичних даних дизайну. Ці алгоритми можуть генерувати рішення на основі узагальнених знань з даних, а не дотримуватися конкретних наборів даних.

ШІ в генеративному дизайні не замінює інженера, але він звільняє його від повторюваних завдань і схильних до помилок множинних обчислень і усуває суперечливі обмеження дизайну, щоб зосередитися на інноваціях. Ця категорія програмного забезпечення не тільки заощаджує величезну кількість часу в життєвому циклі розробки продукту, але й надає більше альтернатив, ніж дизайнери-люди встигають створити або оцінити вручну, і, що важливіше, концепції, які ви, можливо, ніколи не вважали за можливі.

Автори дослідження дійшли висновку, що якщо інженери-механіки хочуть отримати допомогу від ШІ для генерації нових ідей та конструкцій, їм доведеться спочатку переорієнтувати ці моделі зі статистичної схожості на інші пріоритети, такі як продуктивність, конструктивні обмеження та новизна.

Сьогоднішня обчислювальна потужність та унікальні проекти, доступні завдяки адитивному виробництву, відіграють велику роль у ширшому використанні цього програмного забезпечення. Для більш глибокого занурення в те, чим є або не є програмне забезпечення для генеративного дизайну.

До основних периметрів, які використовуються в генеративному дизайні для пошуку оптимальних рішень відносяться:

- 1) навантаження;
- 2) контакти;
- 3) матеріали;
- 4) обмеження щодо напруги та зміщення;
- 5) маса;
- 6) товщина стінки;
- 7) спосіб виготовлення;
- 8) доступний простір для дизайну;
- 9) витрати.

Єдиного визначення програмного забезпечення для генеративного дизайну немає. Постачальники в цій галузі використовують цей термін вільно, оскільки вони додають та удосконалюють функції у своїх програмних платформах.

Програмне забезпечення для генеративного дизайну – це мішаний пакет. Програмне забезпечення для генеративного проектування може містити вбудоване тестування та моделювання. Воно може надавати можливості для консолідації та полегшення деталей (рис. 1.1). Деякі продукти володіють кількома з цих атрибутів, але не використовують ярлик генеративний дизайн, що робить порівняння програмного забезпечення в цій категорії, що швидко розвивається складним завданням.



Рисунок 1.1 – Приклад генеративного дизайну

По суті, ми ризикнемо сказати, що генеративний дизайн – це процес проектування, який використовує ШІ та обчислення для генерації результатів, настільки численних та різноманітних, що вони були б важкими, якщо не неможливими, для людини-дизайнера. Однак багато програмних продуктів, які ми представляємо нижче, відображають переконання, що генеративний дизайн - це просто використання алгоритмічних методів для перетворення вимог у геометрію та дизайн продукту. Вони не генерують десятки варіантів, а скоріше удосконалюють одну частину (що дуже схоже на параметричний дизайн).

Деякі пропозиції програмного забезпечення для генеративного проектування є автономними продуктами, а деякі є розширення в рамках більших інженерних платформ. У кожному разі, обидва вони відкривають шлях до ширшого дослідження потенційних проектних рішень; вони не обов'язково видають рішення, принаймні поки що. У деяких випадках згенерована частина може бути виготовлена безпосередньо як адитивним, так і субтрактивним способом, але частіше, залежно від надійності програмного забезпечення, ви отримаєте альтернативні варіанти дизайну, які потім надихають, які потім зможете розробити у своєму програмному забезпеченні CAD/CAE. Ви також можете отримати надійні інженерні дані, які можна використовувати для зміни та оптимізації базового проекту без необхідності його експорту в інше програмне забезпечення.

Експерти сходяться на думці, що програмне забезпечення для генеративного дизайну – це не автоматизоване проектування на основі штучного інтелекту, хоча воно може з'явитися в майбутньому. Це інструмент, що допомагає дизайнерам та інженерам економити час та розширювати можливості.

1.2 Застосування генеративного дизайну

NASA та Європейське космічне агентство (ESA) планують амбітний подвиг з місією з повернення зразків з Марса, щоб вперше безпечно доставити каміння і ґрунт із Марса назад на Землю – все це з метою з'ясувати, чи існувало будь-коли життя на планеті. Очікуваний запуск нового марсіанського посадкового модуля NASA – 2027, а орбітального – 2028 рік. Передбачуване прибуття корабля, який відповість на наше питання про життя на Марсі, – 2033 рік. Тим часом є цілий потік нових проектів та інновацій, які зроблять подорож на Марс і назад бездоганною (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Деталі космічних апаратів NASA виготовлені з використанням генеративного проектування. Райан Макклелланд, інженер-дослідник NASA, демонструє кріплення, розроблене з використанням генеративного проектування (б) [2]

Newton Engineering and Product Development – одна з компаній, що допомагають розробляти ключові деталі для обладнання, призначеного для збирання зразків з Марсу. Вона використовує функцію генеративного проектування Fusion 360 розробки легких рішень, таких як шарнір кришки (рис. 1.3).

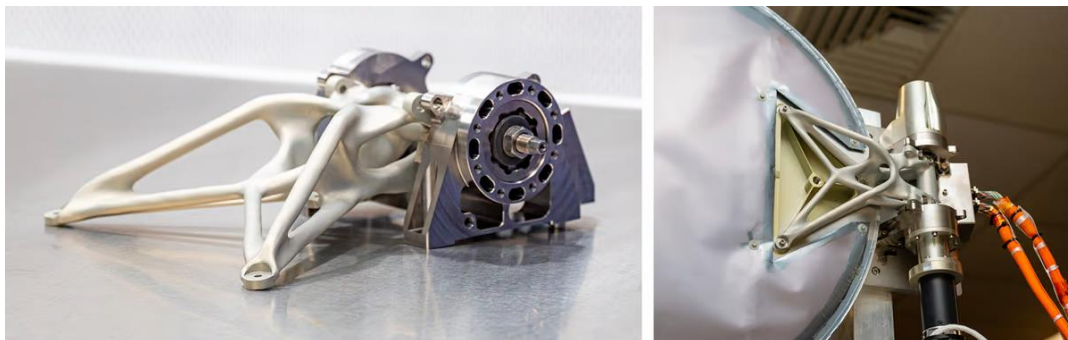


Рисунок 1.3 – Шарнір для проекту NASA Mars

Techfit Digital Surgery створює імпланти, які підтримують кістки, що гояться. Потреби кожного пацієнта унікальні, незалежно від того, чи вони відновлюються після раку або серйозних травм. Компанія використовує Ansys Discovery для вивчення різноманітних сценаріїв проектування. Інженери починають з унікальних даних сканування пацієнта (КТ, МРТ) та проектують для нього опори у цифровому вигляді. Потім програмне забезпечення може перевірити, чи ці індивідуальні опори відповідають необхідним механічним стандартам.

Коли італійський глобальний розробник ортопедії Lima Corporate розпочав розробку 3D-друкованого колінного суглоба (рис. 1.4), йому знадобилося програмне забезпечення, яке могло б включати його дані про характеристики, якими повинна мати колінна частина. Lima провела дослідження ходьби, які виявили навантаження, які

має витримувати частину та її ідеальне розміщення у пацієнта. NX автоматично обчислює оптимальний обсяг решітки у частині, щоб гарантувати необхідну міцність та стійкість. Проектувальникам більше не потрібно було боротися з маніпуляціями з файлами STL, оскільки вони могли редагувати більшість характеристик частини за допомогою числових значень, які математично пов'язані з геометрією.

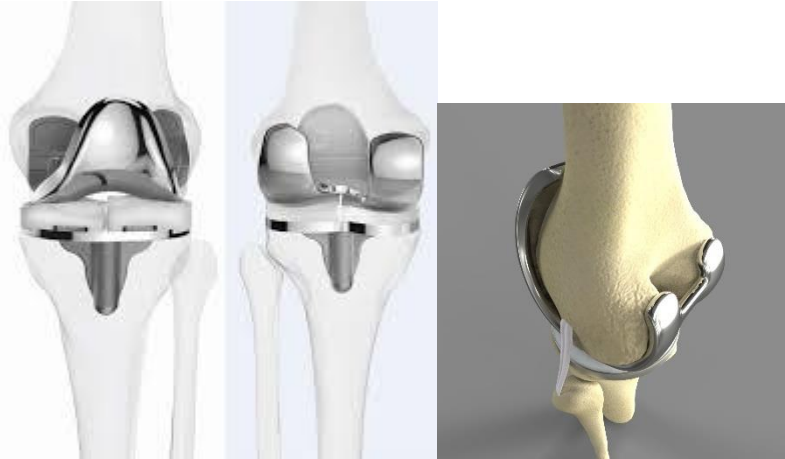


Рисунок 1.4 – 3D-друкований колінний суглоб

Виробник електровелосипедів Xplorcycles розробив план оснащення наступного покоління своїх велосипедів електродвигуном. Щоб з'єднати електродвигун вагою 3,2 кг із рештою конструкції велосипеда, існувала конструкція для виробництва з використанням традиційних виробничих процесів. Однак ця конструкція не підходила для дрібносерійного виробництва та додавала додаткову вагу. Щоб адаптувати деталь до адитивного виробництва (AB), вони використовували Apex Generative Design для створення конструкції, готової до АВ, яка була на 55% легша. Виробник електровелосипедів Xplorcycles знайшов легке рішення для кріплення двигуна до своєї конструкції велосипеда, яке ідеально підходить для дрібносерійного виробництва (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Кріплення двигуна

Силовий агрегат фургона, виготовлений IFA Group, оснащений центральним підшипником для приводного валу, розробленим за допомогою програмного забезпечення Synera. Він важить на 18 відсотків менше за свого попередника. І хоча нова деталь була розроблена на 80% швидше, вона жорсткіша і, отже, краще, ніж деталь, що використовувалася раніше.

Підшипник виготовлений компанією Henniges Automotive, яка використовувала Synera при розробці литої алюмінієвої деталі замість звичайного процесу проектування в автомобільній промисловості: зміни конструкції розраховуються, перевіряються та затверджуються у різних відділах компанії, потім результати повертаються розробнику та цикл починається заново.

Toyota стверджує, що інструменти генеративного дизайну Fusion 360 дозволили їй розробити більш тонку раму сидіння, звільнивши простір для ніг (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Рама сидіння

Компанія Danco прагнула полегшити свої титанові рибальські кліщі, тому застосувала генеративний дизайн і вибрала варіант, який найкраще приємний на дотик і привабливий для очей (рис. 1.7)



Рисунок 1.7 – Рибальські кліщі [8]

MAN, німецький виробник автобусів та вантажівок, минулого року запустив проект під назвою «Disruptive Bus Concepts», в якому він прагнув переосмислити конструкцію деталей автобуса, включаючи задню вісь. Для дослідження конструкції задньої осі інженер MAN Амелі Жакмар-Пурсон використала програмне забезпечення для генеративного проектування від стартапу Elise. Ціль полягала в тому, щоб оптимізувати існуючу конструкцію задньої осі з точки зору продуктивності, вимог до полегшеної конструкції та виробництва. Концептуальна конструкція задньої осі автобуса MAN, створена за допомогою програмного забезпечення Elise, на 36% легша за поточну конструкцію (рис. 1.8)

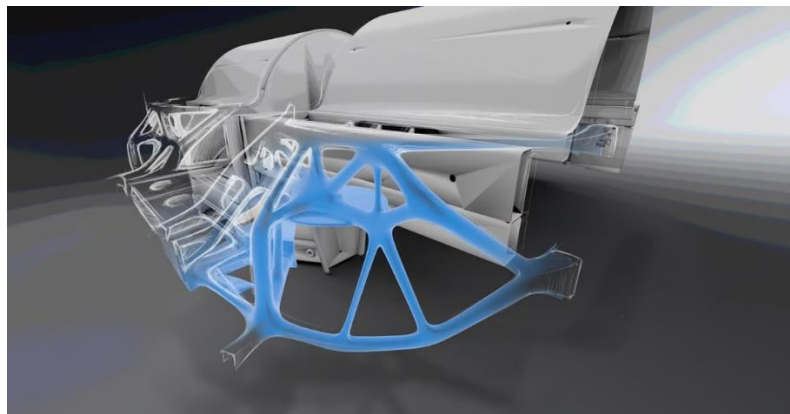


Рисунок 1.8 – Конструкція задньої осі

Імпортувавши набір технічних параметрів для осі, що містить обмеження конструкції та виробництва, Elise створила задню вісь на 36% легше поточної конструкції, а також з покращеними механічними характеристиками. Результат виявився настільки переконливим, що MAN вирішила дослідити цей шлях. Вони заявили, що автоматична генерація різних концепцій, а також точніша оцінка варіантів з точки зору міцності та ваги, радикально скоротили час розробки. «У майбутньому ми розраховуємо скоротити час розробки готового компонента за допомогою цього програмного забезпечення до 50%», – каже Мішель Тройцш, інженер-концептуаліст проекту Disruptive Bus Concepts у MAN pre-development.

2. ЗВОРОТНІЙ ІНЖИНІРИНГ

Поняття «зворотній інжиніринг» або «реінжиніринг» є сучасним формулюванням колишнього поняття - копіювання, удосконалення. З розвитком комп'ютерних технологій, коли світ прагне зробити що-небудь нове, незвичайне і на цьому заробити гроші, з'являється величезна кількість новітніх технологій, виробів, пристосувань і т.д. Однак якщо трохи поміркувати, то все нове це добре забуте, незатребувана в тій чи іншій формі старе. Трохи вдосконаливши двигун або проект - і, готовий новий сучасний винахід, з новим обсягом і новим зовнішнім виглядом.

Зворотня розробка (зворотній інжиніринг, реверс-інжиніринг; англ. reverse engineering) – дослідження деякого пристрою або програми, а також документації на нього з метою зрозуміти принцип його роботи; наприклад, щоб виявити недокументовані можливості, зробити зміну, або відтворити пристрій, програму чи інший об'єкт з аналогічними функціями, але без копіювання як такого. Застосовується звичайно в тому випадку, якщо творець оригінального об'єкта не надав інформації про структуру та способі створення (виробництва) об'єкта.

Для зворотного проектування фізичного продукту організація зазвичай отримує зразок продукту, про який йде мова, та розбирає його, щоб дослідити його внутрішні механізми. Таким чином, інженери можуть розкрити інформацію про оригінальний дизайн та конструкцію продукту.

Під час зворотного проектування механічного продукту починається аналіз розмірів та характеристик продукту, будь то літак, корабель, транспортний засіб, комп'ютер чи промислове обладнання. Під час цього аналізу вимірюються ширина, довжина та висота ключових компонентів продукту, оскільки ці розміри часто пов'язані з продуктивністю продукту. Сьогодні деякі інженери використовують технології 3D-сканування для проведення таких вимірювань. За допомогою тривимірних сканерів інженери можуть отримувати точні показники характеристик продукту та автоматично записувати цю інформацію у свої бази даних. Технології 3D-сканування включають координатно-вимірювальні машини (КВМ), промислові комп'ютерні томографи (КТ), лазерні сканери та дигітайзери структурованого світла.

Після того, як вся необхідна інформація буде зібрана та записана, ви можете використовувати ці дані для створення креслень автоматизованого проектування (САПР) для подальшого аналізу та розробки. Креслення САПР – це цифрові двовимірні та тривимірні зображення продуктів, які ви можете використовувати для аналізу дизайну продукту. Ці цифрові моделі допомагають розкрити задум дизайну та врахувати створення компонента, що проходить зворотне проектування.

Зворотне проектування часто необхідне при розробці комп'ютерних компонентів через застарівання деталей з попередніх років. Наприклад, у вас може бути один продукт з унікальною інновацією дворічної давності, але виробник з того часу припинив

свою діяльність. Щоб пов'язати цю інновацію з новішим продуктом для зручності та забезпечення безперервності, команді інженерів потрібно буде дослідити застарілий продукт на предмет його технологічного складу.

У промисловості зворотна розробка продукту конкурента з метою дізнатися його устрій, принцип роботи і оцінити можливості створення аналога. Так наприклад, ряд виробників фототехніки, таких як Sigma, Tamron, Tokina і Carl Zeiss, випускають об'єктиви з байонетом типу Canon EF. Вони створені методом зворотної розробки, а їхні виробники не мають доступу до специфікацій Canon. Компанія Canon не гарантує коректну роботу об'єктивів сторонніх розробників на своїх фотоапаратах.

Слід пам'ятати, що зворотна інженерія має специфічні етичні аспекти, особливо якщо вона використовується для аналізу програмного забезпечення або систем без згоди їх власника (і такі ситуації трапляються надто часто). У юрисдикціях багатьох країн несанкціонована зворотна інженерія може порушувати авторські права або права інтелектуальної власності, тому її застосування викликає багато занепокоєнь або навіть заперечень з боку інших країн. Досить широко відомим прикладом тут є Китайська Народна Республіка, де до авторських прав ставляться з високим ступенем зневаги, яка застосовувала зворотну інженерію і продовжує робити це, хоча й у дещо менших масштабах, для створення аналогів досліджуваних продуктів, що походять зі США або Європи.

Зворотна інженерія знаходить застосування в безлічі різноманітних галузей. Тим не менш, можна вказати на кілька областей, де її присутність особливо помітна:

1. Програмне забезпечення: як частина зворотної інженерії, програмісти аналізують існуючі програми або системи, щоб зрозуміти, як працює все програмне забезпечення або окремі алгоритми. Такий аналіз виявляється корисним для виправлення помилок, оновлення програмного забезпечення або створення нових рішень, сумісних з існуючими.

2. Електроніка: зворотне проектування базується на аналізі схем з метою відтворення їх схем та принципу роботи, і, звичайно, це включає ідентифікацію компонентів та електронних систем. Результати такої роботи можуть бути корисними під час ремонту, вдосконалення або під час проектування інших подібних пристроїв.

3. Машинобудування та технології: у цій галузі інженери зворотно проектують процес створення фізичних продуктів, щоб краще зрозуміти їх структуру, роботу та виробничі процеси. Це іноді допомагає вдосконалювати конструкції, «запозичувати» рішення або долати технічні проблеми.

4. Інформаційна безпека: у цій галузі зворотне проектування може застосовуватися для аналізу програмного забезпечення в пошуках вразливостей, загроз або шкідливого програмного забезпечення. Це допомагає експертам захистити системи від атак та виявити прогалини в їхній безпеці.

5. Конкуруючі продукти: компанії, що займаються виробництвом, регулярно використовують зворотне проектування для аналізу конкуруючих продуктів, щоб зрозуміти їхні характеристики, дизайн або технології. Це часто допомагає їм адаптувати власні продукти чи послуги до вимог ринку.

Цікаво, що зворотне проектування також може застосовуватися в розвідувальних операціях, що проводяться розвідувальними службами більшості розвинених країн. Військові як східного, так і західного блоків регулярно застосовували зворотну інженерію під час Холодної війни, особливо колишнього Радянського Союзу, який ретельно копіював кожен американський пристрій чи машину (літаки, транспортні засоби, зброю), якщо вони потрапляли до рук радянської розвідки.

Найвідомішими фактами зворотного розробки під час другої світової війни були:

- Німецькі каністри для бензину - в британських і американських військах помітили, що німці мали дуже зручні каністри. Вони скопіювали ці каністри, і ті отримали назву Jerry cans (від слова «gerrys» - від «Germans»).

- Туполев Ту-4 - деяка кількість американських бомбардувальників В-29 при вчиненні вильотів до Японії були змушені сідати в СРСР. Радянські військові, які не мали подібних стратегічних бомбардувальників, вирішили скопіювати В-29. Через кілька років вони розробили Ту-4, практично повну копію. Водночас, двигуни, озброєння і радіоелектронне обладнання Ту-4 не було копіями відповідних систем В-29.

- Тепловоз ТЕ1 - в 1945 році тепловоз RSD-1 (поставлявся в СРСР по ленд-лізу) привіз 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 і окремому обладнанні, ТЕ1 виявився практично ідентичний. Всі нинішні російські маневрові тепловози - нащадки американського тепловоза.

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

- Автомат Калашникова - нещодавно керівництво ВАТ «Іжмаш» заявило, що близько половини всіх АК в світі - «контрафактні» (тобто, вироблені без ліцензії та передачі технологій), через що Росія недоотримує близько мільярда доларів на рік. Водночас, патентні обмеження (якщо такі були) на технології та технічні рішення втратили свою силу багато років тому.

3. 3D-СКАНУВАННЯ

3D-сканування – це процес захоплення фізичного об'єкта для точного представлення його геометрії в цифровому середовищі. Об'єктом може бути будь-який об'єкт, людина або навіть навколишнє середовище. Так само, як камера захоплює плоске двовимірне зображення, 3D-сканер захоплює висоту, ширину, глибину об'єкта, а деякі дані також захоплюють колір. 3D-сканування часто отримує мільйони точок даних про реальні об'єкти. Виробники можуть використовувати ці точки даних різними способами, зокрема для адитивного виробництва, цифрових двійників, зворотного проектування, аналізу розмірів, 3D-інспекції та налаштування для конкретної особи або застосування. Загалом, 3D-сканування може здійснюватися контактними та безконтактними методами. Зазвичай, коли ми говоримо про 3D-сканування, маються на увазі безконтактні методи. Коли вимірювання збираються, інформація міститься в наборі точок даних (хмара точок або сітчасте представлення) у тривісній світовій системі координат.

Ці дані потім можна обробляти в безлічі програм для створення бажаних результатів для полігональних моделей, CAD, CAE, CFD, FEA та параметричного зворотного проектування.

Хоча існує безліч методів отримання 3D-даних, чотири найпопулярніші типи 3D-сканування включають:

1. Лазерне сканування

Існує два основних типи 3D-сканування на основі лазера.

Лазерна тріангуляція фіксує об'єкт, вимірюючи деформацію лазерного променя, що проектується на його поверхню. Одне або кілька лазерних джерел проектують дуже маленькі точки на поверхню, а камера або камери фіксують положення цих точок.

Кут між точками лазерної лінії та камерою визначається заздалегідь, що дозволяє розрахувати 3D-тріангуляцію. Обчислення на льоту фіксують ці точки в 3D-просторі, коли лазерна лінія(лінії) рухається(ються) по поверхні об'єкта. Цей підхід забезпечує точне сканування з високою роздільною здатністю та є найбільш ефективним, коли об'єкти є відбиваючими та/або темними та блискучими.

Час прольоту – це тип лазерного сканування, який вимірює час, необхідний для відбиття лазерного променя назад до датчика. Оскільки швидкість лазерного світла залишається постійною, час відбиття можна використовувати для обчислення відстані до об'єкта. За допомогою достатньої кількості таких вимірювань можна створити дуже щільне представлення хмари точок об'єкта.

2. Сканування структурованим світлом

Сканування структурованим світлом зазвичай використовує один світловий проєктор і кілька камер. Воно схоже на лазерну тріангуляцію, але вимірює деформацію візерунка або сітки, що проєктується на поверхню.

Як правило, синій світлодіод або лазер освітлює DLP-чіп для створення візерунків смуг. Коли візерунок зміщується по поверхні, камери збирають дані про зміни відомого візерунка та тріангулюють відстані для створення хмари точок.

Структуроване світло створює щільні хмари точок з високою деталізацією на гострих краях, враховуючи роздільну здатність бортових камер, які часто використовуються. Рівень денного освітлення навколишнього середовища іноді може створювати проблеми для структурованого світла залежно від технології проєкції, що використовується в системі.

3. Фотограмметрія

Фотограмметрія використовує стандартні або сильно модифіковані камери та спеціальні алгоритми для створення 3D-моделі з кількох 2D-фотографій. Фотографії будуть зроблені з різних ракурсів, і програмне забезпечення розпізнає спільні опорні точки на зображеннях, часто разом із калібрувальними смугами для масштабування, щоб об'єднати всі зображення в 3D-хмару точок. Перевагами фотограмметрії є швидкість захоплення та здатність зберігати кольорові дані захоплених точок. Вона ідеально підходить для зйомки великомасштабних об'єктів та ландшафтів.

Недоліком цього підходу є те, що він повністю залежить від роздільної здатності та якості експозиції фотографій, що використовуються для реконструкції 3D-зображення, а темні ділянки часто можуть призводити до відсутності даних у хмарі точок.

4. Комп'ютерна томографія (КТ)

КТ-сканування також починається як 2D-рентгенівські знімки, зроблені в різних ділянках об'єкта. Коли всі ці 2D-зрізи об'єднуються, формується 3D-піксельний або воксельний об'єкт. Воксельний об'єкт містить зовнішню геометрію та її внутрішні компоненти, і його часто експортують у форматі .stl або іншого типу 3D-сітки для подальших застосувань. Комп'ютерна томографія широко використовується в промислових умовах для створення високоточних вимірювань на об'єктах, які системи прямої видимості не можуть бачити або вимірювати з необхідним рівнем точності. КТ має численні переваги для будь-якої однорідної деталі, тоді як недоліком є те, що вона часто не застосовується до великих, дуже щільних або певних змішаних матеріалів деталей.

Існує багато типів 3D-сканерів, але ми зосередимося на тих, що використовують описані вище методи. Слід зазначити, що сканери великої дальності часто не призначені для використання на коротких відстанях і навпаки.

Це не означає, що ви не можете сканувати менші об'єкти сканерами великої дальності, а більші об'єкти сканерами малої дальності, але процедура може бути громіздкою та неефективною. Сканери великої дальності зазвичай мають фокусну відстань

від кількох метрів до сотень або тисяч метрів, тоді як сканери малої дальності мають фокусну відстань менше кількох метрів.

Портативна координатно вимірювальна машина (КВМ) з лазерним лінійним зондом пропонують фізичне твердотільне зондування, часто за допомогою приєднаної безконтактної системи зондування (сканера). Твердий зонд знаходиться або на кінці шарнірного кронштейна, або якимось чином оптично відстежується іншим пристроєм з камерами та/або лазером. Безконтактний зонд (сканер) може бути прикріплений до кінця кронштейна або може відстежуватися окремою оптичною системою відстеження.

Гусеничні системи найчастіше використовуються для більших робочих об'ємів, до кількох кубічних метрів, тоді як системи на основі маніпулятора використовуються для менших об'ємів, що вимірюються менше кубічного метра.

Поєднання контактного зондування для глибоких і сліпих об'єктів та сканування всіх зон прямої видимості або органічної форми часто є дуже універсальним.

Ручний лазерний сканер – це невеликі портативні пристрої, які використовують лазерну тріангуляцію, часто з кількома лазерами для дуже швидкого сканування області. Часто потрібно розмішувати на деталі маленькі круглі цільові наклейки, щоб сканер міг відстежувати, де він збирає дані. Це може зайняти деякий час на початку, але може бути корисним у багатьох відношеннях під час процесу сканування.

Ручний сканер структурованого світла за розміром схожий на ручні лазерні сканери. Вони ідеально підходять для швидкого та точного 3D-сканування, яке включає текстуру (колір) об'єктів середнього розміру, таких як тулуб людини або колесо. Безпека джерела світла корисна для сканування людей, і ці сканери працюють з об'єктами, що відбивають світло.

Фіксований структурований світловий сканер. Ці пристрої можуть бути системами, встановленими на штативі, здатними сканувати широкий спектр об'єктів, від дуже маленьких деталей до цілого автомобіля. Вони також можуть бути настільними системами, які утримують менші, складніші об'єкти на місці для сканування.

LIDAR (laser imaging, detection and ranging) використовує лазерний радар для виявлення деталей на малих об'єктах, що призводить до отримання 3D-зображень високої роздільної здатності. Замість вимірювання кута деформованого лазерного променя, він вимірює, скільки часу потрібно лазерному променю, щоб відбитися від об'єкта та повернутися. ЛІДАР також має масштабне застосування для картографування в геодезії, географії та лісівництві.

Галузі промисловості почали переходити на цифрову роботу відносно недавно, але практично всі проектні та інженерні завдання зараз виконуються таким чином. Саме тому 3D-сканування є настільки важливим для багатьох галузей промисловості – адже воно дозволяє фізичним об'єктам потрапляти в цифровий світ з високим ступенем точності. Приклади 3D-сканування численні, зокрема:

1) Виробництво. 3D-сканування дозволяє інженерам сканувати існуючі продукти для:

- Внесення ітеративних покращень
- Зворотного проектування застарілих деталей, яким бракує CAD-моделей
- Створення сітки для 3D-друку з існуючого об'єкта без витрат часу на створення моделі з нуля
- Виконання детальних перевірок контролю якості виготовлених деталей
- Збору детальних даних для аналізу кінцевих елементів (FEA) та обчислювальної гідродинаміки (CFD)
- Відтворення точних траєкторій різання на верстатах з ЧПК для відновлення старих деталей

2) Архітектура, інженерія та будівництво. Компанії з будівництва та проектування часто використовують 3D-сканування для фіксації існуючих (як побудовано) умов конструкції перед реконструкцією, створення кошторисів проекту без відвідування об'єкта, обміну оновленнями проекту в процесі роботи із зацікавленими сторонами, проведення віддалених структурних перевірок та створення цифрового двійника будівлі для управління об'єктами.

3) Охорона здоров'я. 3D-сканування в охороні здоров'я дозволяє створювати продукти, які точно відповідають людському тілу. Це може бути що завгодно: від коронок та мостів у стоматології до індивідуальних ортопедичних та протезних виробів, які краще підходять та важать менше, функціональних каркасів для індивідуальних медичних імплантів, індивідуально виготовлених масок для обличчя для людей з опіками та індивідуально виготовлених інвалідних візків.

3D-сканування тіла також дозволяє медичним працівникам відстежувати зміни розмірів тіла з часом, а також швидко збирати точні дані про пацієнтів до та після операції.

4) Розваги. У фільмах, відеоіграх та середовищах віртуальної реальності 3D-сканування часто використовується для створення гіперреалістичної графіки, реалістичних цифрових персонажів та складно деталізованих об'єктів.

4. АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ

4.1 Історія виникнення 3D-друку.

Ми не можемо уявити життя без принтерів або копіювальних апаратів, які є звичайним офісним обладнанням, а останнім часом стали необхідністю і в будинках. Звичайні принтери та копіювальні машини друкують дані на двовимірному папері. На цьому етапі цікавість людей не зупинилася, і вони давно хотіли реалізувати друк даних у трьох вимірах. Однак важко було отримати натхнення, просто розширивши існуючу технологію двовимірної (2D) друку.

Перші технології 3D-друку з'явилися в кінці 1980-х років. Їх називали швидке прототипування (Rapid Prototyping). Це тому, що дані процеси спочатку були задумані, як швидкий і більш ефективний метод для створення прототипів. Швидке прототипування (Rapid prototyping) – спосіб отримання виробів, технологічною особливістю якого є послідовне «додавання» (additive) матеріалу, на противагу «видалення» (subtractive) матеріалу при звичайних технологіях (фрезерування, електроерозійна обробка і т. п.) або зміни форми заготовки (кування, штампування, пресування).

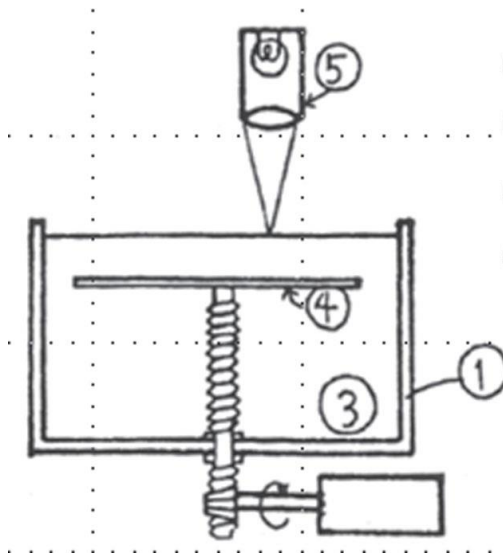
На початку 80-х найкращим методом виготовлення 3D-моделі було використання голографічних технологій. Голографічні методи можуть забезпечити тривимірні зображення, але вимагають обладнання для відтворення, а для отримання голограм для неіснуючих об'єктів потрібно безліч складних обчислень.



Рис. 4.1 – Хідео Кодама

Доктор Хідео Кодама (рис. 4.1) з Нагойського муніципального науково-дослідного інституту промисловості шукав найпростіший метод. У 1981 році доктор Хідео Кодама виникла ідея реалізувати тривимірний (3D) друк, і він записав її по дорозі додому з виставки, де він побачив технологію фотозатвердіння полімерів, яка злилася з його інтересом та знаннями в галузі тривимірного автоматизованого проектування. Однак, його ідея занадто випередила свій час у 1980-х роках, коли навіть 2D-принтери були дорогими, а його ідея ігнорувалась, принаймні, в Японії.

Особливість цього методу в тому, що 3D модель може бути реалізована за рахунок впливу ультрафіолету, процес, який легко піддається автоматизації. Крім того, його метод може створювати складні конструкції, які неможливо виготовити за допомогою механічної обробки з числовим програмним керуванням. На рис. 4.2 показано основну концепцію 3D-принтера. У цьому методі твердотільна модель виготовляється шляхом накладання шарів поперечного перерізу. Кількість шарів визначається з урахуванням складності бажаної форми та необхідної для цього точності. Коли рідкий фотоотверждаючий полімер піддається впливу ультрафіолетових променів, він твердне з поверхні. Отже, затверділий шар потрібної форми та товщини можна визначити, контролюючи площу впливу, інтенсивність і час у міру руху столика вниз.



① Розетка; ③ Жидкий фотоотвердє-
ваючий полімер; ④ Стадія; ⑤ Обо-
рудование для експонування

Рис. 4.2 – Базове обладнання три-
вимірного принтера

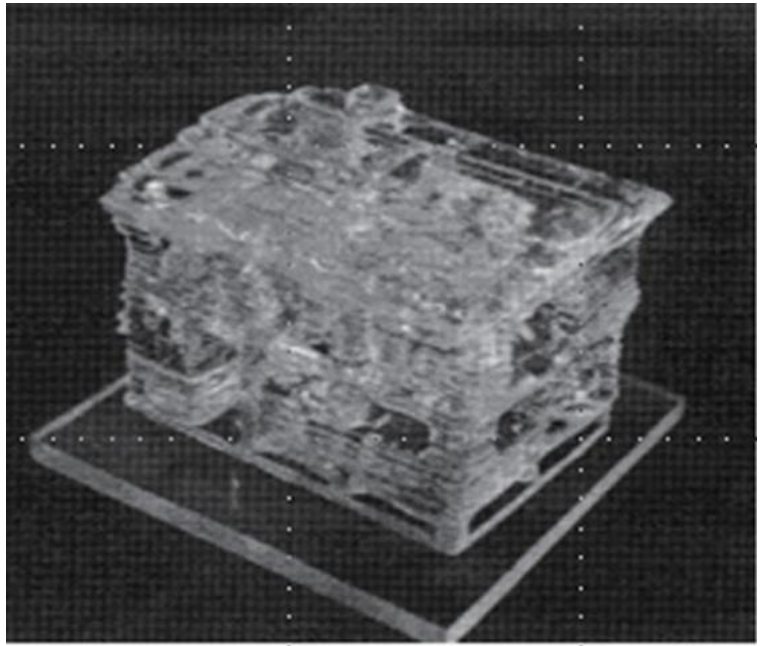


Рис. 4.3 – Фотографія першої 3D-моделі

На рис. 4.3 представлена фотографія першої 3D-моделі, виготовленої з використанням обладнання з УФ-оптичним волокном, приєднаним до XY-плотер.

Останніми роками ми спостерігаємо значний прогрес у технології 3D-друку. Ця технологія привернула велику увагу завдяки своєму високому потенціалу для впровадження інновацій в основні технології виробництва побутової електроніки та автомобілебудування, а також в інших сферах, таких як медицина та дизайн. Останнім часом метод моделювання став більш різноманітним, і моделювання може бути виготовлене з різних матеріалів, таких як пластик і метал, що допомогло розширити застосування 3D-принтерів.

Доктор Хідео Кодама подав заявку на патент на свою систему швидкого прототипування у Японії у травні 1980 року. Він описав свою систему так: чан з фотополімерним матеріалом піддається впливу УФ-випромінювання, яке твердне і буде модель шарами. На жаль, через проблеми з фінансуванням повний опис патенту не було заповнено протягом одного року після подання заявки.

На підтримку своїх експериментів д-р. Кодама написав дві фундаментальні статті щодо швидкого прототипу:

- Відображення тривимірних даних шляхом автоматичної підготовки тривимірної моделі: він докладно пояснює свою роботу і всі експерименти, що призвели до створення предка стереолітографії (SLA).

- Автоматичний метод виготовлення тривимірної пластикової моделі з фототвердіючим полімером, в огляді Scientific Instruments. У цій статті він описує три основні методи "3D-друку" для створення пластикових деталей шар за шаром з використанням фотополімеризації. Він також дає важливу інформацію для створення процесу стереолітографії.

Другою серйозною заявкою на успіх у створенні 3D-друку стали експерименти трьох французьких інженерів: Ален Ле Мехо, Олів'є де Вітта та Жана-Клода Андре (рис. 4.4). Одного разу у їдальні Ален Ле Мехо говорив з Олів'є де Віттом про свою ідею та проблему, з якою він зіткнувся, щоб винайти машину, яка могла б побудувати його «фрактальний об'єкт» з усією необхідною складністю. Олів'є де Вітт тоді працював над лазерами в компанії Cilas, дочірньої компанії Alcatel. Олів'є сказав йому: коли два лазери перетинаються, рідина (мономер) може стати твердим тілом (полімером).



Рис.4.4 – Доктор Жан-Клод Андре (другий ліворуч) отримує нагороду на Європейській конференції з швидкого прототипування та адитивного виробництва у 2013 році.

Вони використовували лазер, щоб спробувати збудувати «фрактальний об'єкт» Олена. Але перші експерименти провалилися і тоді, Жан-Клод Андре, фахівець із CNRS, запропонував будувати модель не з блоків, а шар за шаром. Таким чином вони змогли створити прототип гвинтових сходів. Інженери подали патент на процес стереолітографії за три тижні до американця Чака Халла та отримали його у 1986 році. Але CNRS та Alcatel, на базі яких проводилися дослідження, не побачили перспективи у технології стереолітографії, тому патент так і не використовували. Таким чином, трійці було дуже важко знайти фінансування для продовження створення їхньої чудової революційної машини. На жаль, їм довелося відмовитись від проекту. Ален Ле Мехо став учителем у Казані, Росія, Жан-Клод Андре

почав працювати у приватній компанії, а Олів'є де Вітт якийсь час керував французькою філією 3D System.

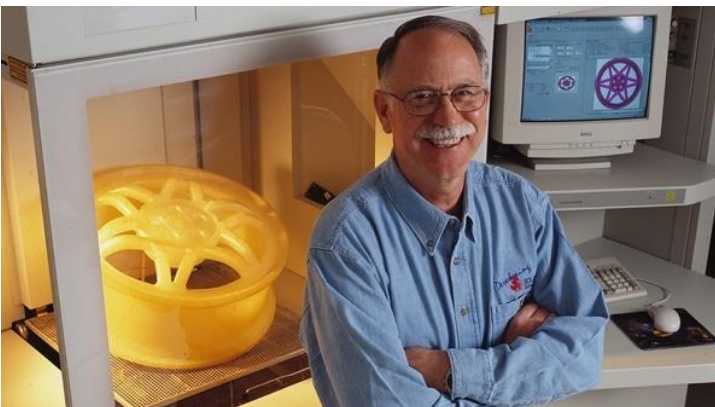


Рис. 4.5 – Чак Халл, винахідник 3D-друку

У багатьох джерелах батьком 3D-друку вважають Чарльза (Чака) Халла (рис. 4.5), саме він 8 серпня 1984 року подав заявку на патент технології, яку назвали «Апарат для створення тривимірних об'єктів за допомогою стереолітографії (STL)» (рис. 4.6).

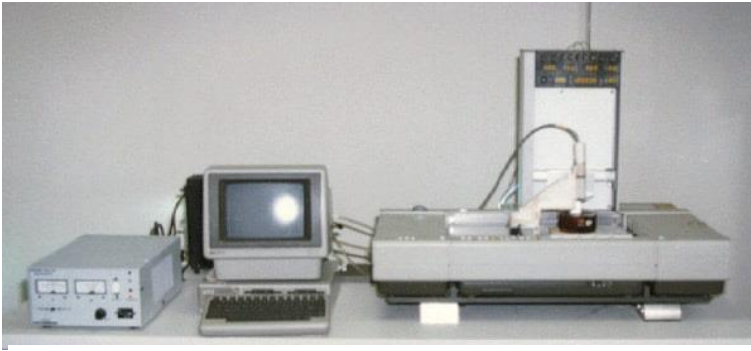


Рис. 4.6 – Перший 3D-принтер під назвою SLA-1

експериментувати і одного разу вночі він знайшов оптимальний зв'язок між УФ-світлом та фотополімерами. Експерименти Халла призвели до створення повноцінної 3D-моделі. Халл розбудив дружину від глибокого сну, покликав її до лабораторії і з великою радістю представив їй результат своєї роботи - чорну склянку для промивання очей (рис. 4.7). Саме вона стала першою у світі «офіційною» 3D-моделлю, виготовленою за технологією STL. Навіть якщо ентузіазм його дружини був обмежений, згідно з її власними твердженнями, Чарльз Халл тепер був цілком переконаний у своєму винаході. Тому він зареєстрував патент на цей процес 3D-друку у 1984 році.



Рис. 4.7 – Стаканчик для промивання ока, який у 1983 році став першою 3D-моделлю



Рис. 4.8 – Апарат SLA-250SLA-1

Після кількох змін роботи Халл на початку 1980-х опинився в невеликій компанії, яка використовувала УФ-світло для оснащення столів міцною пластиковою поверхнею та ремонтувала скатертини, покриття для підлоги тощо. Ефект, який УФ-світло чинить на світлочутливі поверхні зачарував. Він почав

У 1986 році, через два роки після подачі заявки на патент, Халл заснував свою компанію 3D Systems у Валенсії, штат Каліфорнія. Компанію по праву можна назвати першою у світі комерційною компанією із швидкого прототипування. Ця корпорація – одна з найбільших і найбільш плідних організацій, що працюють у 3D поліграфічному секторі до сьогодні.

Відгуки та рекомендації замовників були враховані під час виробництва моделі стереолітографічного пристрою – SLA-250 (рис. 4.8). У 1988 році було запущено серійне виробництво цієї моделі.

Що стосується матеріалів для 3D-друку, він використовував матеріали, які називають «фотополімерами». На акриловій основі вони рідкі на початку

процесу. Попадання ультрафіолетового світла змушує їх миттєво ставати твердими. Так працює процес стереолітографії (SLA).

Технологія формування об'ємних моделей з пошарового листового матеріалу (LOM) (рис. 4.9) з'явилася в 1985 році, за рік до отримання патенту Чарльзом Халлом на стереолітографію. Її автором вважається Михайло Фейген, який запропонував пошарово формувати об'ємні моделі з листового матеріалу: плівок, поліестеру, композитиву, пластику, паперу тощо, скріплюючи між собою шари за допомогою розігрітого валика.



Рис. 4.9 – Модель, виготовлена методом пошарового формування з листового матеріалу

Виготовлення моделі, зображеної на рис. 4.9, ручним способом зажадало кілька днів або навіть тижнів роботи, а за допомогою LOM-принтера така модель може бути відтворена за кілька годин.

Моделі, виготовлені за технологією М. Фейгена, виходять шорсткими, видалити зайвий матеріал з їхньої поверхні складно через ризик розшарування.

Практично в той же час, як і Халл (рис. 4.10), студент Техаського університету в Остіні Карл

Декард придумав альтернативну технологію 3D-друку – селективне лазерне спікання, або SLS. Під час роботи зі верстатом TRW, який виготовляв деталі для нафтових родовищ, Декард зрозумів, що його продуктивність можна збільшити за рахунок зменшення кількості виливків.



Рис. 4.10 – Карл Р. Декард та доктор Джо Біман з одним із перших SLS пристроїв формування з листового матеріалу

Близько двох з половиною років йому знадобилося, щоб розробити технологію, яка б виробляла деталі без лиття. Карл Декард подав патент на SLS у 1987 році та у 1989 отримав його. Основна відмінність його технології від стереолітографії - це матеріал, на який спрямований лазер: замість полімеру (смоли) Декарт впливав на сипучий порошок, перетворюючи його на тверду речо-

вину. Завдяки підтримці професора Джо Бірмана та інвесторам, які повірили в проект, з'явилася компанія Desk Top Manufacturing (DTM) Corp. Але знадобилося більше 20 років, щоб друк за технологією SLS став фінансово доступним звичайному споживачеві.

Технологія пошарового ущільнення (SGC) була розроблена ізраїльською компанією Cubital у 1987 році. По суті вона нагадує фотокопіювання. На вибірково зарядженій пластині, виготовленої зі скла, формується шаблон основи моделі. Цей шаблон міститься над тонким шаром фотополімеру, рівномірно розподіленим по робочій поверхні, після чого експонується ультрафіолетовим променем. Шар фотополімеру, що відповідає даному шару шаблону, стає твердим, рідкі залишки видаляються, а порожнечі заповнюються рідким воском, який швидко застигає. Описана послідовність дій багаторазово повторюється до того часу, доки сформується готова модель. Роботу машини можна зупинити видалення дефектних шарів, і потім відновити її.

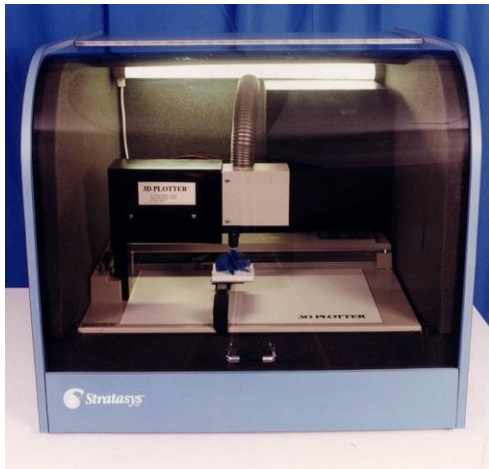
Апарат, заснований на технології SGC друку, використовує дорогі, токсичні і досить рідкісні полімери. Він працює досить гучно і потребує постійного контролю з боку оператора.

Історія Fused Deposition Modeling (FDM) почалася з особистої історії Скотта Крампа: він хотів створити іграшку для своєї 2-річної дочки. Як інженер-механік, він також хотів поекспериментувати з машиною, яка автоматично створювала тривимірні об'єкти. На своїй кухні він намагався змішати віск свічки із пластиком (поліетиленом). Використовуючи пістолет для гарячого клею, він зрозумів, що може створити об'єкт у 3D. Спочатку іграшкове жабення було з обпаленого пластику. Дружина переконала його перенести проект у гараж та продовжити експерименти. Він хотів автоматизувати процес. Він подумав, що якщо цей пістолет для клею приєднати до роботизованої портальної системи XYZ, процес моделювання можна буде виконувати автоматично.

Суть технології полягає у наступному. У друкувальній головці матеріал (розплав із пластику, металу, ливарного воску) попередньо розігрівається до температури плавлення і надходить у робочу камеру. Головка випускає розплавлений матеріал у вигляді нитки, що укладається на робочий стіл. Після цього платформа опускається нижче за товщину одного шару, щоб можна було сформувати наступний шар. У міру того, як він заглиблювався у свої експерименти, його дружина дуже радила йому перетворити своє захоплення на бізнес або кинути його.

У 1989 році разом із дружиною Лізою Крамп, яка всіляко переконувала чоловіка перетворити відкриття на бізнес, вони запатентували технологію FDM. У 1992 році Скотт створив перший 3D-принтер (рис. 4.11), що діє, з FDM. Незабаром подружжя стало співзасновником компанії Stratasys – одного із сучасних лідерів на ринку промислових 3D-принтерів.

Менш ніж за десять років народилися три технології 3D-друку, що змінили перебіг подій: стереолітографія (SLA), селективне лазерне спікання (SLS), моделювання методом наплавлення (FDM).



а



б

Рис. 4.11 - Перший діючий 3D-принтер Stratasys 1991 року (а) та перша деталь яка виготовлена на FDM 3D-принтері (б).

Незважаючи на те, що у 1980-х відразу кілька винахідників зробили прорив, відкривши стереолітографію та інші види 3D-друку, до початку 2000-х, технологія не набула широкого поширення. По-перше, вартість та масштаби обладнання: довгий час закуповувати обладнання для виробництва тривимірних деталей могли собі дозволити лише автомобільна та аерокосмічна галузі. По-друге, перші 3D-моделі були крихкими, обмеженими за формою та матеріалами, з яких створювалися, тому на тривалий час ширше поширення 3D-друку здавалося безперспективним.

У 2000 році була впроваджена технологія «Селективного лазерного плавлення» (SLM) Хон Корпорація та Sciaky Inc були першопрохідцями в цій технології.

У 2000 році представлено технологію PolyJet. У 2005 році з'явився проект RepRap (Replicating Rapid Prototyper) (рис. 4.12). Основною ідеєю доктора Едріана Бауера з Університету Бата стала можливість 3D-принтера відтворювати власні деталі з відкритим кодом. У 2006 році вчені вперше успішно відтворили деталь для «дочірнього» принтера на «батьківському».

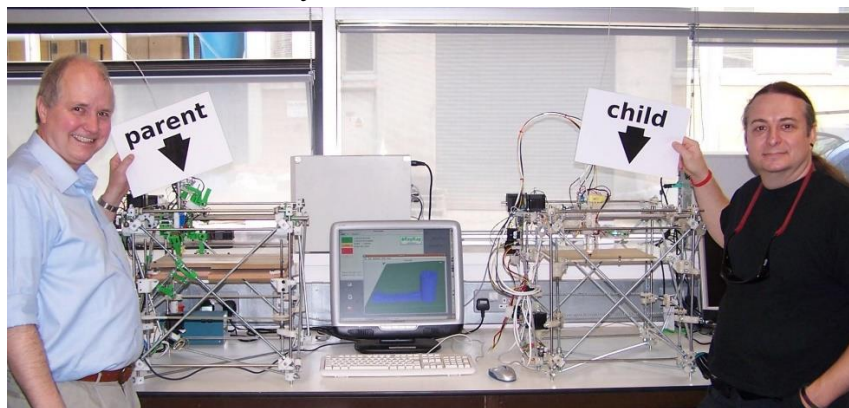


Рис. 4.12 - Пластикові деталі для машини праворуч були виготовлені на ліворуч. Адріан Бауер (слі-ва) та Вік Оллівер (праворуч) – учасники проекту RepRap0 .

Перший подібний принтер під назвою Darwin випустили в 2007 році. Потім були Mendel, Prusa Mendel і Huxley – всі вони були названі на честь біологів-еволюціоністів. За наступні кілька років RepRap змогли відтворити більше 50% деталей. Така технологія не лише дозволила більше без глобальних обмежень використовувати 3D-принтери, щоб тестувати майбутні репліки вихідних пристроїв, а й заощаджувати на виробничих процесах.

Це призвело до появи моделей Prusa MK3 або Lulzbot Mini 2. Обидві машини використовують велику кількість надрукованих деталей, і їх виробники надають STL-файли для скачування. Більше не потрібно було спиратися на дорогі деталі, виготовлені на комерційних 3D-принтерах. З кожним роком кількість реплік, які створювалися за допомогою батьківських принтерів, а потім і дочірніх, зростала і в 2008 році переважила за сотню.

Не тільки інженери та вчені були зацікавлені зробити тривимірний друк доступним для всіх. У 2009 році запустилася краудфандингова платформа Kickstarter, на якій десятки компаній та приватних осіб збирали гроші на проекти зі створення масових та недорогих 3D-принтерів.

Настав час настільних принтерів. В 2009 році хлопці з Marketbot здійснили мрію багатьох інженерів-самоучок. На ринок випускають набори DIY з відкритим вихідним кодом для всіх, хто хотів створити власні 3D-принтери та моделі. Після цього компанія відкриває онлайн-бібліотеку Thingiverse, де користувачі можуть завантажувати та завантажувати готові файли для 3D-друку. До цих пір Thingiverse залишається найбільшим сховищем та онлайн-ком'юніті у даній індустрії.

4.2 Конструкція FDM 3D-принтера та його основні параметри

FDM-принтер розрізняються за кінематичною схемою пристрою: декартові та дельта. Кожен тип сильно відрізняється від інших.

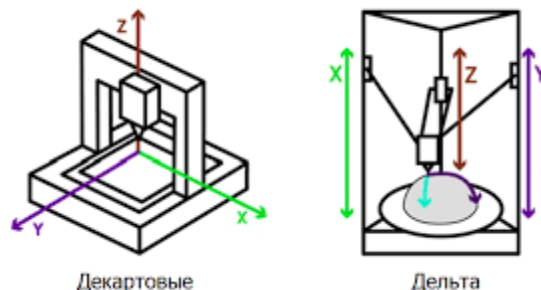


Рис. 4.13 – Схеми кінематики 3D-принтеру

Найпопулярніша схема кінематики серед FDM-машин здійснюється на основі трьох Декартових осей - X, Y, Z. Найчастіше екструдер пересувається по одній горизонтальній осі і одній вертикальній, а платформа рухається по іншій горизонтальній осі. Тим не менш, існують і альтернативні схеми переміщення.

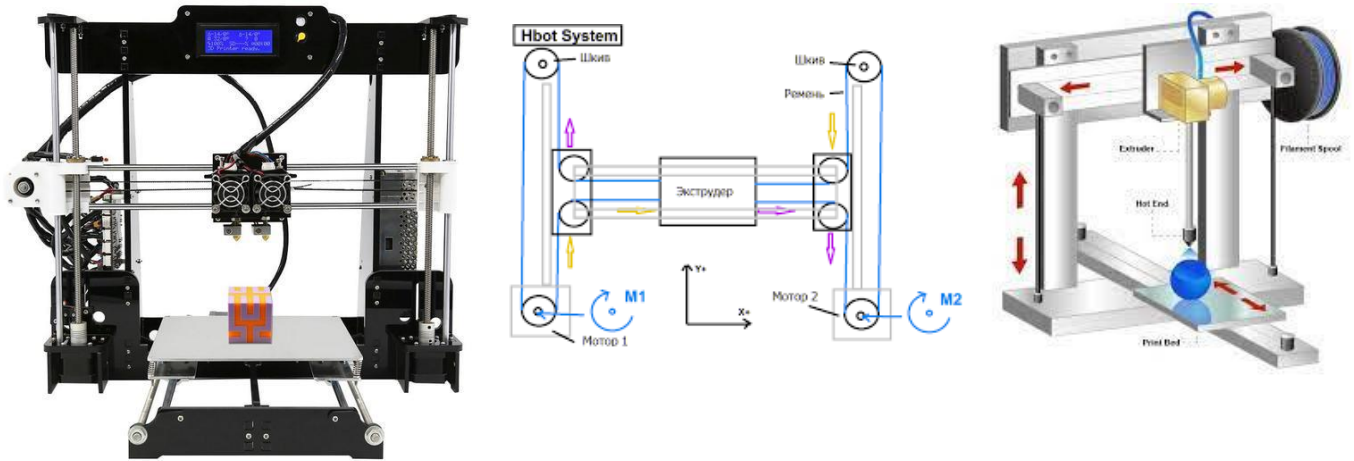


Рис. 4.14 – 3D-принтер декартового типу

Декартова система, яка має безліч переваг, саме тому вона є найпоширенішою серед любителів об'ємного друку. А саме:

- Простота збирання. Зазвичай зібрані 3D-принтери коштують дорожче, через що є сенс купувати набори для самостійного збирання. Зі складанням та ремонтом принтера картезіанської системи може впоратися навіть новачок.
- Стабільність результатів. У порівнянні з іншими системами кінематики ці принтери мають відмінні показники точності та якості друку.

3D-принтер з Дельта-кінематикою має на увазі нерухомий стіл для друку та екструдер, що має три точки кріплення та пересування, що дає певні позитивні та негативні сторони.

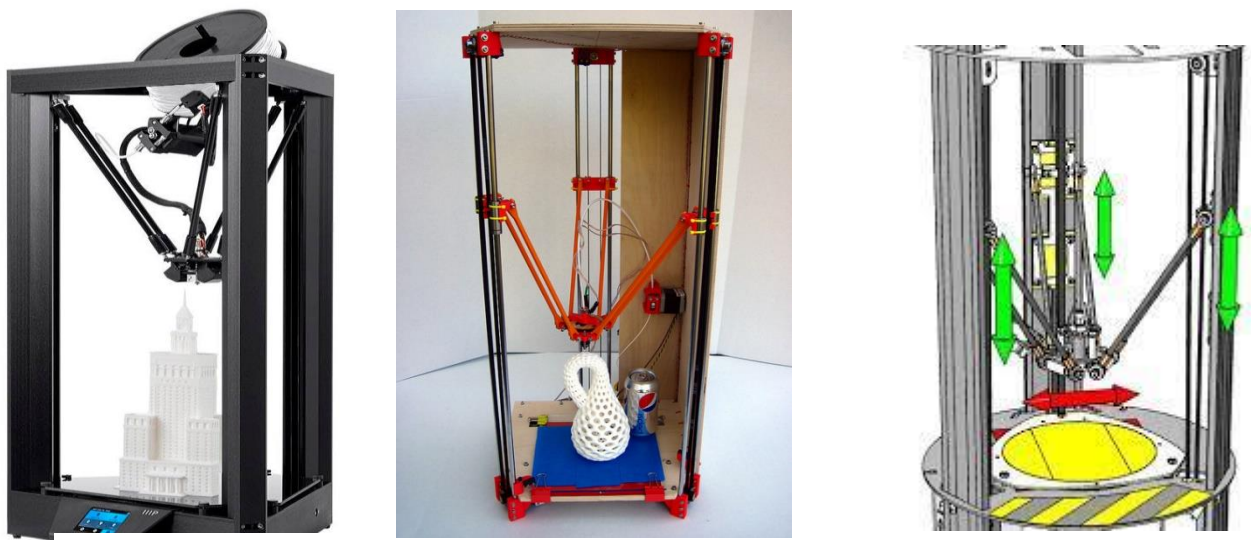


Рис. 4.15 – 3D-принтер с дельта кинематикой

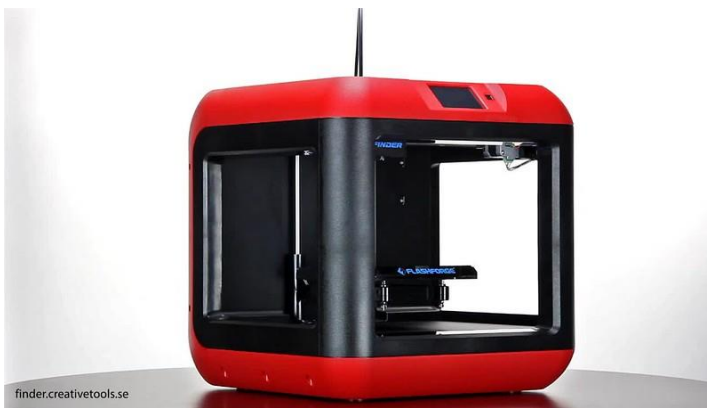
Переваги:

- **Компактність.** Принтери цієї системи часто займають мало місця в довжину та ширину, але можуть бути високими.
- **Друк високих деталей.** Незважаючи на те, що друк довгих і широких моделей скрутний, принтери системи дельта ідеально підходять для друку високих моделей (вази, склянки, башти та ін.).
- Деякі моделі принтерів можна подовжити.
- Вища швидкість друку порівняно з декартовою системою.

Недоліки:

- **Неточність.** Через специфіку системи кінематики, дельта принтерам властиво робити безліч помилок під час друку.
- **Складність конструкції.** Складність конструкції типу дельта набагато вища за декартову, що дає масу незручностей, а саме складність у самостійному складанні та ремонті.
- **праграмне забезпечення (ПЗ) та електроніка.** Так як система роботи з координатами сильно відрізняється і досить складна, то потрібна потужніша, а отже, і дорога електроніка. Це саме стосується і ПЗ.

Звичайний 3D-принтер складається з корпусу, двигунів, екструдера, столу та електроніки. Кожен із цих компонентів є невід'ємною частиною будь-якої FDM-машини.



а



б

Рис. 4.16 - 3D-принтер із закритим корпусом (а) та з відкритим (б)

Корпус – це каркас 3D-машини, на ньому тримаються всі компоненти. Він може бути або відкритим, або закритим. Незважаючи на те, що принтери із закритим корпусом дорожчі, вони мають ряд переваг:

- Шумоізоляція.
- Ізоляція механіки від бруду, пилу, волосся, шерсті тварин, дітей.
- Захист від протягів та перепадів температур (вони небезпечні для інженерних пластиків).
- Їдкий запах пластику (ABS) не поширюється на все примыщення.

- Більш якісний друк інженерними пластиками (ABS, Nylon, HIPS).

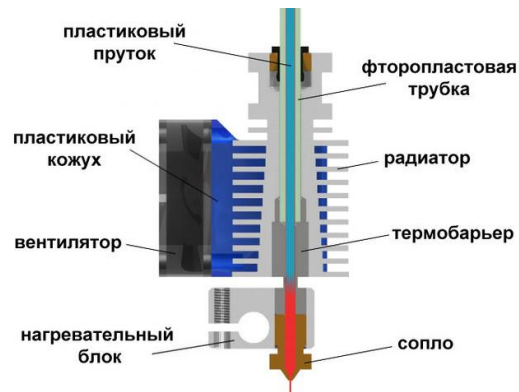
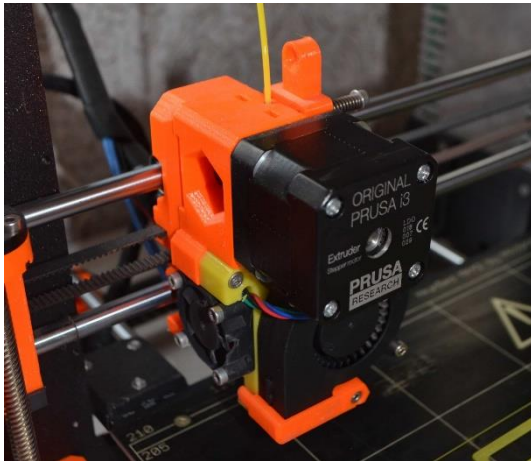


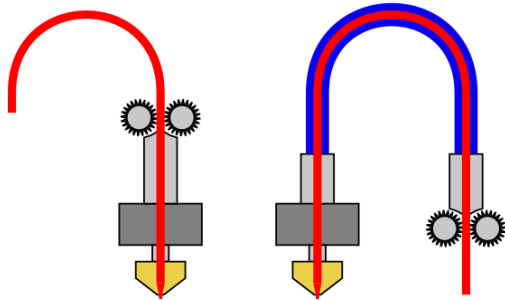
Рис. 4.17 – Экструдер

Екструдер є невід'ємним елементом будь-якого 3D-принтера. Цей інструмент призначений для розплавлення пластикової нитки та видавлювання її на стіл. Є два типи подачі матеріалу через екструдер.

Пряма подача здійснюється кроковим двигуном безпосередньо в екструдер, двигун знаходиться на каретці.

Плюси:

- Швидка заміна пластику.
- Для подачі матеріалу не потрібний потужний двигун.
- Мінімальна похибка у подачі пластику.
- Можна друкувати гнучкими матеріалами.



Direct-drive

Bowden

Рис. 4.18 – Подача матеріалу

Мінуси:

- Складна конструкція створює проблеми при складанні та ремонті.
- Збільшується маса каретки за рахунок двигуна, що подає.
- Через велику масу збільшується інерція, що може призвести до неточностей.

При боуден подачі двигун, що подає матеріал, розташований на корпусі принтера, а не на каретці. Матеріал проходить PTFE-трубкою в екструдер.

Плюси:

- Зменшене навантаження на каретку.
- Спрощена конструкція.
- Вище точність у порівнянні з прямою подачею.
- Вище швидкість.

Мінуси:

- Вкрай важко друкувати гнучкими матеріалами.
- Збільшується похибка у подачі пластику.
- Довга заміна пластику.
- Необхідний потужний двигун для подачі матеріалу в екструдер.

Діаметр сопла екструдера впливає ширину екструзії лінії 3D принтера. Це впливає на деякі елементи моделі. Якщо ви друкуєте на 3D принтері велику кількість замовлень, вам потрібно переконаватися, що екструдер подає потрібну кількість матеріалу. Якщо подається занадто багато матеріалу, то використовується більше нитки, ніж потрібно для вдалого 3D друку. Ну а менша кількість може призводити до браку. Або якщо ви друкуєте різні моделі, деякі з яких дуже докладні і хитромудрі, а деякі - більш практичні (наприклад, змінна ручка дверей), які просто потрібно роздрукувати швидко і з максимальною міцністю.

Немає простої відповіді на питання, який розмір сопла для 3D принтера найкращий. Вам потрібно зважити, чого ви хочете досягти і які елементи 3D моделі для вас найважливіші.

Залежно від вашого 3D принтера, сопло можна досить легко замінити (більшість з них встановлені на гвинти).

Найбільш поширеним стандартним розміром сопла є сопло 0,4 мм (або 0,35 мм), яке використовується більшістю сучасних виробників 3D принтерів. Причина цього в тому, що це досить великий і універсальний розмір сопла.



Рис. 4.19 – Сопло екструдера

Це означає, що ви можете друкувати з винятковою деталізацією і це не займе багато часу.

За допомогою сопла для 3D друку 0,4 мм можна друкувати до товщини шару всього 0,1 мм або до 0,3 мм. Чим менша висота шару, тим краще деталізація (по осі Z) і чим більша висота шару, тим швидше буде ваш 3D друк, але з гіршою якістю деталізації.

Інший поширений менший розмір – 0,25 мм. Деякі 3D принтери пропонують 0,2 мм, 0,15 мм, а Mass Portal навіть експериментує із соплами екструдерів для 3D принтерів 0,1 мм. Завдяки такому мініатюрному соплу їм вдалося роздрукувати механізм годинника з чудовою деталізацією.

Теоретично менші розміри сопла 3D принтера дозволяють досягти більшої точності. Але для багатьох 3D принтерів, особливо дешевих або старих моделей, сопло екструдера меншого розміру не обов'язково матиме значення, якщо ваш принтер не підтримує необхідну вищу роздільну здатність.

Чим менший розмір сопла в екструдері, тим більш детальну модель ви зможете отримати в результаті 3D друку. Тонке сопло відмінно підходить для складних моделей.

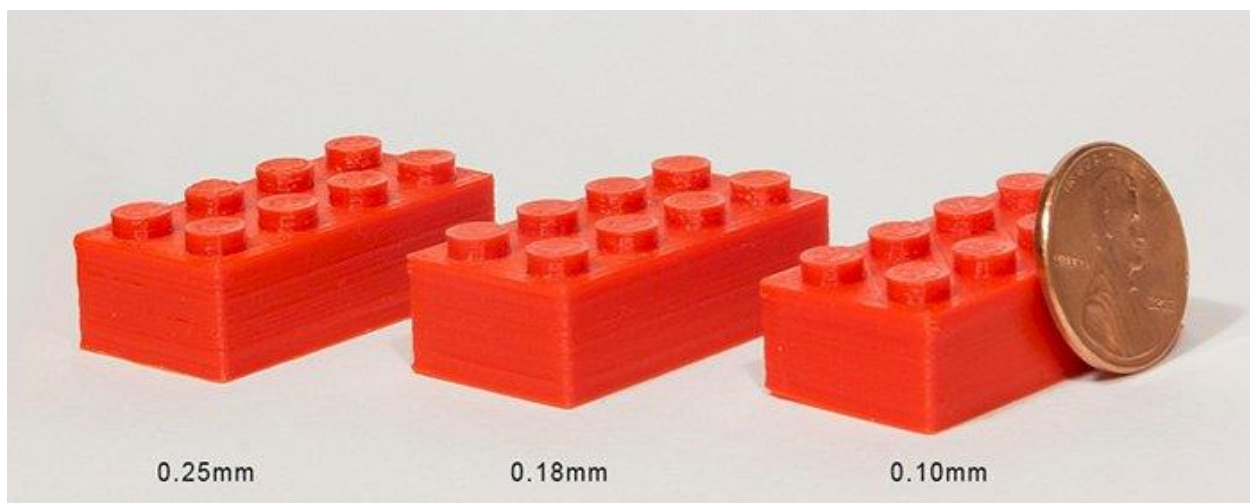


Рис. 4.20 – Вплив діаметру сопла

Варто від-

значити, що 3D принтер із соплом 0,2 мм подає вдвічі менше матеріалу, ніж сопло 0,4 мм. І це фактично призводить до збільшення часу друку в ті ж двічі. При цьому варто звернути увагу, що міцність та деталізація – це зворотні величини від часу. Так що для отримання якісних 3D моделей з використанням тонкого сопла та високої роздільної здатності в рази довше ніж при друку стандартним 0,4 екструдером. У деяких випадках це обґрунтовано, у деяких це марна трата часу.

У більшості випадків варто друкувати тонші шари з меншими діаметрами сопел і, як правило, товстіші шари з товстішими соплами. Просто зверніть увагу, що якщо ви друкуєте товстішим діаметром сопла і з дуже тонким шаром по висоті, вам потрібно буде знизити налаштування екструзії в слайсері, щоб запобігти надмірній подачі матеріалу. Якщо вам потрібна міцність і швидкість, а деталізація менш важлива, варто використовувати сопло 0,8 мм або навіть 1,0 мм. І не забувайте, що моделі, надруковані з соплом товщиною 0,8 мм, можуть бути дуже деталізованими, оскільки багато залежить також від вашого 3D принтера.

Варто відзначити, що композитні матеріали (будь-які нитки на основі частинок, такі як деревний наповнювач, мідний наповнювач, нейлон з вуглецевого волокна або армований склом нейлон) будуть викликати проблеми з екструзією при використанні тоншого сопла. Це з тим, що у цих нитках є частинки, які, хоча мають нанорозміри, можуть викликати проблеми під час проходження через сопла діаметром менше 0,4 мм. Для композитних матеріалів краще використовувати сопла не менше 0,5 мм, а для будь-якого металу, скла або матеріалів із вуглецевого волокна вам знадобиться загартоване сопло. Латунне сопло не прослужить довго і його діаметр збільшиться за кілька годин друку. Сопло 0,5 мм з нержавіючої сталі або сопло з вольфраму прослужить набагато довше для композитних матеріалів.

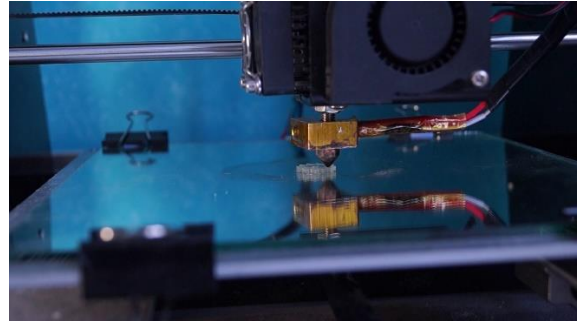
Стіл для друку в більшості своїй - це поверхня, що підігрівається, на яку здійснюється видавлювання розплавленого матеріалу екструдером. Завдання кожного

столу – утримувати модель на одному місці. Різні покриття справляються по-різному із цим завданням.

Плівка з поліефірміду використовується на багатьох принтерах. Такий вид покриття відмінно підходить, тому що вимагає мінімальних зусиль для друку.



а



б

Рис. 4.21 – Стіл з поліефірміду (ф) та скла (б)

Плюси:

- Має гарну адгезію із пластиком (ABS, PLA, PETG, TPU).
- Термостійка.
- Досить міцна.

Мінуси:

- Висока вартість.
- Необхідно щоразу знежирювати поверхню.
- Має погану адгезію, якщо друкувати без підігріву столу.

Скло також поширене серед 3D-принтерів. Скло може бути звичайним віконним, дзеркальним, боросилікатним, фосфатним, силікатно-вапняним та іншим.

Плюси дзеркала, закріпленого до столу 3D-принтера:

- Невисока ціна.
- Легко встановити.
- Легко досягти хорошої адгезії.

Мінуси:

- Крихкість.
- При спробі відокремити модель від скла можна порізатись, якщо тріснуть скло
- Низька термостійкість (але не всі типи).

Магнітна поверхня ще один тип покриття столу. Має шорстку поверхню, зроблену з магнітного матеріалу.

Плюси:

- Гнучкість.
- Невисока ціна.
- Чудова адгезія.

Мінуси:

- Необхідно знежирити кожні 3-4 принти.

- Іноді адгезія занадто сильна і відверти модель дуже важко.
- Згодом адгезивні властивості деградують.

Процес роботи 3D принтера зі столом із підігрівом 3D принтер працює шляхом видавлювання пластикової нитки на стіл. Відразу після виходу з екструдера матеріал починає охолоджуватися. Усадка йде пліч-о-пліч з процесом охолодження. Проблема виникає, коли шар не охолоджується поступово у всіх точках. Це призводить до нерівномірної усадки і, зрештою, до деформації всієї 3D моделі.

Щоб уникнути охолодження пластику з різною швидкістю в різних точках, було розроблено столи з підігрівом. Завдання 3D принтера, що підігрівається, полягає в тому, щоб гарантувати, що деталі не охолонуть повністю, поки 3D друк не завершена. Це дозволяє досягти більш рівномірного процесу усадки.

Коротше кажучи, столи з підігрівом переважно дбають про дві речі. Насамперед, за рахунок збільшення поверхневої енергії друкованого столу, нагрітий шар посилює адгезію першого шару. Друге – забезпечується досить висока температура нижнього шару, що дозволяє уникнути проблеми деформації на будь-якому етапі процесу друку 3D. Отже, шар, що підігрівається, максимізує ефективність і дозволяє уникнути надмірного охолодження шарів.

Конструкції столів із підігрівом для 3D принтера можуть відрізнятися. Серед найбільш поширених типів столів з підігрівом як нагрівальні елементи використовуються монтажні або друковані плати. Як правило, вони поставляються з бюджетними 3D принтерами. Однак це рішення не дуже підійде, якщо ваші проекти 3D друку складні та потребують частоті роботи з 3D принтером. Коротше кажучи, вони призначені для невеликих проектів, виконання яких не мало часу.

Причина, по якій вони не підходять для складної 3D друку, полягає в тому, що друковані плати зроблені з мідних та алюмінієвих пластин, а вони піддаються деформації при тривалому нагріванні. Згодом пластини з підігрівом перестануть виконувати те завдання, для якого спочатку було розроблено.

Є ще одна проблема, що може виникнути. Вони нагріваються довше. Ви можете позбутися цієї проблеми, але для цього вам потрібно буде замінити джерело живлення більш потужним.

Другий тип столу для 3D принтера з підігрівом – це той, у якому використовуються силікон, що герметизує нагріті елементи. Для створення конструкції елемент, що нагрівається, вставляється між шматочками скла і утеплювачем.

Це необхідно для мінімізації надлишкового витоку тепла та доставки максимальної кількості тепла до поверхні столу. Крім того, споживання електроенергії також стає меншим. І вони можуть працювати довше, не завдаючи жодних проблем користувачам.

Цей варіант конструкції столу з підігрівом набагато надійніший і може прослужити набагато довше.

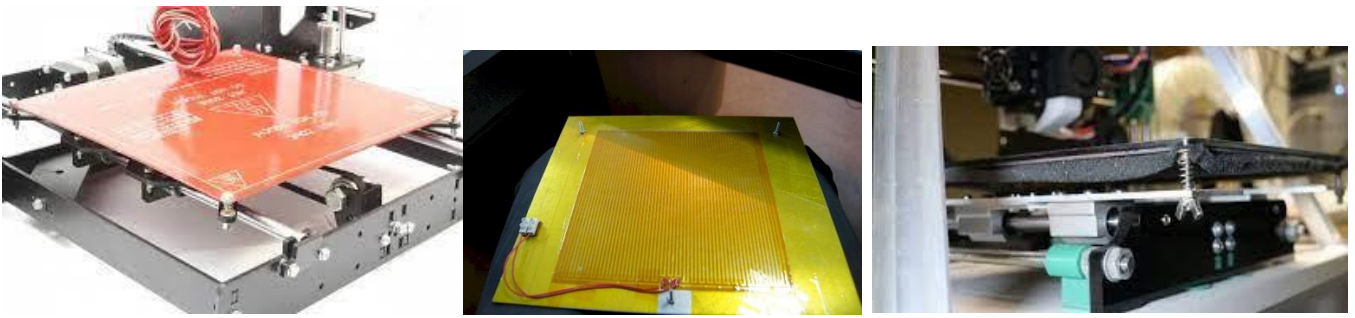


Рис. 4.22 – Стіл з підігрівом

Зв'язок висоти шару 3D друку та діаметр сопла. Висоти шару – це товщина кожної лінії екструдованого матеріалу, що становить кожен шар вашої моделі. Чим тонша висота шару (або товщина шару), тим дрібніша деталізація друку по осі Z (вертикальний розмір вашої моделі), але тим більше шарів буде потрібно, збільшується час друку. Для підтримки адекватного тиску висота шару має бути як мінімум на 20% менше ширини сопла - а в більшості випадків для досягнення найкращих результатів 3D друку вона повинна становити близько 50%. Таким чином, для сопла 0,4 мм потрібно буде друкувати з висотою шару 0,2 мм або до 0,3 мм. Ваш мінімум має бути

близько 0,1 мм. Якщо менше, то за фактом ви просто збільшуєте час очікування без особливої користі (на тому ж соплі розміром 0,4 мм).

Відстань від сопла до робочого стола 3D принтера. При правильному налаштуванні відстані між столом та соплом основа готової моделі повинна мати майже ідеально гладку, скляну поверхню. Для правильної установки відстані між соплом і столом 3D принтера необхідно використовувати вимірювальний щуп.

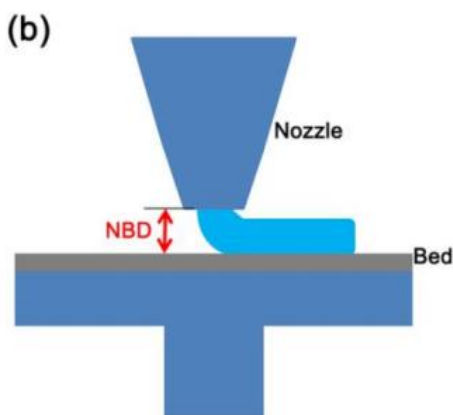


Рис.4.23 – Відстань від сопла до

4.3 Адитивні технології, що застосовуються у 3D-принтерах.

4.3.1 Моделювання методом пошарового наплавлення

Найбільш демократичний метод адитивного виробництва, моделювання плавним напиленням, працює шляхом видавлювання термопластичного полімеру через нагріте сопло та його осадження на стадії збирання. Ця адитивна технологія реалізована під марками MJS (Multiphase Jet Solidification, багатофазні затвердіння струменя), FDM (Fused Deposition Modeling, моделювання методом пошарового наплавлення), FFF (Fused Filament Fabrication, виробництво способом наплавлення ниток).

Моделювання методом наплавлення FDM, FFF є формою 3D-друку, що найбільш широко використовується на споживчому рівні, чому сприяло поширення аматорських 3D-принтерів.

Ці методи добре підходять для виготовлення базових експериментальних моделей, а також для швидкого та недорогого створення прототипів простих деталей, наприклад, деталей, які зазвичай піддаються механічній обробці.

Переваги технології: легкість перебудови з одного нетоксичного матеріалу на інший, низькі витрати і досить висока продуктивність, малі температури переробки, а також мінімальне втручання оператора у функціонування обладнання, можливість створення кольорових моделей, відносно точний процес. Недоліки: між шарами утворюються шви; головка екструдера повинна постійно рухатися, інакше матеріал застигне і засмітить її; можливе розшарування у разі температурних коливань протягом циклу обробки; груба вихідна поверхня. Невисока вартість FDM-принтера в окремих випадках власники принтерів можуть виготовити їх що знизить їх вартість.

Основною частиною принтера є екструдована голівка (рис. 24). У ній матеріал (ливарний віск або пластик, що надходять з котушок) нагрівається до температури плавлення і подається в зону друку. Голівка переміщається по двох координатах, синтезуючи певний шар моделі. Потім платформа опускається, створюється новий шар і т.д.

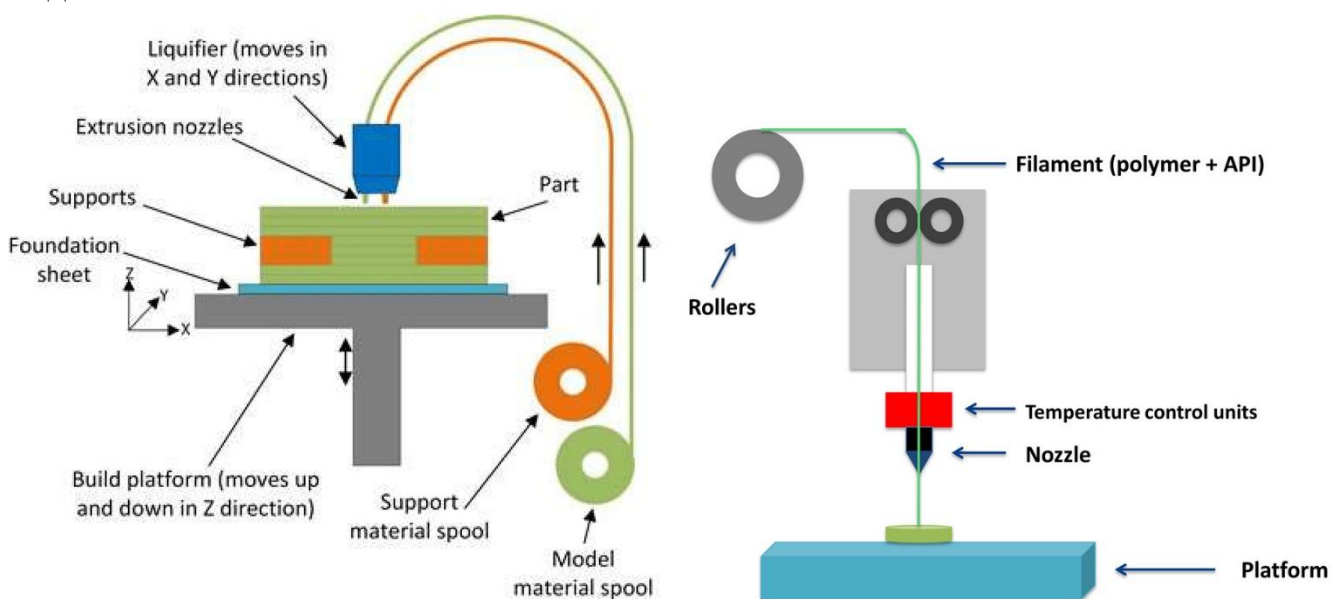


Рис. 4.24 – Принцип роботи FDM 3D-принтерів

Машини FDM є найбільш доступними, особливо для приватних осіб, які не мають бюджету. Багато брендів сьогодні доступні в готовому вигляді, наприклад

MakerBot і Ultimaker, два найпопулярніші настільні 3D-принтери, або можуть бути створені з використанням наборів для самостійного складання або з нуля та друку деталей для створення 3D-принтера FDM.

На моделях FDM часто помітні лінії шарів (рис. 25, а), а навколо складних елементів можуть бути неточності. Принтери FDM погано справляються зі складними конструкціями чи деталями зі складними елементами (рис. 25, б) (ліворуч) проти принтерами SLA (праворуч).



а



б

Рис. 4.25 – Недоліки роботи FDM 3D-принтерів

Принтери FDM мають найнижчу роздільну здатність. Хоча існують професійні та промислові 3D-принтери FDM, більшість принтерів цього типу є принтерами споживчого рівня, а це означає, що вони є найбільш доступним типом 3D-принтерів і в основному орієнтовані на помірну частоту друку для одного або кількох користувачів.

Етапи друку із застосуванням технології FDM:

1. Моделювання виробу, додавання необхідних текстур.
2. Друк плавленням пластиком шляхом екструзії (видавлювання).
3. Постобробка: за допомогою ацетону поверхня виробу робиться гладкою також відділення зайвих елементів таких як підтримки чи кайма.

Матеріали для 3D-друку, що використовуються для лиття методом наплавлення, є термопластичні полімери у формі нитки. Для цього типу процесу друку існує багато різних матеріалів. Він варіюється між промисловою та споживчою версіями. Пластик, що використовується в нитках FDM, зазвичай являє собою ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол), PLA (полімолочна кислота) і нейлон (поліамід), але також можуть використовуватися інші екзотичні різновиди матеріалів, такі як суміш пластику та дерева або вуглецю. На відміну від ABS, PLA є біорозкладним і популярним завдяки своїй нетоксичності. Існують також розчинні матеріали, такі як ПВА, що використовуються для підтримки. Але за допомогою цієї технології 3D-друку можна використовувати деякі інженерні матеріали (PA, TPU і PETG), а також деякі високоефективні термопластичні матеріали (PEI або PEEK).

Підвищити якість поверхні можна за допомогою хімічних та механічних процесів полірування. Для вирішення цих проблем у промислових 3D-принтерах FDM використовуються розчинні підтримуючі структури та пропонується ширший асортимент конструкційних термопластиків, але вони також коштують дорого.

Висота шару визначає якість 3D-друку. Деякі 3D-принтери FDM можуть мати дві або більше головок друку, які можуть друкувати різними кольорами.

4.3.2 Стереолітографія

Стереолітографія використовує рідкі модельні матеріали - фотополімерні смоли. Прикладом можуть служити стереолітографія (SLA STL Stereolithography Apparatus) - технологія компанії 3D Systems і DLP - технологія компаній Envisiontec, Digital Light Procession.

У принтерах SLA використовується процес, званий фотополімеризацією, тобто перетворення рідких полімерів на затверділий пластик за допомогою лазера. Лазерний промінь ближнього ультрафіолету фокусується та швидко малює 2D-секцію дизайну на тонкому шарі рідкої фотополімерної смоли. Потім світлочутлива полімерна смола вступає в реакцію і твердне, утворюючи єдиний двовимірний шар дизайну. Залежно від того, чи лазер виходить знизу (рис. 26) або зверху, об'єкт піднімається на один рівень глибини, все ще перебуваючи в контакті зі смолою, або на об'єкт наноситься новий шар смоли, відповідно. Потім процес повторюється для кожного нового шару дизайну, доки 3D-друкований об'єкт не буде готовий. Останнім кроком є очищення готового об'єкта, просоченого смолою, та видалення можливих опорних конструкцій.

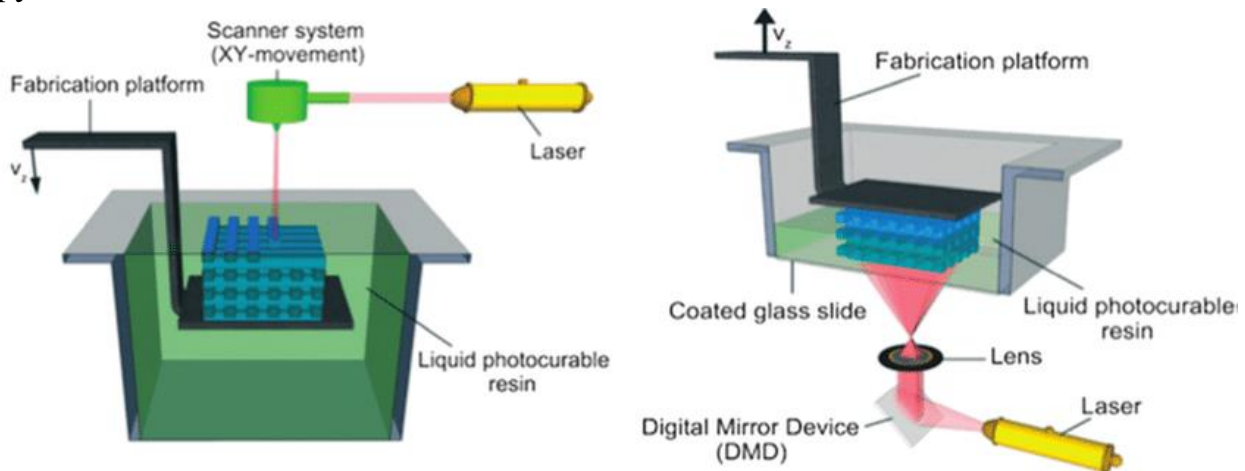


Рис. 4.26 - Принцип роботи SLA 3D-принтерів

Переваги технології: відносно точний процес, хороша деталізація деталей, гладка поверхня вихідної деталі. Недоліки: обмежений набір матеріалів, які фізично можуть використатися в процесі та неможливість створення кольорових моделей. Вартість установок розпочинається від 200 доларів США.

Моделі, надруковані на принтерах SLA (рис. 27), мають найвищу роздільну здатність та точність, найчіткішу деталізацію та найгладшу поверхню серед усіх технологій 3D-друку з пластиків, але головна перевага методу SLA полягає в його універсальності. Виробники матеріалів розробили інноваційні формули для полімерів SLA

з широким спектром оптичних, механічних та термічних властивостей, які відповідають властивостям стандартних, інженерних та промислових термопластиків.

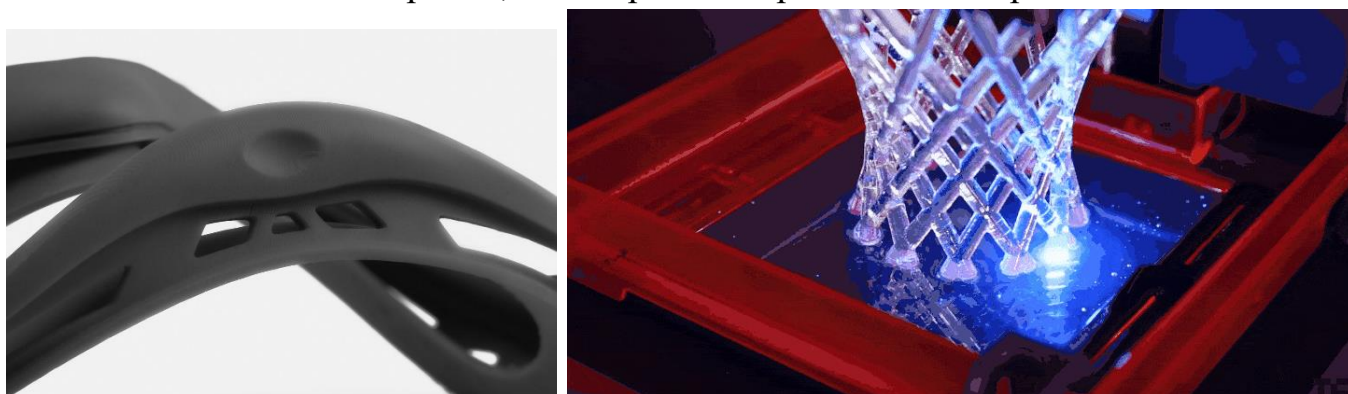


Рис. 4.27 – Модель отримана технологією SLA

SLA є чудовим варіантом для виготовлення високодеталізованих прототипів, що вимагають жорстких допусків та гладких поверхонь, таких як прес-форми, шаблони та функціональні деталі. Технологія SLA широко використовується у різних галузях промисловості: від машинобудування та проектування до виробництва, стоматології, ювелірної справи, створення моделей та освіти. Але деталі зі смоли, надруковані стереолітографією, не підходять для функціональних прототипів.

Існують різні способи друку SLA, як ми щойно бачили, головна відмінність полягає в їхній орієнтації. Це може бути процес «знизу догори» або «згори донизу», залежно від 3D-принтера. Справді, настільні 3D-принтери використовують висхідний метод, як 3D-принтери Formlabs, тоді як низхідний — це більш промислові 3D-принтери. Настільні SLA-принтери дешевші та простіші в експлуатації, тоді як промислові 3D-принтери дозволяють будувати об'єкти справді великих розмірів завдяки їхньому цікавому об'єму складання, але вимагають для роботи спеціалізованого техніка. Більш того, ці 3D машини дуже швидкі.

Ще одна особливість 3D-друку SLA полягає в тому, що потрібна опорна конструкція для друку вашої деталі зі смоли. Ці опори легше розробляти для настільних 3D-принтерів, оскільки вони дуже схожі на опори моделювання методом наплавлення (FDM). Вони необхідні для правильного друку будь-яких виступів та перемичок. Ви можете вибрати орієнтацію деталі, вибравши, яка орієнтація насправді вимагає менше опорної конструкції. Для промислових машин SLA, як і раніше, необхідна опорна конструкція. Усі ці опори повинні бути видалені вручну з надрукованої на 3D-принтері деталі.

Постобробка також є частиною виробничого процесу стереолітографії. Після закінчення процесу деталь знімається з платформи, з деталі необхідно видалити надлишки смоли. Потім деталь із смоли пройде процес затвердіння в УФ-печі, що допоможе кінцевій деталі досягти остаточної стабільності.

Стереолітографія пропонує безліч переваг, вона може допомогти вам швидко створити прототип або розробити кінцевий продукт цілком.

Фотополімерні деталі не мають такої міцності, як селективне лазерне спікання (SLS) або 3D-друковані деталі FDM, але, як правило, можуть досягати набагато вищого рівня деталізації та складної геометрії. Оскільки фотополімер чутливий до ультрафіолетового випромінювання, ці продукти схильні до деформації та зміни кольору на сонці. SLA зазвичай використовується для створення високодеталізованих ілюстрацій, нефункціональних прототипів і може використовуватися для виготовлення форм у додатках для лиття за моделями, що виплавляються.

Смола для прототипування SLA (стереолітографія) ідеально підходить для виробництва швидких естетичних прототипів. Готовий виріб має гладку матову поверхню. Смола SLA дозволяє отримати готовий вигляд вашого прототипу. Ця технологія 3D-друку SLA найкраще підходить для невеликих/середніх деталей із підвищеним рівнем деталізації.

SLA також користується популярністю як настільні 3D-принтери, але зазвичай продаються в готовому вигляді, наприклад, 3D-принтер SLA Form 2 від Formlabs або Ember від Autodesk. Технології FDM і SLA 3D - два дійсно ефективні методи виробництва. Однак такі принтери набагато дорожчі, ніж принтери FDM.

4.3.3 Селективне лазерне спікання

Селективне лазерне спікання - плавка матеріалу в заздалегідь сформованому шарі. Використовується в Selective Laser Sintering SLS-технологіях, що використовують як джерело енергії лазер або термоголовку (SHS компанії Blueprinter). Використовується такими компаніями, як, наприклад, DTM корпорації EOS. Суть технології полягає в пошаровому спіканні лазерним променем порошкового матеріалу. У робочій камері він попередньо підігрівається (рис. 28), трохи не доходячи до температури плавлення. Після розрівнювання порошку по поверхні зони обробки, лазером (як правило це вуглекислотний лазер) спікається потрібний контур, далі насипається новий шар, розрівнюється, і процес повторюється. Готова модель витягується з камери, а надлишки порошку видаляються. Нераспилений порошок підтримує модель під час друку і встановлює необхідність в спеціальних підтримувальних структурах. Завдяки цьому технологія SLS ідеально підходить для виготовлення деталей зі складною геометричністю, в тому числі з внутрішніми елементами, канавками, тонкими стенками і негативним уклоном. Моделі, виготовлені за допомогою SLS-друку, мають чудові механічні характеристики: їх міцність можна порівняти з міцністю деталей, відлитих під тиском.

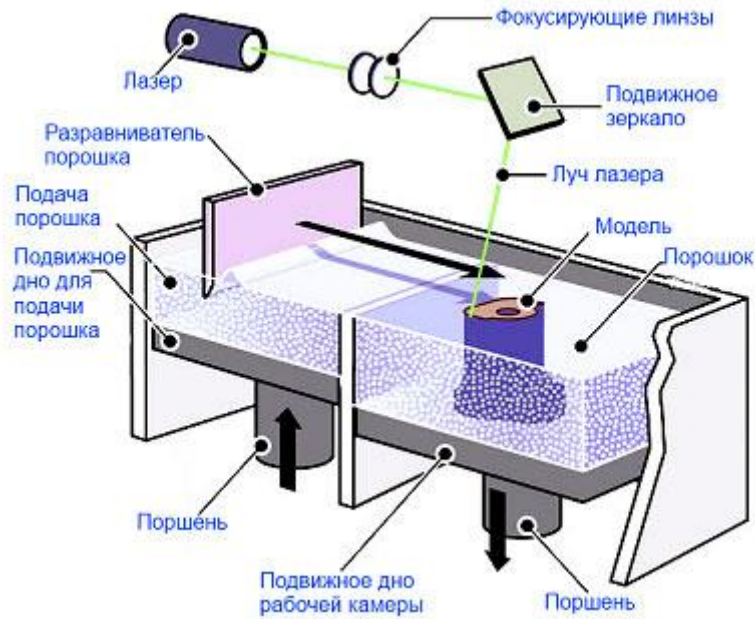


Рис.4.28 – Принцип роботи принтеру на SLS технології

Переваги технології: широкий спектр недорогих і нетоксичних матеріалів (порошкові полімери, ливарний віск, нейлон, кераміка, металеві порошки), низькі деформації та напруги, можливість одночасно робити відразу кілька моделей в одній камері. Недоліки: менш точний процес, груба вихідна поверхня, неможливо створювати кольорові моделі.

Моделі, створені за технологією SLS (рис. 29), мають слегка шероховату поверхню, але практично не мають видимих лінійних шарів.

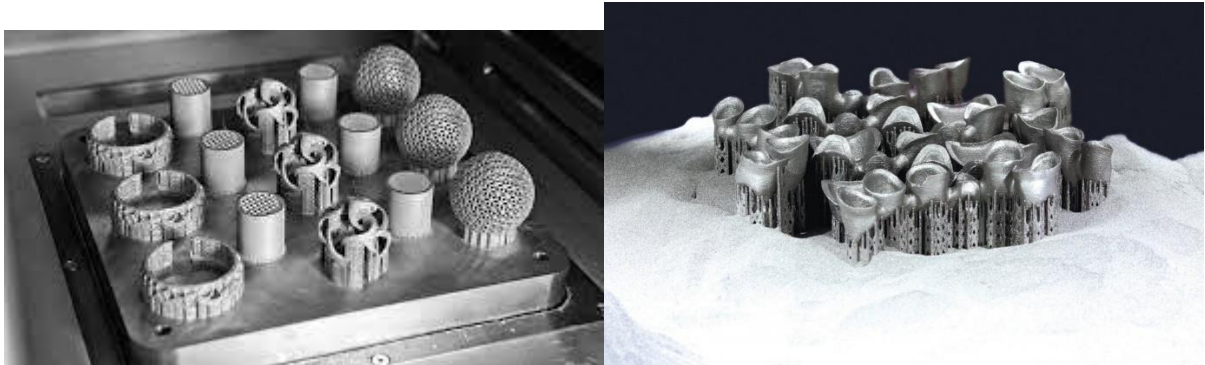


Рис. 4.29 - Селективное лазерное спекание (SLS) металлического порошка

Завдяки комбінації низької самостійності деталей, високої продуктивності та широко використовуваних матеріалів, SLS є популярним методом інженерно-функціонального прототипування та економічно вигідною альтернативою літнього формування у випадках виробництва обмеженого об'єму партій.

Застосуванням цього процесу 3D-друку є користувацькі товари, архітектурні моделі, дрони, робототехніка, спецтехніка, ювелірні вироби та годинники, спортивне обладнання, взуття, ортопедичні технології, освіта, медичні пристрої, корпуси для електроніки, медичні пристрої, скульптури, пристосування. і світильники, рекламні предмети та багато іншого.

4.4 Матеріали для 3D-друку.

4.4.1 Полімерні матеріали

Всі матеріали для тривимірного друку можна розділити на полімерні матеріали та метали. Поділ за технологіями тривимірного друку є не зовсім правильним, адже один і той самий матеріал може застосовуватися в декількох методах.

Полімерні матеріали:

1) ABS-пластик, Акрилонітрілбутадієнстірол. Це найпопулярніший і один з кращих витратних матеріалів для 3D-друку. ABS не має запаху, не токсичний, ударостійкий і еластичний. Температура плавлення становить від 240°C до 248°C. У продажу зустрічається у вигляді порошку або тонких пластикових ниток, намотаних на котушки, як показано на рис. 30.



Рис. 4.30 –ABS-пластик для 3D-принтера

3D-моделі, зроблені з ABS-пластика, довговічні і міцні. Асортимент кольорів ниток дуже великий, дозволяє втілити будь-яке кольорове рішення, але за допомогою цього матеріалу неможливо отримати прозорі моделі, адже прозорого ABS-пластика не існує.

Це ідеальний матеріал для інженерних застосувань і конструкторських бюро, також може використовуватись в різних пристроях, які припускають помірний механічний вплив. Нерідко застосовується в автомобільній промисловості. При обробці ацетоном, готові вироби здобувають

блискучу глясову поверхню, за рахунок чого можливо також застосування матеріалу в декоративних цілях.

Особливості матеріалу: стійкий до лугів і кислот; ударостійкий; вологостійкий; не переносить уф промені (розтріскується); діелектрик; має велику усадку; розчинний в ацетоні, кетонах і 1,2-діхлоретані.

Таблиця 4.1 - Технічні характеристики:

Густина	1.02-1.06 г/см ³
Міцність при розтягуванні	35-50 МПа
Міцність при згині	50-87 МПа
Міцність при стисканні	46-80 МПа
Відносне подовження	10-25 %
Температура розм'якшення	90-105 °C
Максимальна температура тривалої експлуатації	75-80 °C
Рекомендована температура друку	220 – 250 °C
Температура платформи	100 – 110 °C
Швидкість друку	40 – 90 мм/с

Застосування акрилу в 3D- друку досить вузьке (рис. 31), він використовується для створення прозорих моделей. У використанні акрил складний, необхідно враховувати, що для даного матеріалу потрібна вища температура плавлення ніж для ABS-пластика, він так само швидко остигає і твердне, у зв'язку з цим в моделі з'являється

багато дрібних повітряних бульбашок, які можуть викликати візуальні спотворення у вигляді каламутності виробу.



Рис. 4.31 – Изделия, напечатанные из акрила

Акрил використовується в 3D друку для створення прозорих моделей. При використанні акрилу необхідно враховувати наступні особливості: для даного матеріалу потрібна більш висока температура плавлення, ніж для ABS-пластику, і він дуже швидко остигає і твердіє.

Друк нейлоном схожий з печаткою ABS-пластиком. Але для друку нейлоном потрібна вища температура друку, що знаходиться в діапазоні від 310°C до 325°C. У нейлону висока здатність вбирати воду, а також більш тривалий період застигання. Великі незручності викликає необхідність відкачки повітря з екструдера через токсичність компонентів нейлону, або друк під потужною вен-

тиляційною системою. Через низький коефіцієнт тертя нейлону в екструдері необхідно замінити механізм на спеціальний, з великим коефіцієнтом зацепу. Незважаючи на перераховані недоліки, нейлон з успіхом використовують в 3D друку, адже деталі з даного матеріалу виходять не такими жорсткими, як з ABS-пластика, і його можна використовувати в шарнірах ковзання.

Міцний матеріал для якісної 3D друку. За рядом характеристик значно перевершує ABS пластик. Вогнетривкий, витримує високі і низькі температури, легко піддається постобробці.

Ідеально підходить як для виробництва прототипів, так і для створення готових виробів і функціональних елементів. 3D пластик Nylon стійкий до більшості органічних розчинників і легко піддається механічній обробці. Здатний витримувати як високі, так і низькі температури. Вогнетривкий: протягом 30 секунд горіння відбувається самозагасання пластика.

Таблиця 4.2 - Технічні характеристики

Температура друку	230 – 260 °C
Температура столу	80 – 110 °C
Густина	1,12 г/см ³
Температура деформації	50 °C
Показник плинності розплаву (при 230 °C / 2,16 кг)	5 г/10 хв
Межа міцності на розрив	57 МПа
Відносне подовження на розрив	196%
Міцність на згин	57 МПа
Ударна в'язкість за Ізодом	15 кДж/м ²
Рівень вогнетривкості за стандартом UL94	UL94-V2

PLA-пластик – це самий екологічно чистий матеріал для 3D принтерів. Він виготовляється із залишків біомаси, силосу цукрових буряків або кукурудзи. Маючи

масу позитивних властивостей, PLA має два істотних недоліки. По-перше, виготовлені з нього моделі недовговічні і поступово розкладаються під дією тепла і світла. По - друге, вартість виробництва PLA дуже висока, а значить і вартість моделей буде значно більшою за вартість аналогічних моделей, виготовлених з інших матеріалів. За зовнішнім виглядом PLA нитка не відрізняється від ABS нитки.

PLA пластик відмінно схоплюється навіть на платформі без підігріву, практично не має усадки. Також у нього відмінна адгезія між шарами, завдяки чому менше видно пошаровість. За рахунок біорозкладаності, за температури експлуатації від 60 °C PLA пластик починає деформуватися, тому його не можна залишати під прямими сонячними променями, і розчиняється в кислотах. Відмінно піддається постобробці: його можна шліфувати, ґрунтувати, полірувати і фарбувати.

Таблиця 4.3 - Технічні характеристики:

Густина	1,24 г/см ³
Міцність при розтягуванні	10 – 60 МПа
Міцність при згині	88 – 119 МПа
Міцність при стисканні	55 – 70 МПа
Відносне подовження при розриві	1,5 – 3,8 %
Температура розм'якшення	60 °C
Максимальна температура тривалої експлуатації	50 °C
Рекомендована температура друку	190 – 220 °C
Температура платформи	0 – 50 °C
Швидкість друку	50 – 110 мм/с

Поліпропілен – це найбільш легкий пластик з усіх існуючих. Порівняно з поліетиленом низького тиску гірше плавиться і краще протистоїть стиранню. При цьому вразливий до активного кисню, і деформується при негативних температурах. РР поліпропілен харчовий – це один з найбільш поширених в промисловості матеріалів, який широко застосовується для виробництва упаковки, посуду, будь-якої харчової тари, дитячих іграшок, труб і т.д. У 3D друці він почав застосовуватися відносно недавно і не настільки активно як PLA і ABS пластики. З переваг поліпропілену варто відзначити нетоксичність, низьке водопоглинання, зносостійкість, високу ударостійкість і стійкість до перепадів температур. Проте, цей пластик погано переносить температуру нижче -5 °C. Крім того, він чутливий до прямих сонячних променів. А також, поліпропілен харчовий має високу усадку при охолодженні. Представлений матеріал підходить для роботи з практично усіма видами настільних FDM 3D принтерів.

Пластик РР (поліпропілен харчовий) – це пластик, який широко використовується в харчовій промисловості, для створення посуду і будь-яких механізмів, які так чи інакше причетні до процесу приготування їжі. Даний пластик також застосовується для виготовлення дитячих іграшок. Готова продукція з РР пластику характеризується невеликою масою, відрізняється простотою монтажу і експлуатації, а також надійністю і довговічністю.

Особливості:

- Висока ударна міцність
- 100% гідроізоляція
- Низька паро- і газопроникність

Стійкість до агресивного середовища, перепадів температурних режимів і багаторазових згинань.

Таблиця 4.4 - Технічні характеристики:

Густина	0,92 г/см ³
Міцність при розтягненні	35 МПа
Міцність при згині	25 МПа
Міцність при стисканні	45 МПа
Відносне подовження	250 %
Температура размягчения	160-168 °C
Максимальная температура длительной эксплуатации	100-110 °C
Рекомендуемая температура печати	200 – 210 °C
Температура платформы	80 – 90 °C
Скорость печати	50 – 110 мм/с

Поліетилен - це найпоширеніший вид пластмаси в світі, з якого виготовляють PET-пляшки, каністри, труби, плівки, пакети і т.д. У 3D-друку поліетилен низького тиску є неперевершеним лідером. Даний матеріал може бути використаний в будь-якій технології 3D-друку.

PET – це термопластичний полімер, який відрізняється високим ступенем прозорості, міцністю, помірною пластичністю та стійкістю до хімічних речовин. Він витримує широкий температурний діапазон і відмінно піддається обробці (свердління, пиляння, фрезерування, шліфування і т.д.). Матеріал стійкий до стирання, зносостійкий і має опір тертя. Підходить для широкого кола інженерних застосувань.

PET пластик має таку ж міцність, як ABS, але простий у використанні, як і PLA. Він водонепроникний та безпечний для харчових ємностей. Спочатку цей філамент кристально чистий і безбарвний, проте коли нитка PET нагрівається або охолоджується, її прозорість змінюється, вироби починають набувати білий відтінок. При повільному охолодженні матеріалу, він має більш прозору структуру.

Таблиця 4.5 - Технические характеристики:

Плотность	1,38 г/см ³
Прочность при растяжении	55 – 75 МПа
Прочность при изгибе	63 МПа
Прочность при сжатии	55 МПа
Относительное удлинение	9%
Температура размягчения	80°C
Максимальная температура длительной эксплуатации	75°C
Рекомендуемая температура печати	210 — 240°C
Температура платформы	около 100°C
Скорость печати	100 мм/с

На відміну від пластику в FDM 3D принтерах, в пристроях, що працюють за технологіями SLA і DLP застосовуються спеціальні фотополімерні смоли. Фотополімер або смола – це особлива рідка речовина, що твердіє під впливом світла. Найчас-

тіше для засвічення застосовується ультрафіолетове випромінювання. На сьогоднішній день існують фотополімерні смоли з різними фізичними та механічними властивостями, пристосовані під випалювання або виготовлення ливарних форм.

Фотополімерна смола – основний витратний матеріал, який застосовується в 3D принтерах SLA. У різних моделях принтерів застосовуються різні смоли.

Властивості фотополімерних смол можуть сильно відрізнятися, але в цілому вони збігаються з ряду параметрів.

Переваги роботи з фотополімерними смолами:

- Висока деталізація створюваних об'єктів. Технологія SLA високо цінується за рахунок відмінної якості відтворення виробів. Це дозволяє використовувати її для особливо тонких проектів, що вимагають високої точності друку;
- Вироби практично не вимагають подальшої обробки. За рахунок високої якості друку, поверхня об'єктів виходить рівною і гладенькою. При необхідності потрібно лише видалити підтримуючі структури;
- Низька витрата матеріалів. Навіть якщо враховувати високу вартість обладнання і смол, такий 3D друк вельми вигідний з фінансової точки зору;
- Різноманітні фізичні і механічні властивості полімерів, оптимальний тип і колір матеріалу.

4.4.2 Металеві матеріали

Металеві порошки – найміцніший матеріал для 3D-друку. Вироби, створені на металевих 3D-принтерах, за багатьма параметрами перевершують аналоги, вироблені за допомогою традиційних технологій.

Сировиною для процесу селективної лазерної плавки є металевий порошок сферичної форми, зазвичай з номінальним розподілом частинок розмірами 10-45 або 20-63 мкм.



Рис. 4.32 – Металеві порошки

Титан. Високоміцний біосумісний матеріал, застосовується в медицині, авіабудуванні, машинобудуванні, енергетиці.

Титановий сплав Ti6Al4V є найбільш широко використовуваним сплавом на основі титану у світі. Завдяки своїй високій міцності, низькій щільності та гарній корозійній стійкості Ti6Al4V відмінно підходить для виробництва деталей в аерокосмічній та автомобільній промисловості, а також у біомедичних додатках.

Характеристики матеріалу:

- Гарна корозійна стійкість;
- Висока питома міцність;
- Високоциклова втомна міцність;
- Висока міцність.

Титановий сплав TiAl15 є майже альфа-титановим сплавом з добавками алюмінію і цирконію. Висока питома міцність деталей з TiAl15 у поєднанні з високою несучою здатністю та термостійкістю дозволяють використовувати їх для виготовлення важконавантажених деталей у літакобудуванні та двигунобудуванні.

Характеристики матеріалу:

• Дуже хороші механічні властивості, у тому числі в діапазоні високих температур;

- Висока здатність навантаження навіть у багатовісних напружених станах;
- Висока питома міцність;
- Хороша зварюваність .

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість;
- Конструкція двигуна.

Титан Ti є комерційно чистим титаном з чудовою біосумісністю і хорошими механічними властивостями. Ti широко використовується в багатьох областях, що вимагають чудової корозійної стійкості, міцності, пластичності та низької щільності.

Характеристики матеріалу:

- Відмінна біосумісність;
- Відмінна корозійна стійкість до морської води;
- Хороша пластичність;
- Помірна сила.

Типові сфери застосування:

- Медичний;
- Аерокосмічна промисловість;
- Енергія;
- Хімічна/нафтохімічна;
- Теплообмінник.

Інструментальна і нержавіюча сталь. Різні сплави сталі – найпоширеніші матеріали для 3D-друку. Вони служать для вирішення широкого кола завдань в різних сферах, стійкі до корозії, мають підвищену міцність і зносостійкість.

Нержавіюча сталь 316L - це аустенітна сталь з високим вмістом хрому, яка добре переробляється на машинах адитивного виробництва. 316L часто використовується в деталях, що вимагають хороших механічних властивостей та відмінної корозійної стійкості, особливо у хлоридних середовищах.

Характеристики матеріалу:

- Дуже гарна корозійна стійкість;
- Висока міцність при підвищених температурах;
- Висока пластичність.

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна/автомобільна промисловість;
- Хірургічні інструменти;
- Харчова промисловість;
- Морські установки.

17-4PH являє собою мартенситну нержавіючу сталь із дисперсійним твердінням. 17-4PH підходить для застосувань, що вимагають високої міцності та твердості у поєднанні з помірною корозійною стійкістю.

Характеристики матеріалу:

- Зміцнюваний атмосферними опадами;
- Відмінна міцність на розтягування;
- Помірна корозійна стійкість;

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість;
- Медичний;
- Хімічна/нафтохімічна;
- Паперова/металообробна промисловість.

15-5PH – це мартенситна дисперсійно-твердіюча нержавіюча сталь, яка чудово переробляється на машинах адитивного виробництва. 15-5PH підходить для застосування, що вимагають високої міцності та твердості у поєднанні з помірною корозійною стійкістю. Сплав є версією 17-4PH без фериту.

Характеристики матеріалу:

- Зміцнюваний атмосферними опадами;
- Відмінна міцність на розтягування;
- Помірна корозійна стійкість.

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість;
- Медичний;
- Хімічна/нафтохімічна;
- Паперова/металообробна промисловість.

1.2709 є мартенситностаріюча інструментальна сталь з високим вмістом легovanого нікелю і деякої кількості молібдену. 1.2709 підходить для багатьох інструментів та деталей, що вимагають як високої міцності, так і ударної в'язкості.

Характеристики матеріалу:

- Мартенситне загартування;
- Висока міцність;
- Висока міцність на розтягування;
- Хороші властивості до 400°C.

Типові сфери застосування:

- Лиття під тиском;
- Інженерні частини;
- Автомобільний;
- Аерокосмічна промисловість.

H13 (1.2344) являє собою хромовмісну мартенситну інструментальну сталь. Цей матеріал використовується в інструментах, що вимагають виняткової міцності та ударної в'язкості.

Характеристики матеріалу:

- Висока міцність на розтягування;
- Помірна корозійна стійкість;
- Стійкість до термічного втомного розтріскування.

Типові сфери застосування:

- Лиття під тиском;
- Інструменти.

Fe-сплав Invar 36 є сталь з високим вмістом нікелю, яка має унікально низький коефіцієнт теплового розширення нижче температури Кюрі 280 °C. Invar 36 використовується в компонентах, що потребують високої стабільності в широкому діапазоні температур.

Характеристики матеріалу:

- Низький коефіцієнт теплового розширення нижче температури Кюрі 280 °C;
- Відмінні механічні властивості при криогенних температурах;
- Низька схильність до втоми при низьких температурах.

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість;
- Клапана в двигунах;
- Прецизійні інструменти.

Алюміній та його сплави - це легкі сплави, що володіють більш низькою щільністю, ніж інші метали для 3D-друку. Володіють хорошими легуючими властивостями та електропровідністю. Використовується в автомобілебудуванні, аерокосмічній галузі, промисловості.

AlSi10Mg – це сплав на основі алюмінію, який широко використовується в адитивній промисловості для виробництва функціональних деталей та прототипів. AlSi10Mg часто використовується в деталях, що вимагають хороших механічних властивостей та малої ваги.

Характеристики матеріалу:

- Дуже гарна корозійна стійкість;
- Хороша електропровідність;
- Висока динамічна міцність;
- Відмінна теплопровідність.

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість;
- Автомобільний;
- Інжиніринг;
- Теплообмінники.

Алюміній сплав AlSi10Mg можна порівняти зі сплавом серії 3000, який використовується в процесах лиття та лиття під тиском. Він має хороше відношення міцності до ваги, високу термостійкість і корозійну стійкість, а також втомну міцність, опір повзучості і розриву. AlSi10Mg також має властивості теплопровідності та електропровідності.

Основні переваги:

- Висока жорсткість та міцність по відношенню до ваги;
- Висока теплова та електрична провідність;
- Стійкість до високих температур та корозії.

AlSi7Mg0.6 є сплавом на основі алюмінію, який часто використовується в деталях, що вимагають чудової теплопровідності, хорошої корозійної стійкості або стійкості до деформації.

Характеристики матеріалу:

- Хороша електропровідність;
- Гарна корозійна стійкість;
- Гарна стійкість до деформації;
- Відмінна теплопровідність.

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість;
- Автомобільний;
- Теплообмінники;
- Дослідницька робота;
- Прототипування.

AlSi9Cu3 є сплавом на основі алюмінію, кремнію та міді. AlSi9Cu3 використовується в деталях, що вимагають гарної жароміцності, низької щільності та гарної корозійної стійкості.

Характеристики матеріалу:

- Хороша електропровідність;
- Хороша міцність при високих температурах;
- Висока теплопровідність.

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість;
- Автомобільна промисловість;
- Теплообмінники;
- Дослідницька робота;
- Прототипування.

Кобальт-хром. Стійкий до корозії біосумісний матеріал. Володіє високою міцністю, використовується в медицині та стоматології, а також у галузях з високими температурами.

CoCr28Mo6 є сплавом кобальту, хрому і молібдену з універсальним застосуванням. Завдяки своїй винятковій біосумісності CoCr28Mo6 використовується в медичній промисловості для виробництва імплантатів та протезів. Матеріал також використовується для виробництва компонентів для застосування в умовах високої температури, таких як реактивні двигуни.

Характеристики матеріалу:

- Виняткова біосумісність;
- Термостійкий;
- Стійкість до термічної втоми;
- Стійкість до окислення.

Типові сфери застосування:

- Медична промисловість;
- Аерокосмічна промисловість;
- Енергетика;
- Частина турбіни.

SLM MediDent є сплавом кобальту, хрому, молібдену та вольфраму, спеціально розроблений для застосування в стоматологічній промисловості. SLM MediDent використовується в основному для виробництва біосумісних зубних імплантатів та протезів.

Характеристики матеріалу:

- Біосумісний;
- Опір іржі.

Типові сфери застосування:

- Стоматологічний;
- Медичний.

Нікелеві сплави. Матеріал з прекрасною механічною міцністю та здатністю до зварювання. Стійкий до 3000°C. Використовується в авіації, енергетиці, виробництві інструментів та інших галузях.

НХ є сплавом на основі нікелю з високим вмістом хрому, молібдену та заліза. НХ є важливим сплавом для високотемпературних застосувань в агресивних середовищах ряду галузей промисловості.

Характеристики матеріалу:

- Висока сила;
- Хороша пластичність;
- Відмінна стійкість до окислення при високих температурах;
- Висока міцність на повзучості до 850 °C.

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість;
- Енергетика;
- Хімічна промисловість;
- Частини турбіни.

IN625 є дисперсійно-твердіючим матеріалом на основі нікелю, легований хромом, молібденом і ніобієм. IN625 є типовим матеріалом для виготовлення компонентів авіаційних двигунів, що працюють за температури нижче 650 °C.

Характеристики матеріалу:

- Висока міцність;
- Хороша пластичність;
- Чудова міцність на розрив при повзучості нижче 700 °C;
- Відмінна корозійна стійкість.

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість;
- Енергетика;
- Хімічна промисловість;
- Частини турбіни.

IN718 є дисперсійно-твердіючим нікель-хромовим сплавом. Маючи відмінну міцність на розтяг, втомну міцність, опір повзучості та розриву до 700 °C, сплав IN718 є важливим сплавом для виробництва компонентів авіаційних двигунів, (газових) турбін та інших високотемпературних застосувань.

Характеристики матеріалу:

- Висока міцність;
- Хороша пластичність;
- Відмінні механічні властивості до 700 °C;

- Відмінна стійкість до окислення.

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість;
- Енергетика;
- Хімічна промисловість;
- Частини турбіни.

IN939 є високолегованим матеріалом, що містить певну кількість хрому, кобальту, титану, вольфраму, алюмінію, танталу і ніобію. Завдяки механічним властивостям сплаву IN939 за високих температур цей сплав широко використовується в конструкції компонентів турбін.

Характеристики матеріалу:

- Висока міцність;
- Хороша пластичність;
- Відмінні механічні властивості при високих температурах до 700 °C;
- Відмінна стійкість до окислення.

Типові сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість;
- Енергетика;
- Хімічна промисловість;
- Частини турбіни.

Сплави на основі міді. Низьколегований мідний сплав CuNi2SiCr є сплавом, що термічно зміцнюється, з високою жорсткістю навіть при підвищених температурах. Завдяки низькому вмісту добавок властивості чистої міді (наприклад, міцність, температура розм'якшення) можуть бути значно покращені, тоді як інші властивості (наприклад, електропровідність, теплопровідність, корозійна стійкість) значною мірою зберігаються. Типовими областями застосування, наприклад, виготовлення інструментів, струмопровідні контакти в електротехніці або арматура.

Характеристики матеріалу:

- Збалансоване поєднання електро- та теплопровідності;
- Висока зносостійкість;
- Висока корозійна стійкість, зокрема, до корозійного розтріскування під напру-

гою.

Типові сфери застосування:

- Технологія зварювання;
- Електротехніка;
- Будівництво інструменту.

Бронза CuSn10 є мідно-олов'яним сплавом з високим подовженням і середньою твердістю. Бронза характеризується хорошими зносостійкими властивостями та стійкістю до атмосферної корозії та кавітації у морській воді. Типові області застосування включають компоненти та корпуси для пристроїв у морському середовищі.

Характеристики матеріалу:

- Хороші механічні властивості;
- Стійкість до кавітації у морській воді;
- Гарна корозійна стійкість;
- Гарна теплопровідність.

Типові сфери застосування:

- Морські пристрої;
- Теплообмінники.

4.5 Сфери застосування 3D-друку.

4.5.1 3D-принтери у медицині

3D-біопринтинг - технологія створення об'ємних моделей на клітинній основі з використанням 3D-друку, при якій зберігаються функції і життєздатність клітин. Перший патент, що відноситься до цієї технології, був поданий до США у 2003 році та отриманий у 2006 році. У 2010 році надруковано штучні кровоносні судини.

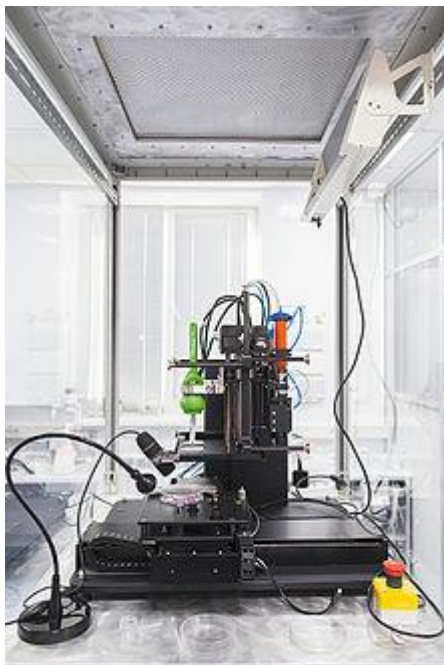


Рис. 4.33 – 3D-біопринтер

Технологія 3D-біопринтингу для виготовлення біологічних конструкцій, як правило, включає розміщення клітин на біосумісній основі, з використанням пошарового методу генерації тривимірних структур біологічних тканин. Оскільки тканини в організмі складаються з різних типів клітин, технології їх виготовлення шляхом 3D-біопринтингу також суттєво відрізняються за здатністю забезпечити стабільність і життєздатність клітин. Деякі з методів, що використовуються в 3D-біопринтингу – фотолітографія, магнітний біопринтинг, стереолітографія, та пряма екструзія клітин. Клітинний матеріал, виготовлений на біопринтері, переноситься в інкубатор, де проходить подальше вирощування.

Згідно з експертними оцінками, американська компанія Organovo, розташована в Сан-Дієго, стала першою компанією, яка здійснила комерціалізацію технології 3D-біопринтингу. Компанія використовує 3D-біопринтери NovoGen MMX Bioprinter. Organovo 3D-принтери призначений для виготовлення тканин шкіри, серця, кровоносних судин та інших тканин, які можуть бути придатні для хірургії та трансплантації.

Дослідницька група з університету Суонсі у Великобританії використовує технології 3D-біопринтингу для виготовлення м'яких тканин та штучних кісток для можливого використання у відновлювальній хірургії.

Одна з найбільш видовищних демонстрацій технології 3D-біодруку пройшла в 2011 році, коли на конференції TED-2011 спеціальний 3D-принтер надрукував макет людської нирки під час виступу американського хірурга та біоінженера Ентоні Атали.

У 2017 році в Китаї дітям із вродженим дефектом вуха пересадили 3D-друковані вуха.

Розробка технології 3D-біопринтингу відіграє велику роль у вирощуванні органів та розробці інноваційних матеріалів, насамперед біоматеріалів — матеріалів, підготовлених і використовуваних для друку тривимірних об'єктів. Тканини, ліки (у перспективі - цілі органи), що виготовляються шляхом 3D-біопринтингу, в майбутньому зможуть виступати як замітники «природних» людських органів, в деяких випадках володіючи властивостями, що перевершують природні органи. Наприклад, виготовлення альгінової кислоти в даний час видобувається з червоних водоростей і перевершує за деякими параметрами природний «матеріал» людського організму, і видобуток синтетичних гідрогелів, в тому числі гелів на основі поліетиленгліколю.

У Росії приватна лабораторія, що працює в галузі тривимірного органного біодруку, «3Д Біопринтинг Солюшенс» оголосила про результати експерименту з пересадки миші, надрукованого за допомогою російського біопринтера FABION органного конструкту щитовидної залози. Протягом кількох наступних місяців «конструкти прижилися і довели свою життєздатність». А в грудні 2018 року російським фахівцям вдалося отримати перші результати експерименту з друку органів на МКС: біопринтер надрукував у невагомості конструкт щитовидної залози миші та хрящову тканину людини

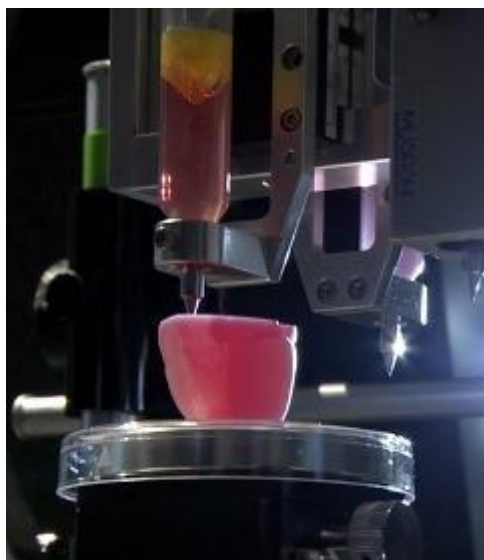


Рис. 4.34 — 3D друк штучної нирки

Наприкінці першого десятиліття XXI століття група вчених Інституту регенеративної медицини при Університеті Вік Форест дійшла висновку, що людські тканини можна надрукувати за допомогою струменевих принтерів, заправивши їх живими клітинами. З цього моменту розпочалася кропітка робота над створенням біопринтера для вирощування людських органів. Такий пристрій було продемонстровано у вересні 2011 року на конференції з нових технологій та дизайну «TED-2011». Пристрій функціонує так само, як і звичайний струменевий принтер, але замість чорнила воно використовує стовбурові клітини людей та тварин.

3D принтер здатний друкувати шматочки тканини, шкіри, хребетні диски, колінні хрящі та повноцінні органи. Перед початком друку орган хворого сканують з різних ракурсів і завантажують отриману інформацію в тривимірний принтер разом із зразком тканини органа. За кілька годин роботи пристрій відтворює точну копію органу, включаючи судини.

За допомогою тривимірного друку американські вчені виростили людський сечовий міхур і статеві органи кроликів, які після їхнього вживлення ампутованим кроликам дозволили тваринам знову спаровуватися. Також вчені відтворили серце щура, яке успішно працювало після імплантації піддослідній тварині.

Цей унікальний апарат може загоювати рани прямо на пацієнті, а також усувати механічні пошкодження органів, отримані внаслідок вогнепальних та ножових поранень, нещасних випадків тощо. Для цього він сканує рану (орган) і заповнює її відповідним типом свіжих тканин.

4.5.2 Харчові принтери



Рис. 4.35 – Принтер Cornucopia для друку продуктів харчування

В наш час принтери можна зустріти не тільки в офісах і копицентрах, але і в кондитерських майстернях, тільки спеціальні харчові. Використовують вони повністю їстівні чорнило і такий же папір. А скоро очікується поява в масовому доступі і харчових 3D-принтерів. У 2010 році група вчених Fluid Interfaces Group з Массачусетського технологічного інституту представила на суд громадськості перший 3D принтер для відтворення продуктів харчування. Пристрій був названий «Cornucopia», що у перекладі з англійської означає «ріг достатку».

У харчовий принтер замість звичайного паперу завантажуються продукти харчування, які апарат охолоджує, змішує та використовує для створення готового продукту.

Головними винахідниками друкуючого пристрою Cornucopia вважаються вчені Аміт Зоран і Марчелло Коельо. Їхній інноваційний пристрій здатний перевести кулінарію на новий виток розвитку. Концепт зможе «друкувати» раніше невідомі страви із заздалегідь заданою харчовою цінністю, якістю та смаком.

У 2013 році виготовлений перший принтер для виробництва піци.

4.5.3 Принтери для дому

Перші споживчі принтери від компанії 3D Systems з'явилися на початку 2012 року. Вони були в кілька десятків разів меншими і легшими за своїх «прабатьків».



Рис. 4.36 – Первый компактный принтер 3D Cube от компании 3D Systems

І в 2014 році був представлений Micro – компактний принтер, що працює на PLA або ABS. Розробники Micro ставили перед собою три цілі: фінансова доступність, простота використання та компактність.

У 2013 році у Microsoft Windows 8.1 з'явився додаток для 3D-друку, який отримав назву 3D Builder; щоправда, це скоріш маркетинговий хід, «ще один аргумент» на користь даної ОС, оскільки додаток годиться хіба що початкового знайомства з об'ємною печаттю.

У 2014 році компанія Adobe випустила оновлення для Photoshop CC, що дозволяє редагувати і роздруковувати 3D-об'єкти. А Microsoft увімкнула у Windows 8.1 драйвер для популярного принтера UP! 3D. Провідні виробники 3D-принтерів також або вже мають або готують драйвери для своїх моделей під цю операційну систему.



Рис. 4.37 – Перший ручний принтер 3Doodler

Популярності набув, особливо у малечі, ручний принтер 3Doodler, що формою нагадує товстенький і довгий маркер. Використовується принцип технології FDM, а переміщення сопла у просторі здійснюється рукою. Звичайно, це скоріше іграшка, ніж серйозний пристрій, проте за наявності твердої руки і за його допомогою можна зробити щось цікаве.

4.5.4 Застосування 3D друку у військово-промисловому комплексі

Військова промисловість – лідер по створенню і впровадженню інновацій – і немає нічого дивного, що адитивні технології отримали тут широке поширення. За результатами дослідження Defense IQ серед світових лідерів оборонної промисловості більше 75% респондентів вважають, що в найближчі 10 років 3D друк стане обов'язковим стандартом у галузі.

3D друк озброєння і техніки для армії виконується методами FDM наплавлення і лазерного спікання порошків SLS. За допомогою FDM друку виготовляють

елементи екіпірування та спорядження, комплектуючі безпілотної авіатехніки, запчастини. Для цього використовують конструкційні полімери NYLON (PA-6), PC, PC/ABS, PCTG, PEEK, PEI, PPSF/PPSU. Виготовлення навантажених деталей техніки та стрілецького озброєння виконується із порошків металевих сплавів.

Військова сфера пред'являє жорсткі вимоги до експлуатаційних і функціональних характеристик використовуваного обладнання. Низька якість техніки, озброєння та екіпіровки може призвести до фінансових збитків, політичної слабкості держави і, головне, загибелі людей. Тому компанії, які обслуговують військовий комплекс, використовують тільки інноваційні 3D принтери та матеріали, щоб забезпечити повну відповідність необхідним параметрам. А тепер розглянемо основні сфери застосування 3D принтерів у ВПК.

Можливості адитивних технологій дозволяють здійснювати друк усіх складових одиниць стрілецької зброї. Перспективним проектом представляється гранатомет R. A. M. B. O., який може незабаром потрапити на озброєння американських військових. Він представляє собою модифікацію традиційного гранатомета M203. Випробування нової моделі підходять до завершення.

Ще одним важливим напрямком 3D друку в оборонній промисловості є виготовлення елементів бойових і розвідувальних літаків. Китайські промисловці виготовили серійні зразки конструктивних елементів планера винищувача. Для цього був використаний лазерний 3D друк із порошку титану.

Сучасні 3D принтери дозволяють друкувати складні за формою та структурою деталі ракетного обладнання. В Україні, наприклад, конструкторське бюро «Південне» почало випуск складнопрофільних деталей бойових ракетних комплексів і ракетно-космічних систем методом селективного лазерного спікання (SLS).

Розвідувальні дрони, які вже знаходяться в експлуатації військових деяких країн світу, виготовляються із серійних двигунів і пропелерів. Корпуси повністю друкуються на 3D-принтерах. Швидкість безпілотної дрона може досягати 55 миль на годину. Американська компанія Aurora Flight Sciences спроектувала та створила реактивний безпілотний апарат, який на 80% складається з 3D-друкованих компонентів.

В армії США у 2019 році було розпочато впровадження виробництва запчастин для військової техніки лазерним методом Powder bed Fusion. Для 3D друку використовується високоміцний металевий сплав AF96. Даним методом були успішно надруковані вентилятори турбінного двигуна танка M1 Abrams.

Використання адитивного виробництва відкриває перед обороною сферою цілий ряд унікальних переваг:

- зниження витрат на проектування та виробництво деталей;
- створення нових видів техніки і озброєння з унікальними характеристиками;
- локалізація виробництва та можливість швидкого випуску виробів за замовленням;
- поліпшення обслуговування військової техніки за рахунок виготовлення запасних деталей (особливо для застарілих або унікальних екземплярів техніки);
- прискорення процесу проектування за рахунок тестування 3D-друкованих прототипів у реальних умовах;

- зменшення маси за рахунок застосування легких і міцних конструкційних матеріалів.

4.5.5 Використання 3D-принтеру в автомобілебудуванні

Для автомобілебудування характерно масове виробництво. Всі деталі машин тиражуються в сотнях тисяч, а то й мільйонах примірників. "Друкувати" їх на тривимірному принтері було б занадто дорого-поки що традиційні методи (наприклад, лиття) більш практичні. Але не потрібно забувати про те, що етапу масового випуску завжди передують етап проектування – і ось тут-то адитивні технології показують себе з найкращої сторони.

Конструювання будь-якої деталі автомобіля супроводжується побудовою її математичної моделі. Зараз для цього використовується не кульман, а комп'ютер, що набагато спрощує роботу проектувальників. При цьому відразу переходити до виготовлення деталей не можна – спочатку потрібно зробити прототип і провести його випробування. Це дозволить виявити помилки, допущені при конструюванні. Крім того, такий підхід допомагає підвищити експлуатаційні характеристики виробу.

Щоб досягти кінцевої мети, часто потрібно виготовити один за одним кілька прототипів, іноді відрізняються між собою лише в дрібницях. При використанні 3D-принтера це нескладне завдання – досить внести корективи в математичну модель. Водночас "звичайні" методи в подібних випадках стають не вигідними. Як приклад можна привести конструювання впускного клапана двигуна інженерами корпорації Ford. Витрати на виготовлення прототипів цієї деталі з допомогою тривимірної друку склали близько трьох тисяч доларів, що більш ніж в 150 разів менше, ніж треба було б при використанні традиційного підходу, що передбачає лиття, фрезерування і остаточну обробку.

Застосування дорогих витратних матеріалів не дозволяє використовувати тривимірну друк для масового виробництва комплектуючих. Проте бувають випадки, коли до тих чи інших деталей автомобіля покупці пред'являють індивідуальні вимоги. Зокрема, для гоночних машин необхідна особливо міцна і при цьому легка крильчатка вентилятора охолодження двигуна. Особливого сенсу в крупносерійному виготовленні цієї деталі немає. Найпростіше замовити 3D-друк таких елементів – це дозволяє не вносити ніяких змін у вже утворився технологічний цикл автомобілебудівного заводу.

4.5.6 3D-принтер у аерокосмічній промисловості

Промислові компанії стали все частіше використовувати в своєму виробництві технології тривимірного друку. В авіаційній та аерокосмічній діяльності впровадження 3D-друку дозволяє істотно знижувати втрати витратних матеріалів, а це важливо, враховуючи, що на виробництві використовуються дорогі матеріали, наприклад, титан. Фахівці прогнозують, що 3D-модернізація даних галузь з часом знизить витрати на матеріали більш, ніж на 30%. Зазвичай запасні деталі виробляють на заводі, зберігають на складі і доставляють покупцю на його замовлення. Завдяки 3D-

прінтерам запчастини можна виробляти там, де вони потрібні. Виробництво переміщається до покупця.

Так як аерокосмічна промисловість активно використовує технології 3D-друку з металу, оскільки вона дозволяє помітно зменшити загальну вагу літака. Наприклад, промисловий гігант Boeing випустив понад 20 000 деталей для літаків, виготовлених подібним чином. Британська компанія GKN, що виробляє автомобільні запчастини, розвиває спільно з європейським космічним агентством EADS технологію 3D-друку титанових кронштейнів на своєму заводі в Брістолі. Це дозволяє скоротити час виробництва з 4 годин до 40 хвилин, а витрати матеріалів – на 30% менше.

Американська компанія Sciaky, Inc. оголосила про поставку найбільшого у світі 3D-принтера компанії Turkish Aerospace Industries (TAI). Зрештою TAI сподівається створити одні з найбільших авіаційних конструкцій із титану в галузі.

За словами Sciaky, EBAM 300 є найбільшою з доступних нині систем адитивного виробництва металів. Його розміри величезні. Ця система є відгалуженням технології DED, яка часто використовується для великоформатного 3D-друку металом, оскільки забезпечує більший діапазон та гнучкість. У цьому випадку Sciaky також зазначає, що точно контрольована геометрія променя машини забезпечує кращий розподіл енергії й, отже, вищу відтворюваність характеристик, що, безумовно, важливо в такій галузі, як аерокосмічна. Крім того, в цей 3D-принтер буде включений електронно-променевий зварювальний апарат (EBW), що дозволить TAI поєднувати зварювання та 3D-друк, коли буде необхідно і те, й інше.



Рис. 4.38 - Металевий 3D-принтер Sciaky EBAM 300 System

Завдяки цьому новому принтеру TAI тепер зможе друкувати металеві деталі завдовжки від 8 дюймів до 20 футів. Скотт Філіпс, президент Sciaky, Inc., підсумував: «Системи EBAM від Sciaky — це найбільші великомасштабні металеві 3D-принтери DED у світі, в яких деталі схвалені для наземного, морського, повітряного й космічного використання. Ми вітаємо прагнення TAI до інновацій та їхні плани з 3D-друку одних із найбільших авіаційних конструкцій із титану у світі». Металевий

3D-принтер Sciaky EBAM 300 System забезпечує найбільшу робочу зону на ринку для великих металевих деталей — понад 19 футів у довжину.

5. 6. ГІБРИДНЕ ВИРОБНИЦТВО

Гібридне виробництво – це поєднання різних технологій, що дозволяє досягати нових вершин у виробництві складних деталей та компонентів. Цей підхід поєднує в собі два принципово різні методи: адитивні процеси (3D-друк) та субтрактивні процеси (токарна, фрезерна обробка). Цей симбіоз дозволяє отримати більш точні, складні та економічно вигідні вироби, ніж при використанні одного з методів.

Гібридне виробництво об'єднує два виробничі підходи однією обладнанні (рис. 5.1). Адитивне виробництво (АВ), або 3D-друк, нарощує пошарово матеріал, створюючи деталь, в той час як субтрактивні методи, такі як фрезерування або токарна обробка, видаляють зайвий матеріал, надаючи виробу кінцеву форму і необхідну точність.



Рисунок 5.1 – Виготовлення деталей за допомогою гібридного виробництва

Ключовою особливістю гібридного виробництва є те, що обидва процеси повинні відбуватися на одному верстаті. Наприклад, якщо деталь спочатку надрукована на 3D-принтері, а потім оброблена на фрезерному верстаті, це не вважатиметься гібридним виробництвом, оскільки процеси не об'єднані в одному пристрої.

Хоча технологія гібридного виробництва знаходиться на ранніх стадіях розвитку, вона вже привертає увагу інженерів та виробників завдяки своїм потенційним перевагам:

1) Економія часу (рис. 5.2). Адитивне виробництво дозволяє швидко створити складні форми, а субтрактивні процеси доповнюють їх необхідною точністю. Використання одного верстата для виконання обох процесів скорочує час на підготовку та транспортування деталі між різними етапами виробництва.

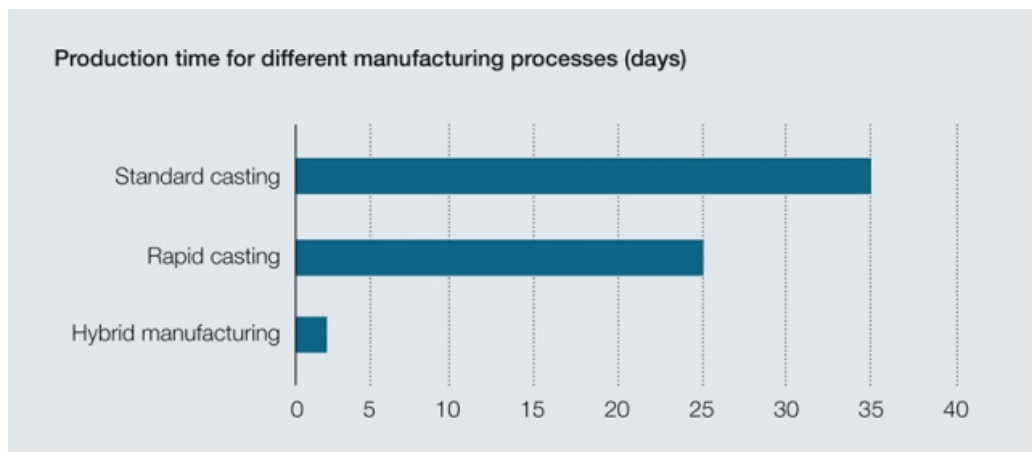


Рисунок 5.2 – Порівняння термінів виготовлення закритих робочих коліс

2) Поліпшення якості деталей. Гібридне виробництво допомагає усунути недоліки адитивного виробництва, такі як груба поверхня. Наприклад, після створення заготовки за допомогою 3D-друку, її можна відразу обробити для отримання гладкої поверхні та поліпшення характеристик міцності.

3) Економія матеріалів. На відміну від суто субтрактивних методів, при яких великий обсяг матеріалу йде у відходи, гібридне виробництво дозволяє скоротити кількість надлишків за рахунок адитивного етапу. Це може значно знизити вартість виробництва, особливо під час роботи з дорогими матеріалами, такими як титан або рідкісноземельні метали (рис. 5.3).

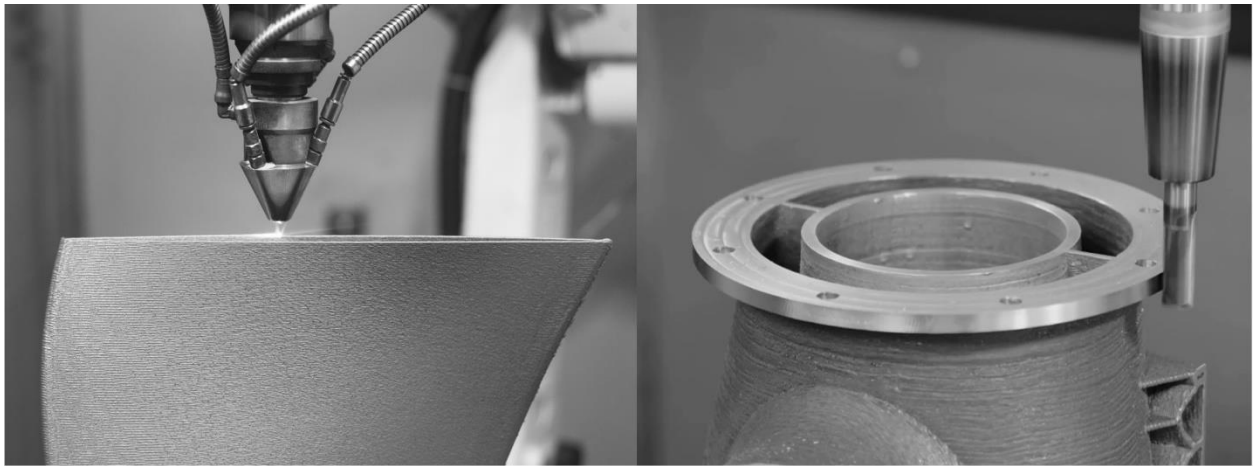


Рисунок 5.3 – Приклад гібридного виробництва

Технологія гібридного виробництва поки що є новинкою навіть для такої молоді галузі, як адитивне виробництво. Проте вже сьогодні можна побачити перспективні приклади її використання в аерокосмічній промисловості, медицині, автомобільній галузі та інших високотехнологічних галузях.

Незважаючи на те, що гібридне виробництво поки не стало масовим, експерти вважають, що його потенціал є величезним. Можливості створення складних деталей на одному верстаті, скорочення виробничих циклів та підвищення якості роблять цю технологію дуже привабливою для багатьох галузей.

Як і у випадку з 3D-друком, ранні послідовники гібридного виробництва з оптимізмом дивляться в майбутнє, очікуючи, що розвиток технологій відкриє нові горизонти для промисловості. Очікується, що в міру покращення обладнання та зниження вартості технології, вона стане більш доступною та широко використовується у виробничих процесах по всьому світу.

Виробничий світ руйнується новими технологіями, і адитивне виробництво є одним із них. АВ може створювати складні конструкції, які абсолютно неможливі за допомогою традиційних технологій (лиття під тиском тощо) за набагато нижчою вартістю, проте АВ не має потенціалу масового виробництва. Традиційне виробництво не буде повністю замінено АВ через певні переваги, такі як масове виробництво за нижчою вартістю та високоточні компоненти. Злиття адитивного виробництва та традиційного виробництва може створити гібридну виробничу систему, яка може використовувати найкраще з обох технологій. Доповнюючи один одного,

гібридна виробнича система має потенціал відкрити нові можливості у ширшому промисловому спектрі. Гібридне виробництво може створювати прецизійні вироби, які мають складну конструкцію та форму, із зменшеними відходами та витратами.

Деталі, виготовлені за допомогою АВ, іноді піддаються механічній обробці для досягнення більш жорстких допусків та якості поверхні відповідно до потреби, і це відома загальногалузева практика. Якщо обидві технології об'єднані, це відомо як гібридна виробнича система. Це означає, що той самий верстат містить як адитивні, так і субтрактивні виробничі можливості. В даний час верстат з ЧПК вирізає форму з металевого блоку відповідно до даних системи автоматизованого виробництва (САПР), а віддалений матеріал є просто відходами. Для дорогих матеріалів, таких як титан, легована сталь тощо, це дорогі відходи. Гібридне виробництво найбільше підходить для дрібносерійного виробництва металевих компонентів. На ринку є верстати, які містять як адитивні, так і маршеві налаштування з ЧПК. Існуючі верстати з ЧПК можна модернізувати за допомогою додаткових можливостей АВ, наприклад, за допомогою системи модернізації АВ, яку надає компанія Hybrid Manufacturing Technologies.

Щоб використати силу гібридної системи, конструктор повинен спроектувати деталь, що підходить для такого типу виробничої установки. Спочатку система АВ створює форму, яка відома як майже чиста форма, а потім обробляється ЧПК для вирізання остаточної форми, близької до розмірної точності, з подальшою постобробкою відповідно до вимог (рис. 5.4). Або спочатку деталь обробляється на верстаті з ЧПК, а потім функції створюються системою АВ, яка знову обробляється на верстаті з ЧПК з необхідними розмірними допусками.

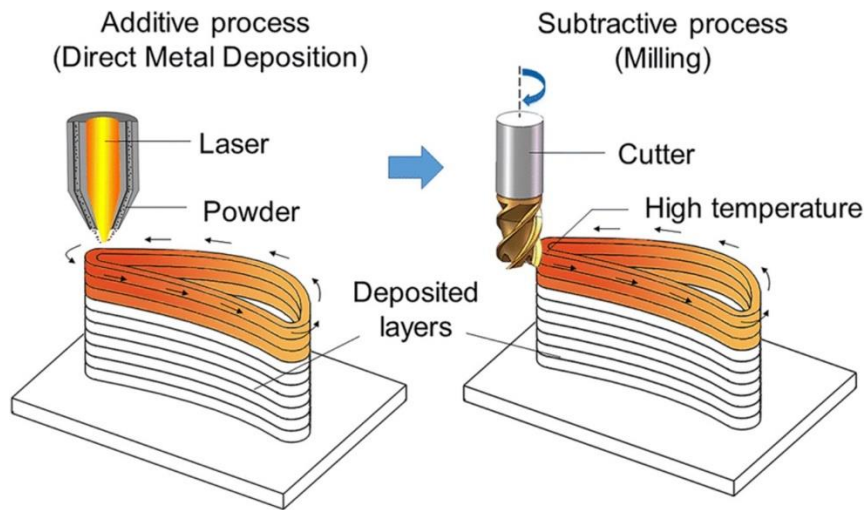


Рисунок 5.4 – Приклад гібридного виробництва

Гібридне виробництво, що поєднує адитивні та субтрактивні методи, не тільки розширює можливості створення складних деталей, а й допомагає економити ресурси, що робить його важливим кроком на шляху до більш ефективного та екологічного виробництва.

5.2 Обладнання для гібридного виробництва

Устаткування для гібридного виробництва - це ключовий елемент, що забезпечує об'єднання адитивних та субтрактивних технологій в одному пристрої. Незважаючи на те, що кількість доступних гібридних верстатів на ринку поки що відносно невелика, їх можна розділити на дві основні категорії: готові гібридні верстати та адитивні модифікації для існуючих субтрактивних верстатів.

Гібридні верстати (рис. 5.5), які з самого початку були розроблені для об'єднання технологій, є рішенням "під ключ" для тих, хто хоче використовувати переваги як 3D-друку по металу, так і традиційної обробки. Серед провідних виробників таких верстатів виділяються такі компанії:

1) DMG MORI - відомий світовий виробник висококласного обладнання для гібридного виробництва, що пропонує рішення, що поєднують металообробку з адитивними процесами.

2) ELB-Schliff, Matsuura, Mazak, Mitsui Seiki та Okuma – компанії, що також пропонують гібридні верстати, кожен з яких має свої особливості у поєднанні адитивних та субтрактивних процесів.



Рисунок 5.5 – Інструменти AMBІТ поруч із звичайними субтрактивними інструментами в інструментальному магазині

Менш відомі компанії, такі як Diversified Machine Systems, Fabrisonic та Optomec (рис. 5.6), також розробляють гібридні верстати, здатні виконувати завдання високої складності.



Рисунок 5.6 – Гібридна машина Optomec для виробництва біорозкладних медичних імплантатів

Ці верстати дозволяють користувачам виконувати повний цикл виробництва деталі від створення форми за допомогою адитивного процесу до фінальної обробки для отримання точності і гладкості поверхні.

Крім готових гібридних рішень, на ринку є можливість адитивних модифікацій для існуючих верстатів. Це підхід для тих, хто вже має субтрактивні верстати і хоче додати можливість адитивного виробництва. На даний момент доступність таких модифікацій обмежена, проте кілька компаній працюють у цьому напрямі:

1) Hybrid Manufacturing Technologies – одна з провідних компаній, що пропонує модифікації для стандартних верстатів, додаючи до них інструменти 3D-друку (рис. 7).

2) 3D-Hybrid Solutions, Inc. – Компанія, що пропонує спеціалізовані адитивні рішення для модифікації субтрактивних верстатів.



Рисунок 5.7 – Гібридна система LUMEX Avance-60

Ці модифікації включають інструменти для металодруку, які інтегруються в існуючі верстати, працюючи разом із традиційними інструментами, такими як фрези або різці токарні. Деякі виробники, такі як ELB-Schliff, Mazak та Mitsui Seiki, вже пропонують такі адитивні опції, як стандартні для своїх верстатів, що спрощує процес модернізації для клієнтів.

Гібридне обладнання відрізняється не тільки способом інтеграції адитивних та субтрактивних процесів, а й технологіями 3D-друку, що використовуються. Основні технології, які використовуються в гібридних машинах, включають:

1) Спрямоване енергетичне напилення (DED) – технологія, коли метал у вигляді порошку чи дроту подається у зону зварювання, де він плавиться лазером чи іншим джерелом енергії. Це одна з найпоширеніших технологій у гібридних верстатах.

2) Дротово-дугове адитивне виробництво (WAAM) – метод, при якому використовується електрична дуга для плавлення металевого дроту, що особливо ефективно при створенні великих металевих деталей.

3) Холодне напилення (CS) – технологія, що використовує надзвукове напилення металевих частинок для створення шарів. Перевагою є відсутність необхідності плавлення матеріалу, що знижує тепловий вплив на деталь та мінімізує деформацію.

4) Ультразвукове адитивне виробництво (UAM) від компанії Fabrisonic – унікальна технологія, за якої шари металу з'єднуються за допомогою ультразвукових хвиль. Цей метод дозволяє створювати багат шарові металеві конструкції з точною геометрією та унікальними властивостями.

Гібридне виробництво - це перспективна технологія, що поєднує переваги адитивного та субтрактивного підходів. Розвиток устаткування цього типу виробництва відкриває нові можливості у різних галузях, від авіації до медицини. Компанії, що пропонують як готові гібридні верстати, так і адитивні модифікації для стандартних верстатів, продовжують розвивати цю сферу, пропонуючи ефективніші та економічніші рішення. Залежно від конкретних завдань та вимог виробництва, вибір відповідної технології 3D-друку, будь то DED, WAAM, CS або UAM, стає важливим аспектом успішного впровадження гібридного підходу.

5.3 Застосування гібридного виробництва

Гібридне виробництво - це перспективна технологія, яка знаходить застосування в різних галузях, завдяки поєднанню адитивних та субтрактивних методів. Основні

галузі застосування гібридного виробництва включають аерокосмічну промисловість, медицину, виробництво прес-форм та штампів, а також ремонт та відновлення деталей. Розглянемо докладніше, як ці технології впроваджуються у конкретних галузях.

Аерокосмічна галузь є однією з найбільших сфер для адитивного виробництва металів, включаючи гібридне виробництво. У цій галузі необхідна висока точність та міцність деталей, що використовуються у літаках та космічних кораблях. Гібридне виробництво дозволяє створювати складні металеві компоненти, які не тільки відповідають жорстким вимогам щодо ваги та міцності, але і можуть бути виготовлені з меншими витратами порівняно з традиційними методами.

Процес нашарування металів та розробки нових сплавів також відкриває можливості для створення унікальних деталей, які здатні витримувати екстремальні умови експлуатації. Однак однією з головних проблем залишається необхідність суворої сертифікації як матеріалів, так і процесів. В аерокосмічній промисловості потрібна не тільки кваліфікація готової деталі, а й перевірка на відповідність матеріалів та обладнання, що використовується у виробництві, що може ускладнити впровадження нових технологій.

Медична галузь також активно використовує гібридне виробництво, особливо у створенні імплантатів. Наприклад, титанові, нержавіючі або кобальт-хромові імплантати, такі як пластини, гвинти та стрижні, часто використовуються для фіксації кісток. Однак наявність цих імплантатів в організмі може призвести до довгострокових ускладнень, які вимагають їх видалення через кілька тижнів після операції.

Доктор Силі запропонував інноваційне застосування гібридного виробництва для створення імплантатів, які можуть деградувати з певною швидкістю, що усуває необхідність повторної операції. Використовуючи можливості гібридного виробництва, можна контролювати швидкість деградації матеріалу імплантату. Наприклад, імплантати для молодих пацієнтів можуть бути запрограмовані на швидку деградацію, тоді як для людей похилого віку цей процес може бути сповільнений, щоб відповідати швидкості відновлення кісткової тканини.

У виробництві прес-форм та штампів гібридне виробництво відкриває нові можливості для ремонту та продовження терміну служби інструментів. Наприклад, можна наплавляти зношені ділянки прес-форм, відновлюючи їх функціональність, або створювати конформні канали, що охолоджують, що покращує ефективність роботи форми. Це дозволяє підприємствам економити на виготовленні нових прес-форм та знижує витрати на виробництво. Гібридне виробництво в цій сфері може не тільки ремонтувати, а й модифікувати прес-форми, додаючи нові функціональні елементи, такі як канали, що охолоджують, які збільшують продуктивність і термін служби інструменту.

Одним із найбільш популярних застосувань гібридного виробництва є ремонт та відновлення металевих деталей. Це особливо актуально для складних компонентів, які складно чи дорого замінити. Гібридні машини можуть сканувати пошкоджену деталь, порівнювати її з оригінальним кресленням та додавати необхідну кількість матеріалу для відновлення функціональності.

Технологія спрямованого енергетичного осадження особливо підходить для відновлення зношених частин деталей, додаючи матеріал саме там, де це необхідно.

Однією із значних переваг адитивного виробництва є його здатність відновлювати зношені компоненти, замість замінювати їх повністю. В рамках проекту FlexiMan вчені показали успішне застосування АВ для ремонту робочих коліс суднових двигунів (рис. 1.8), лопаті яких були пошкоджені. Зазвичай таку деталь було б викинуто і замінено новою. Однак за допомогою адитивного виробництва було надруковано нові лопаті, що дозволило відновити функціональність колеса та продовжити термін його служби.

Якщо компонент не підлягає ремонту, його можна переробити, розбивши на сировину для подальшого використання у виробництві нових деталей. Цей підхід сприяє більш стійкому використанню ресурсів, що є важливим для морської галузі, де термін служби компонентів відіграє ключову роль.

Ще одна важлива перевага адитивного виробництва – можливість створювати гібридні рішення. У морській галузі часто використовуються великі та важкі деталі, які вимагають міцності, але не всі їх частини зазнають однакових навантажень.

FlexiMan пропонує використовувати комбінацію традиційних матеріалів та адитивно виготовлених компонентів. Наприклад, великі деталі можуть бути виготовлені з дешевшої звичайної сталі, в той час як критично важливі частини, схильні до зносу, виготовляються з високоякісних матеріалів з використанням АВ.

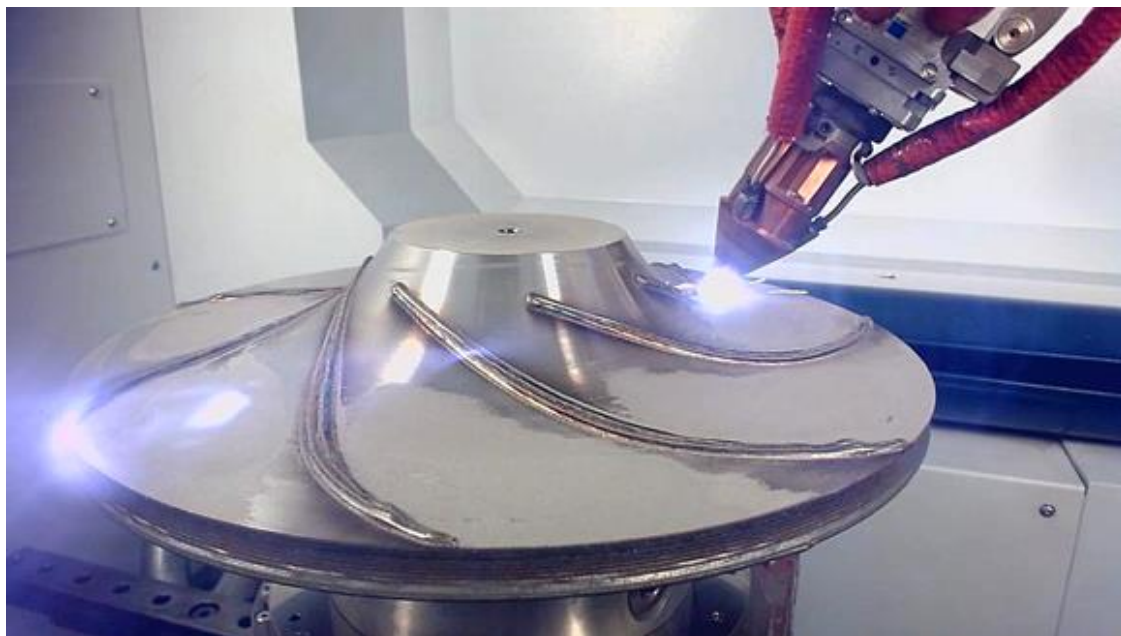


Рисунок 5.8 – Реактивні робочі колеса для суднового двигуна, що ремонтується з використанням адитивного виробництва

Крім того, завдяки адитивному виробництву можна створювати порожнисті компоненти, такі як пропелери, що дозволяє значно знизити вагу деталі. Легкі компоненти вимагають менше палива для роботи, що безпосередньо впливає на економію ресурсів та зниження викидів у морській галузі. Однак при проектуванні таких деталей необхідно враховувати їхню міцність і довговічність, що потребує детальних розрахунків та випробувань.

Незважаючи на переваги АВ, морська галузь стикається з певними викликами, пов'язаними із суворими правилами та стандартами. На відміну від аерокосмічної та автомобільної галузей, де адитивне виробництво вже активно використовується, морська галузь змушена повільно впроваджувати нові технології. Проект FlexiMan

працює над тестуванням виробничих процесів, які відповідають морським стандартам. В рамках досліджень були протестовані компоненти, такі як реактивний імпелер та судновий гребний гвинт.

Завдяки АВ вони змогли надрукувати кришку імпелера цілком замість того, щоб виробляти три окремі деталі і потім їх збирати. На додаток до цього, 3D-друк дозволяє виготовляти до 30 клапанів одночасно, що значно скорочує час виробництва.

Застосування адитивного виробництва у морській галузі також може суттєво змінити процес технічного обслуговування. У майбутньому компанії, такі як Kongsberg Maritime, планують виготовляти запасні частини безпосередньо на борту судна або порту, що виключить необхідність утримувати великі запаси деталей на складі. Це покращить оперативність ремонту та знизить витрати на логістику.

Таким чином, проект FlexiMan демонструє потенціал адитивного виробництва в морській галузі як з точки зору стійкості, так і з точки зору ефективності. Технологія АВ відкриває нові можливості для розробки більш легких, міцних та стійких компонентів, а також полегшує процеси ремонту та технічного обслуговування суден.

Гібридне виробництво дозволяє наносити захисні покриття, такі як зносостійкі або антикорозійні, на деталі, продовжуючи тим самим термін їх служби.

Гібридне виробництво дозволяє додавати нові функціональні елементи до вже існуючих компонентів. Наприклад, можна взяти заготівлю, обробити її традиційними методами, а потім надрукувати на її поверхні новий елемент. Це відкриває можливості для створення багатофункціональних деталей, які поєднують різні методи обробки.

Гібридне виробництво пропонує різноманітні та перспективні рішення для таких галузей, як аерокосмічна, медична, інструментальна та ремонтна промисловість. Можливості комбінування адитивних і субтрактивних процесів дозволяють як створювати нові компоненти, а й відновлювати зношені деталі, що робить цю технологію привабливою підприємств, котрі прагнуть скорочення витрат і підвищення ефективності.

6. 4D-ДРУК

4D-друк (4D-друк; також відомий як 4D-біодрук, активне орігамі або системи формування форми) використовує ті ж методи, що й 3D-друк, шляхом комп'ютерно-програмованого нанесення матеріалу послідовними шарами для створення тривимірного об'єкта. Однак у 4D-друку отримана 3D-форма здатна трансформуватися в різні форми у відповідь на подразники навколишнього середовища, причому 4-й вимір - це зміна форми, що залежить від часу, після друку. Таким чином, це тип програмованої матерії, де після процесу виготовлення друкований продукт реагує з параметрами навколишнього середовища (вологість, температура, напруга тощо) і відповідно змінює свою форму.

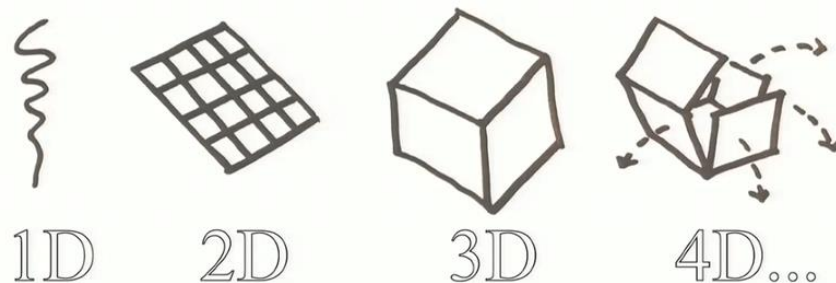


Рисунок 6.1 – 4D-друк

4D-друк - це процес створення 3D-друкованих об'єктів, які можуть трансформуватися з часом на основі певних подразників, таких як вплив повітря, води або тепла.

4D-друк - це процес, у якому 3D-друковані об'єкти програмуються на автономну трансформацію з часом у відповідь на подразники навколишнього середовища, такі як тепло або світло.

Уявіть собі автономні, самозбиральні меблі, що постачаються в плоских упаковках; будівлі, що будуються самі; регенеративні підземні трубопровідні системи; функціональні, готові до друку органи.

Або, можливо, під час цікавого пошуку в Google ви спостерігали, як вигнутий текстиль у формі синусоїди скручується у щось схоже на крісло епохи бруталізму або мініатюру Ейфелевої вежі – желатиновий макіяж, що в'янув і відновлює форму під впливом тепла.

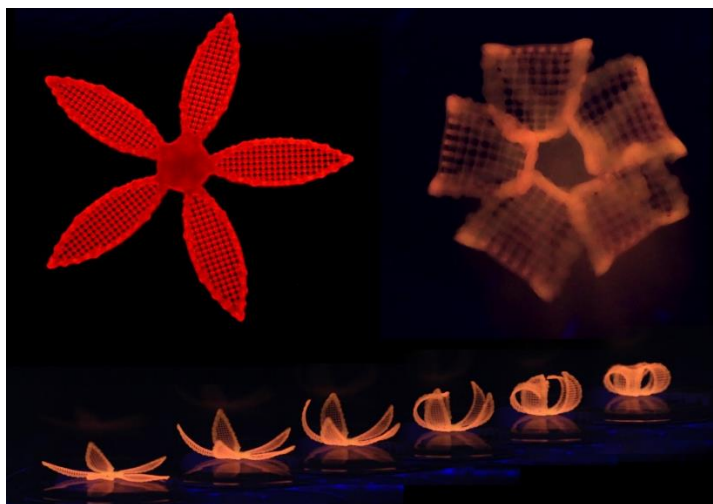


Рисунок 6.2 – Нові матеріали, що змінюють характеристики та форму

У будь-якому разі, ці могутні об'єкти, що змінюються, є рендерингом 4D-друку, який впроваджує властивості самоактивації в процес 3D-друку.

4D-друк створює самозбиральну, програмовану матерію, призначену для тимчасової трансформації, створюючи своєрідне активне орігамі. Термін 4D або четвертий вимір по суті означає час і детально описує вплив часу на надрукований об'єкт.

«Завдяки 4D-друку об'єкти можна друкувати з додатковими функціями, які дозволяють їм змінювати форму або функції з часом», – сказав Сінї Сяо, доцент кафедри машинобудування та виробничої інженерії в Університеті Маямі. «Це можна використовувати для створення об'єктів, які можуть адаптуватися до навколишнього середовища або навіть самовідновлюватися».

Технології друку:

Стереолітографія – це техніка 3D-друку, яка використовує фотополімеризацію для зв'язування шар за шаром підкладки, створюючи полімерну мережу. На відміну від моделювання методом наплавлення, де екструдований матеріал одразу твердне, утворюючи шари, 4D-друк фундаментально базується на стереолітографії, де в більшості випадків ультрафіолетове світло використовується для затвердіння шаруватих матеріалів після завершення процесу друку. Анізотропія є життєво важливою для проектування напрямку та величини перетворень за заданих умов шляхом розташування мікроматеріалів таким чином, щоб у готовому відбитку була вбудована спрямованість.

У проектах 4D-друку 3D-друковані рендери, по суті, створюються залежними від часу. Після повного виготовлення ці рендери можуть змінювати форму у відповідь на подразники навколишнього середовища, з якими вони взаємодіють.

Інтелектуальні матеріали, що змінюють форму, з яких складаються 4D-друковані вироби, реагують на каталізатор, такий як тепло, вода, світло, вітер або електрика, на основі набору інструкцій, записаних у їх геометричному кодуванні. Вони можуть ви-

довжуватися, згинатися, морщитися, складатися, скручуватися або навіть розпадатися після активації. Будь-що, від дерева до гуми, можна нашарувати за допомогою матеріалів, що реагують на подразники. Мета цієї практики — відкривати нові властивості та маніпулювати об'єктами без втручання людини чи механіки.

У цьому, мабуть, і вся суть. Скайлар Тіббітс, засновник і директор з досліджень Лабораторії самозбірки Массачусетського технологічного інституту, описав мету 4D-друку – створити безмоторні, бездротові, безживні технології – коли вперше використав цей термін під час виступу на Ted Talk у 2013 році.

«Те, що ми насправді намагаємося створити, – це роботів без роботів», – сказав Тіббітс Fast Company. «Ми хочемо розробити матеріали, які можуть трансформуватися під впливом енергії, але які не обов'язково потребують друкованих плат, електроніки чи інших рухомих частин для роботи».

4D-друк має багато потенційно впливових областей застосування», – сказав Сяо, перерахувавши медицину, гнучку електроніку, м'яких роботів і навіть меблі як варіанти використання.

Наприклад, струмопровідні чорнила можна використовувати для створення електронних пристроїв, сказала вона. Однак цей процес обмежений плоскими поверхнями. Адаптуючи здатність змінювати форму, доступну в 4D, можна розробляти складніші електронні компоненти.

Аерокосмічна, автомобільна, швейна, будівельна, військова, охорона здоров'я та виробництво є передовими галузями, що досліджують 4D-простір.

Справжнє диво цієї технології полягає в її далекому потенціалі. Сьогоднішній успіх друку простого, саморозкладного крісла спонукає дослідників та 4D-ентузіастів мріяти про адаптивні медичні імпланти та самостійно побудовані будівлі.

4D-друк все ще перебуває на ранніх стадіях розвитку», – зазначив Сяо, чий дослідницький зусилля зараз зосереджені на контролі якості в адитивному виробництві, що базується як на 3D, так і на 4D, включаючи оволодіння самозмінною структурою та дизайном. «Але це захоплива технологія, яка має потенціал змінити спосіб виробництва об'єктів. Залишатися креативним є надзвичайно важливою умовою, щоб люди могли переосмислити цифрову виробничу лінію у фізичну».

Оснащені комерційними 3D-принтерами, дослідники починають з введення розумного матеріалу, також відомого як метаматеріал. Ці текстильні вироби, що зберігають трансформаційні властивості, унікальні для 4D-об'єктів, зазвичай виготовляються з гідрогелю або полімерів з пам'яттю форми. Гідрогелі реагують на вологу, тоді як полімери з пам'яттю форми мають здатність повертатися до свого початкового стану після деформації.

«Найпростішим прикладом цього може бути губка – матеріал, який змінює форму під дією тиску», – сказав Вініт Венугопал, інженер-матеріалознавець Массачусетського технологічного інституту.

Більш складним прикладом, за його словами, може бути сплав з пам'яттю форми, такий як NiTiNoI. Виготовлений з титану та нікелю, він може повертатися до своєї початкової форми після будь-якої деформації.

«Ці «живі» матеріали можуть повністю змінити наш світ».

Ці анімовані риси можна пояснити геометричним кодом, попередньо запрограмованим у матеріал. Згідно з його інструкціями, надрукований об'єкт активується після спрацьовування заданим стимулом, який природним чином виникає в його середовищі.

«Це називаються розумними матеріалами», — сказав Венугопал, — «І, якщо вірити нещодавньому звіту Королівського товариства [незалежної наукової академії Сполученого Королівства], ці «анімовані» матеріали можуть повністю змінити наш світ».

У звіті Королівського товариства зазначається, що будівництво з матеріалів, що мають активні, адаптивні та автономні властивості, стане революційним рішенням у всіх секторах, особливо в таких галузях, як будівництво та транспорт, а також медицина та текстиль.

Властивості розумних матеріалів, що використовуються в 4D-друку[^]

- Гідрогелі: Матеріали, що реагують на вологу. Матерія, яка змінюється під час взаємодії з електричною енергією.
- П'єзоелектричні: Вони реагують на прикладене механічне навантаження, таке як тиск або прихована теплота.
- Термореактивні: Коливання тепла або температури трансформують ці матеріали.
- Фотореактивні: Матеріали, що каталізуються світлом.
- Магнетореактивні: Елементи, що трансформуються під час взаємодії з магнітною енергією.
- pH-реактивні: Матерія, яка активується рівнями pH.

Чотиривимірний друк «є наступним кроком після 3D-друку», — сказав Сяо, зазначивши, що не можна мати одне (4D) без іншого (3D).

Розмежування між цими двома починається зі встановлення основи обох технологій. Тривимірний друк — це техніка швидкого прототипування, яку зазвичай називають адитивною. виробництво, яке наносить матеріал шар за шаром для створення тривимірних об'єктів.

Цей самий механізм використовується в 4D-друку для створення деталей. Додатковий вимір, який відрізняє один від іншого, однак, визначається в геометричному кодуванні об'єкта, як детально описано вище, яке робить цей додатковий крок перед натисканням кнопки друку. Тут дослідники кодують бажану функціональність об'єкта на основі його кутів, вимірювань та розмірів.

Отже, так само, як 3D-друк полягає в додаванні глибини до обмежень 2D-структури, 4D полягає в додаванні ще одного фактора до розмірної композиції — часу. Точніше, змін з часом. У той час як об'єкти, надруковані за допомогою 4D-друку, перетворюються на якусь дію, 3D-друковані рендеринги зберігають свою статичну, жорстку форму.

«4D-друк здатний створювати об'єкти, які можуть змінювати форму та розмір після друку, тоді як 3D-друк — це більш базова форма, яка може створювати лише об'єкти з фіксованою формою», — сказав Сяо. «Це творіння, відмінне від застосування».

Приклади 4D-друку

Інновації в 4D-друку, які ще не комерціалізовані, все ще обмежуються дослідженнями та лабораторними експериментами. Будь-які застосування, що відбуваються, такі як грудний імплантат, що дозволяє здоровим тканинам рости у пацієнта з раком, вважаються високоекспериментальними аномаліями, які перед широким використанням очікують суттєвого тестування та схвалення уряду.

Важливо зазначити, однак, що основа вже закладена. Реальні випадки використання 3D-друку передвіщатимуть те, що станеться — принаймні в найближчому майбутньому — для 4D-друку. Негайні експерименти змушують дослідників спиратися на десятиліття доказів концепцій, отриманих за допомогою 3D-друку, але додають самоактивуючий поворот.

Ось деякі розробки 4D-друку:

А. Біомедицина:

1. Тканинна інженерія

Наведений вище приклад із біорозкладним 4D-грудним імплантатом є прикладом тканинної інженерії, започаткованої дослідниками національної лабораторії Сіаньського університету Цзяотун. Це конкретне застосування розвивалося з того часу, використовуючи клітинні клеї, відомі як каркаси, або біоматеріали, розроблені для стимулювання росту клітин та формування нових функцій тканин. У цьому випадку з каркасів створюється додаткова структурна оболонка, яка фототермально активується для руху разом з тілом і підтримки форми в міру регенерації неракових тканин.

Група дослідників з Університету Джорджа Вашингтона використовує тканинну інженерію для створення серцевих пластирів, виготовлених з чорнил на основі желатину. Ці біо-пластири можуть відновлювати пошкодження серцевого м'яза без потреби в клеї. Зшита структура розроблена таким чином, щоб розтягуватися разом із розширенням і скороченням серця пацієнта, що б'ється.

Крім того, інша група з Університету Джорджа Вашингтона розробила біосумісну смолу, отриману з відновлюваної соєвої олії, яка змінює форму при взаємодії з джерелом тепла, а потім повертається до своєї початкової форми, коли температура

стабілізується. Дослідники вважають, що згодом цей матеріал може бути використаний для росту стовбурових клітин за допомогою кісткового мозку.

Сила клітинної тяги (CTF) – це техніка, за допомогою якої живі клітини складаються та переміщують мікроструктури у свою задану форму. Це можливо завдяки скороченню, яке відбувається внаслідок полімеризації актину та взаємодії актоміозину всередині клітини. У природних процесах CTF регулює загоєння ран, ангіогенез, метастазування та запалення. Такеучі та ін. Клітини засівали через дві мікропланшети, і коли скляну структуру видаляли, клітини заповнювали проміжок між мікропланшетами та таким чином ініціювали самозгортання. За допомогою цього методу команда змогла створити судиноподібні геометрії та навіть високопродуктивні додекаедри. Існує припущення, що використання цієї техніки клітинного орігамі призведе до розробки та друку клітинної структури, яка зможе імітувати свої несинтетичні аналоги після завершення процесу друку.

2. Доставка ліків

Натхненні паразитичними червами, терагрипери - це металеві зіркоподібні мікропристрої, виготовлені з плівки, що змінює форму, призначені для перенесення будь-якого типу ліків до цільової частини тіла та їх повільного вивільнення. Вони покриті термочутливим парафіновим воском, який чіпляється до кишкового тракту пацієнта. Після вбудовування вони починають вводити ліки, як тільки температура їхнього тіла досягне температури тіла хазяїна. Ця технологія, започаткована дослідниками з Університету Джонса Гопкінса, має розмір порошинки та потенційно може переносити одну дозу будь-якого типу ліків.

Інший підхід, запропонований дослідниками Мічиганського технологічного університету, використовує магнітні чорнила, надруковані на 3D-принтері, просочені мікрочастинками. Магнітними властивостями мікрочастинок можна дистанційно маніпулювати, щоб усунути закупорки в шлунково-кишковому тракті, отримати зразки тканин і доставити лікування до цільового місця в організмі пацієнта.

3. Стенти

Два типи судинних стентів, надрукованих на 4D-принтері (тимчасові трубчасті опори, часто виготовлені з металевої сітки, вшиті в судини для покращення кровотоку), досліджуються із застосуванням пам'яті форми. Дослідники з Харбінського технологічного інституту в Китаї виявили, що в об'єкт кодується генетичний алгоритм, який потім імітує здорову кровоносну судину, швидко розширюючи звужені шляхи.

Досягнення в біомедичних застосуваннях

Університет створив новий тип рідкої смоли, що фототвердіє, яку можна друкувати на 4D-принтері. Ця смола виготовлена з відновлюваної епоксидованої акрилатної сполуки соєвої олії, яка також є біосумісною. Ця смола доповнює невелику групу смол, що можна друкувати на 3D-принтері, і є однією з небагатьох, які є біосуміс-

ними. Зразок цієї смоли, надрукований за допомогою лазерного 3D-принтера, піддавався коливанням температури від -18°C до 37°C та демонстрував повне відновлення своєї початкової форми. Друковані каркаси з цього матеріалу виявилися успішною основою для росту мезенхімальних стовбурових клітин кісткового мозку людини (hMSC). Сильні якості цього матеріалу, такі як ефект пам'яті форми та біосумісність, дозволяють дослідникам вважати, що він значно просуне розробку біомедичних каркасів. Ця дослідницька стаття є однією з перших, яка досліджує використання полімерів рослинних олій як рідких смол для стереолітографічного виробництва в біомедичних застосуваннях.

Дослідницька група Леоніда Іонова (Байройтський університет) розробила новий підхід до друку біосумісних/біорозкладних гідрогелів, що змінюють форму, з живими клітинами. Цей підхід дозволяє виготовляти порожнисті самозгортаючі трубки з безпрецедентним контролем над їх діаметром та архітектурою з високою роздільною здатністю. Універсальність підходу демонструється використанням двох різних біополімерів (альгінату та гіалуронової кислоти) та стромальних клітин кісткового мозку миші. Використання параметрів друку та постдруку дозволяє досягти середнього внутрішнього діаметра трубок до 20 мкм, що поки що неможливо досягти іншими існуючими методами біодруку та порівнянно з діаметрами найменших кровоносних судин. Запропонований процес 4D-біодруку не має жодного негативного впливу на життєздатність надрукованих клітин, а самозгорнуті трубки на основі гідрогелю підтримують виживання клітин протягом щонайменше 7 днів без будь-якого зниження життєздатності клітин.

Отже, представлений стратегія 4D біодруку дозволяє створювати динамічно реконфігуровані архітектури з налаштовуваною функціональністю та швидкістю реагування, що регулюється вибором відповідних матеріалів та елементів.

В. Зброя та літальні апарати

Лабораторії самозбірки Массачусетського технологічного інституту розробили прототип повітрязбірника реактивного двигуна, що трансформується, з програмованого вуглецевого волокна. На відміну від своїх механічних аналогів, ця модель легка, мінімізує схильні до аварій механізми та працює незалежно від електроніки, датчиків чи виконавчих механізмів, за словами дослідників Повітряного університету.

Вважається, що самозбиральні мікродрони є наступною еволюцією повноцінних, налаштовуваних квадрокоптерів, надрукованих на 3D-принтері, які зараз використовуються. Інші застосування включають самовідновлювальні мости (у разі утворення тріщин) та самозбиральні укриття.

Регульована уніформа

Один з поточних проектів Лабораторії самозбірки Массачусетського технологічного інституту – активне пошиття текстилю – був пов'язаний з експериментами з

розумними волокнами, які лагодять саморегульований одяг. Ці носимі пристрої здатні адаптуватися до форми та руху тіла у відповідь на тепло та вологу.

Спеціально для бойових застосувань, у розробці використовуються випробування камуфляжу, схожого на хамелеона, який відображає колірний візерунок об'єкта, щоб він відповідав навколишньому середовищу під час руху в режимі реального часу, а також уніформи, броньовані інтелектуальними матеріалами, що захищають солдатів від токсичних газів.

С. М'які роботи

М'які роботи – це біоміметичні творіння, які замінюють жорстке обладнання на сумісні матеріали, що краще нагадують живі організми. Їх гідрогелевий склад забезпечує гнучку структуру, яка змінюється за розміром і формою, що робить їх більш застосовними для випадків використання, що вимагають м'якшого дотику, згідно з дослідженням, опублікованим у науковому журналі *Polymer*.

М'якість і універсальність, що пропонуються цими 4D-прототипами, надають цінності таким галузям, як медицина та біоніка.

Двоє дослідників з Університету Райса кажуть, що вони недалеко від 4D-друку біомедичних імплантатів, що змінюють форму. За допомогою рідкокристалічних полімерних чорнил їхній підхід відокремлює процес друку від автономного перетворення об'єкта, щоб оптимізувати контроль форми та друкувати складніші структури, як повідомляє видання про медичні технології *Tectales*.

Електрочутливі матеріали, що існують сьогодні, змінюють свій розмір і форму залежно від інтенсивності та/або напрямку зовнішнього електричного поля чи прикладеного електричного струму. Поліанілін та поліпірол (PPy) є, зокрема, добре провідними матеріалами і можуть бути леговані тетрафторборатом для стискання та розширення під дією електричного стимулу. Робот, виготовлений з цих матеріалів, був змушений рухатися за допомогою електричного імпульсу 3 В протягом 5 секунд, що змушує одну ногу розгинати, а потім знімати стимул на 10 секунд, що змушує іншу ногу рухатися вперед. Дослідження вуглецевих нанотрубок, які є біосумісними та високопровідними, показують, що композит, виготовлений з вуглецевих нанотрубок та зразка з пам'яттю форми, має вищу електропровідність та швидкість електроактивної реакції, ніж будь-який зі зразків окремо.

2. Виробництво

Уявіть собі склад, повний коробок. Тепер замініть картонний стандарт розумним матеріалом, просоченим полімерами з пам'яттю форми та світлоактивованими полімерами, закодованими для самоскладання та самозбірки. Важко уявити? Ну, це, мабуть, тому, що це абсолютно новий рівень автоматизації, що розробляється.

У 2015 році Технологічний інститут Джорджії продемонстрував це використання термочутливих полімерів з пам'яттю форми. Згідно з дослідженням, ця техніка

дозволила створити виробничий процес, який «обіцяє просування негайних інженерних застосувань для низьковитратного, швидкого та масового виробництва».

Потенційні способи використання цієї технології включають молочні коробки, сумки для покупок та автомобільні подушки безпеки.

Композитні структури з пам'яттю форми, що містять високопровідні металеві поверхневі шари, також продемонстрували високу електрочутливість. Завдяки високій електропровідності, що забезпечується хімічно покритою металевою поверхнею, ці композити можуть бути використані в електричних пристроях для вимірювання температури (якщо використовується термочутлива матриця полімеру з пам'яттю форми) або як пристрої електробезпеки. Б.К.Й. Чан та ін. виготовили багатотемпературний датчик з різними перемикачами, що спрацьовують за різних температур. Було продемонстровано, що включення металевого покриття не має негативного впливу на характеристики пам'яті форми перемикачів.

Магніточутливі ферогелі стискаються в присутності сильного магнітного поля і, таким чином, мають застосування в доставці ліків та клітин. Поєднання вуглецевих нанотрубок та магніточутливих частинок було надруковано методом біодруку для сприяння росту та адгезії клітин, зберігаючи при цьому високу провідність.

Аерокосмічна галузь

1. Костюми

Космічний архітектор NASA Рауль Пулідо Касільяс надрукував за допомогою 4D-принтера розумну тканину зі срібної металевої сітки з терморегуляцією, вбудованою в костюми астронавтів та покриття космічних кораблів. Відбивні дзеркальні блоки відбивають тепло назовні, одночасно ізолюючи в всередині.

2. Виробництво

4D-друк, як і завжди, пропонує недорогі та довговічні рішення для аерокосмічних проєктів, які можна запрограмувати так, щоб вони витримували суворі умови або навіть адаптувалися до змінного середовища. Дослідження Polymer показало, що легкі термопластичні 4D-матеріали, що використовуються для ремонту супутників, інструментів або деталей космічних апаратів, можуть зменшити масу традиційно виготовлених деталей до 80 відсотків.

Окрім розробки термочутливих матеріалів для кращої терморегуляції своїх двигунів, європейська аерокосмічна корпорація Airbus прагне замінити свої шарніри та гідравлічні приводи на компоненти, схожі на Lego, запрограмовані за допомогою 4D-друку з реактивними метаматеріалами. Це значно полегшує навантаження кожного транспортного засобу, одночасно додаючи функціональності.

Література

Основна література

1. Vinesh Raja, Kiran J. Fernandes. Reverse engineering: an industrial perspective. - London: Springer, 2008. - 242 p
2. Грабченко А.І., Доброскок В.Л. Сучасні технології матеріалізації комп'ютерних моделей: Навч. посібник. – Х.: НТУ "ХПІ", 2009. – 86 с.
3. Адитивні технології : навч. посіб. / Т. Р. Ганєєв, І. О. Прибителько, М. М. Руденко, І. О. Петренко – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – 105 с
4. Пупань Л. І. Постпроцеси адитивних технологій: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. – 91 с.
5. Манжілевський О. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 105 с
6. Srivatsan T. S. Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications / T. S. Srivatsan, T. S. Sudarshan. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 460 p.
7. Масненко І. В., Стельмах Н. В. Поліпшення механічних властивостей друкованих деталей. – 2018.
8. Griffey, Jason. 3-D The types of 3-D printing / Library Technology Reports, 2017.
9. Пічугіна Ю. В., Максимова Ю. О., Мазур Ю. В. Економіка майбутнього – перспективи розвитку 3D друку в Україні. Регіональна економіка та управління. 2020. №1 (27). С. 65-68.
10. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (І частина). Наука, технології, інновації. 2017. № 1. С. 68-77.
11. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (II частина) Наука, технології, інновації. 2017. № 2 (2). С. 29-36.
12. Андрощук Г. О., Копил Я. В. 3D-друк в епоху інноваційних технологій: проблеми регулювання. Інтелектуальна власність в Україні. 2016. № 5. С. 17-26.
13. Гречко О. М. Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2019. № 1. С. 63-75.
14. Олексієнко С. В., Прибителько І. О., Ганєєв Т. Р., Ганєєва Т. В. Адитивні технології в архітектурі та містобудуванні. Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі : зб. тез Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених, 18-19 берез. 2021 Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. С. 40-41.

15. Назаркевич Є. Адитивні технології та 3D моделювання в ювелірному мистецтві. Народна творчість та етнологія, 2021, №2(390). С. 113-122.
16. Струтинська О. В. Сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання та друкування. Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія № 2. Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. 2018. №20(27). С. 88-94.
17. S. Pradhan, S. Kumar, S. Srivastav Canister Satellite Light Weight Chassis Design using Bio Mimicry of Human Skeleton. International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology. 2023. Vol. 10(5). P. 1-9.
18. 3D друк в умовах біомедичного використання [Електронний ресурс] : конспект лекцій з дисципліни «3D друк в умовах біомедичного використання» для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія» денної та заочної форм навчання / уклад. Б. В. Єфременко. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 56 с.

Додаткова література

19. Масючок О.П., Юрженко М.В., Колісник Р.В., Кораб М.Г. Адитивні технології полімерних матеріалів. Автоматичне зварювання. 2020. №5. С.53-60. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.05.08>.
20. Васишин Т., Сорочинський Є. Застосування генеративного дизайну в проектуванні будівельних конструкцій. Матеріали VI Міжнародної студентської науково-технічної конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання», 2023, с. 36-37.
21. Díaz, G., Herrera R. F., Muñoz-La Rivera F. C., Atencio E. (2021). Applications of generative design in structural engineering. Revista ingeniería de construcción, 36(1), 29–47. DOI: 10.4067/s0718-50732021000100029
22. Гривюк О. Технології 3D сканування. Інформаційно-комп'ютерні технології–2018, 2018, 9: 242-245.
23. Топчій Н.В. 3D-сканери. принципи роботи та аналіз сучасного стану. Вчені записки, 2024, 6202425.
24. Солнцев О., Сапон С. Обладнання для гібридних технологій формоутворення виробів з полімерних матеріалів. Технічні науки та технології, 2023, Т. 3(33): С. 9-22.
25. Габовда О.В. Аналіз сучасного стану гібридного адитивного виробництва та перспектив його впровадження в Україні. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2023, Т. 34(1), С. 1-8
26. Тарасюк Г. М., Чагайда А. О. Проектування харчових продуктів з використанням технології 3D-і 4D-друку та його значення для розвитку адитивного виробництва. Економіка, управління та адміністрування, 2024, Т. 4 (110): С. 18-24.
27. Kantaros A., Ganetsos T., Piromalis, D. 4D printing: technology overview and smart materials utilized. Journal of Mechatronics and Robotics, 2023, Vol. 7(1), P. 1-14.

28. 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.
29. Dilberoglu U. M., Gharehpapagh B., Yaman U., Dolen M. The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. Procedia Manufacturing, 2017. Vol. 11. P. 545–554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
30. 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.
31. 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, P. 309–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>
32. 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, P.271–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>
33. Perez M., Carou D., Rubio E. M., Teti R. Current advances in additive manufacturing. Procedia Cirp, 2020, Vol. 88, P. 439-444 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.076>
34. 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>
35. Singh S., Ramakrishna S., Berto F. 3D Printing of polymer composites: A short review. MDPS, 2020. Vol. 2, P. 97. DOI: <https://doi.org/10.1002/mdp2.97>

Навчально-методична література

36. Тексти (конспект) лекцій з дисципліни «Smart-технології в машинобудуванні» для студентів всіх форм навчання спеціальності G9 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології машинобудування» галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво» / Укл. П.Р. Тришин – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 84 с.
37. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Smart-технології в машинобудуванні» для студентів всіх форм навчання спеціальності G9 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології машинобудування» галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво» / Укл. ст. викл. Тришин П.Р. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025 – 75 с.

Інформаційні ресурси

38. Hybrid Manufacturing & The Future of 3D Printing for Production [Елек-тронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.engineering.com/hybrid-manufacturing-the-future-of-3d-printing-for-production/> (дата звернення: 19.05.2025). – Назва з екрана.
39. What is hybrid manufacturing? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.3dsculptlab.xyz/Blog/post/What-is-hybrid-manufacturing> (дата звернення: 19.05.2025). – Назва з екрана.
40. LUMEX Avance-60 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.lumex-matsuura.com/english/lumex-avance-60> (дата звернення: 19.05.2025). – Назва з екрана.
41. Directed Energy Deposition through Powder Nozzle Select series [Елек-тронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-65-ded-hybrid> (дата звернення: 19.05.2025). – Назва з екрана.
42. Top 5 Generative Design Tools of 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.archistar.ai/blog/top-5-generative-design-tools-of-2022/#popup-id-31813> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.
43. The Best Generative Design Software in 2024 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://all3dp.com/1/the-best-generative-design-software/> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.
44. Featured: Applying cutting-edge generative design in NASA & ESA's Mars Sample Return Mission [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.thenewtoncorp.com/news/generative-design-mars-sample-return-mission> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.
45. What to Expect from a Personalized Knee or Hip Replacement [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.conformis.com/personalized-knee-and-hip-implants/> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.
46. MSC Apex Generative Design [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hexagon.com/fr/products/msc-apex-generative-design> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.
47. Product design and manufacturing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.autodesk.com/design-make/pdm> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.
48. Fishing Pliers Reimagined With Generative Design [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://all3dp.com/4/fishing-pliers-reimagined-with-generative-design/> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.
49. Automated CAE for rear axle concepts [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.synera.io/focused-case-study/automated-cae-for-rear-axle-concepts> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.