

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

Тришин П.Р.

ТЕКСТИ (конспект) лекцій з дисципліни

«Адитивні технології»

для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»
освітньої програми «**Технології машинобудування**»

Тексти (конспект) лекцій з дисципліни «Адитивні технології» для студентів всіх форм навчання спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології машинобудування» галузі знань «Механічна інженерія» / Укл. П.Р. Тришин – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 77 с.

Укладач: П.Р. Тришин, PhD, ст. викладач

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

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

Затверджено
на засіданні кафедри ТМБ
протокол № 2
від 21.09.2022 р.

Рекомендовано до видання НМК
машинобудівного факультету
протокол № 1
від 22.09.2022 р.

ВСТУП

Сучасна економіка характеризується високою міждержавною конкуренцією, зміною факторів економічного зростання, економічних моделей та впровадженням інноваційних технологій, до яких по праву належать і адитивні технології, або так званий тривимірний друк.

Історія установок для друку об'ємних зразків налічує вже майже три десятиліття, але довгий час вони залишалися екзотичними пристроями з граничною ціною та дуже обмеженою сферою застосування. Однак останніми роками інтерес до них став зростати в геометричній прогресії, причому не тільки в ентузіастів чи вузьких фахівців: компанії, які займаються виробництвом та проектуванням найрізноманітнішої продукції, активно використовують 3D-принтери, а уряди найбільш розвинених країн роблять або планують найближчим часом зробити інвестиції у створення центрів розвитку технологій 3D-друку, здатних скоротити витрати виробництва складної технічної продукції. І не тільки: розуміючи, що в найближчому майбутньому знадобиться чимало фахівців у цій галузі, розробляються або вже впроваджуються плани навчання основ 3D-моделювання та друку в освітніх закладах.

Тривимірний друк, з'явившись у 1980-ті рр., пройшла за цей короткий час колосальний еволюційний шлях, розділившись на два основні напрямки - швидке створення моделей та адитивне виробництво. Батьком техніки адитивного друку вважають Ч. Халла людину, яка сконструювала перший стереолітографічний 3D-принтер, який працює на SLA-технології. Незабаром інший інженер С. Крамп зміг спроектувати та створити FDM-принтер. Незважаючи на те, що дані технології друку дещо відрізняються один від одного, їх поєднує один принцип - пошарове вирощування тривимірної моделі. До кінця 90-х років обидві технології почали застосовувати у промисловості. Трохи пізніше 3D-технологія була впроваджена двома студентами Массачусетського інституту у настільні принтери, і сьогодні адитивні технології, технології 3D-моделювання широко використовують не лише у виробництві, а й у побуті.

Адитивні технології – одна з форм технологій адитивного виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу (друку, вирощування) за даними цифрової моделі. Друк здійснюється спеціальним пристроєм – 3D-принтером, який забезпечує створення фізичного об'єкта шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу на основі віртуальної 3D-моделі. 3D-принтери, як правило, швидші, більш доступні і простіші у використанні, ніж інші технології адитивного виробництва. 3D-принтери пропонують розробникам продуктів можливість друку деталей і механізмів з декількох матеріалів та з різними механічними і фізичними властивостями за один процес складання.

3D друк часто називають «магічною» технологією, оскільки дозволяє перетворювати, отримані в САД-системах в готові вироби. У реальності процес 3D-друку вимагає також багато ручної праці, що включає попередню підготовку і подальшу обробку надрукованих деталей для досягнення їх бажаної якості.

Для створення 3D-моделі використовуються САПР або САД-системи, що дають можливість створювати 3D-моделі. Після процесу створення 3D-моделі її зберігають в спеціальному форматі наприклад STL. Для підготовки моделі в форматі STL

до друку використовують програми слайсери. Окремі САПР в своєму функціоналі мають слайсери. Слайсери в своєму функціоналі мають можливість поділу моделі на шари а також створення підтримок чи інших допоміжних деталей які після друку будуть відділені від основної деталі. Окрім створення додаткових елементів слайсер дає змогу налаштувати режим друку: температуру сопла, температуру стола, швидкість друку та інші.

За допомогою 3D-принтера дані технології дозволяють швидко конструювати та відтворювати об'єкти з високою трудомісткістю створення в умовах звичайного традиційного виробництва (від дрібних деталей, наприклад, в аерокосмічній галузі та медицині, до великих промислових конструкцій).

По суті, 3D-друк - це повна протилежність стандартним методам виробництва та обробки, таким як фрезерування та точення, де обробка здійснюється шляхом видалення зайвої частини заготівлі

Першу класифікацію адитивних технологічних методів виробництва деталей було наведено у стандарті ASTM F2792.1549323-1 (США), за останні двадцять років у зв'язку з бурхливим розвитком технологічного обладнання вона значно застаріла.

За принципом формування деталі (нанесення шару) слід виділити два напрями розвитку адитивних технологій. Перший напрямок – формування деталей шляхом поєднання матеріалу, розподіленого на робочій поверхні платформи технологічного обладнання. Основні види технологічного обладнання для виробництва деталей даними методами адитивних технологій:

- SLA Stereolithography Apparatus;
- SLM Selective Laser Melting;
- DMLS Direct Metal Laser Sintering;
- EBM Electron Beam Melting;
- SHS Selective Heat Sintering;
- MIM Metal Injection Molding;
- Ink-Jet или Binder Jetting;
- UAM Ultrasonic Additive Manufacturing;
- LOM Laminated Object Manufacturing.

Другий напрямок формування деталей шляхом прямого осадження матеріалу. На принципі прямого осадження матеріалу побудовано такі види технологічного обладнання для виробництва деталей методами адитивних технологій:

- CLAD Construction Laser Additive Directe;
- EBDM Electron Beam Direct Manufacturing;
- MJS Multiphase Jet Solidification;
- BPM Ballistic Particle Manufacturing;
- MJM Multi Jetting Material.

За методом фіксації шару виділяються три способи: фотополімеризація, сплавлення (спікання) та склеювання.

Застосовувані матеріали розрізняються за такими типами:

- рідкі (фотополімери акрилові та епоксидні);
- сипучі (полімери, пісок, металевий порошок);
- пруткові, ниткоподібні (полімери, метали);

- листові, плівкові (ПВХ-плівки, фольга, листовий прокат).

До найважливіших переваг адитивних технологій належать:

- Поліпшені властивості готової продукції. Завдяки пошаровій побудові вироби мають унікальний набір властивостей. Наприклад, деталі, створені на металевому 3D-принтері, за своєю механічною поведінкою, щільністю, залишковій напрузі та іншим властивостям перевершують аналоги, отримані за допомогою лиття або механічної обробки;

- Значна економія сировини. Адитивні технології використовують практично ту кількість матеріалу, яка потрібна для виробництва вашого виробу. Тоді як при традиційних способах виготовлення втрати сировини можуть становити до 80...85%;

- Можливість виготовлення виробів зі складною геометрією. Обладнання для адитивних технологій дозволяє виробляти предмети, які неможливо отримати в інший спосіб. Наприклад, деталь усередині деталі. Або дуже складні системи охолодження на основі сітчастих конструкцій (цього не отримати ні литтям, ні штампуванням);

- Мобільність виробництва та прискорення обміну даними. Більше ніяких креслень, вимірів та громіздких зразків. В основі лежить комп'ютерна модель майбутнього виробу, яку можна передати за лічені хвилини на інший кінець світу і відразу розпочати виробництво.

- Скорочення термінів та вартості запуску виробу у виробництво завдяки відсутності необхідності у спеціалізованому інструментальному оснащенні;

- Можливість та економічна доцільність дрібносерійного та кастомізованого виробництва;

- Можливість внесення оперативних змін до проекту на етапі виробництва; персоналізація дизайну;

- Скорочення втрат та відходів виробництва;

- Можливості для спрощення логістики, скорочення часу постачання, зменшення обсягів складських запасів.

Адитивні технології є сучасним та інноваційним методом виробництва. До традиційних ринків застосування, що виділяються у виробничому процесі, належать оснащення, форми та моделі для лиття, науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи, виготовлення експериментальних зразків. Адитивні технології широко використовуються для прототипування і розподіленого виробництва в архітектурі, будівництві, промисловому дизайні, автомобільної, аерокосмічної, військово-промислової, інженерної та медичній галузях, біоінженерії (для створення штучних тканин), виробництві модного одягу і взуття, ювелірних виробів, в освіті, географічних інформаційних системах, харчової промисловості та багатьох інших сферах людської діяльності.

За останнє десятиліття 3D-друк з хобі перетворився на одну з найпопулярніших у світі технологій. Її використовують від аерокосмічної та військової промисловості до медицини, дизайну, будівництва. Зовсім не так, як замислювали винахідники технології у 80-х роках минулого століття.

Завдяки адитивним технологіям є можливість виробляти складні та досить високотехнологічні вироби. Досить широке застосування адитивні технології знайшли в медицині. Завдяки 3D друку є можливість виробляти індивідуальні протези та імпланти, можливо проводити передопераційні підготовки на моделях, які надруковані зі знімків МРТ хворого, проводити більш якісне навчання спеціалістів завдяки точним копіям органів людини, які можливо надрукувати на 3D принтері.

До нових ринків, що виділяються у виробничому процесі, відноситься виготовлення серійного виробництва повнофункціональних аналогів деталей та промислової продукції, а також виробництво промислової продукції з характеристиками, реалізація яких традиційними методами виробництва є дуже скрутною.

До ринків майбутнього, що формуються, відносяться 3D-друк будівель та електронних комплектуючих, 3D-біодрук органів, ліків і харчових продуктів, автономне виробництво в космосі, виготовлення серійного виробництва великогабаритних повнофункціональних аналогів деталей та промислової продукції.

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.



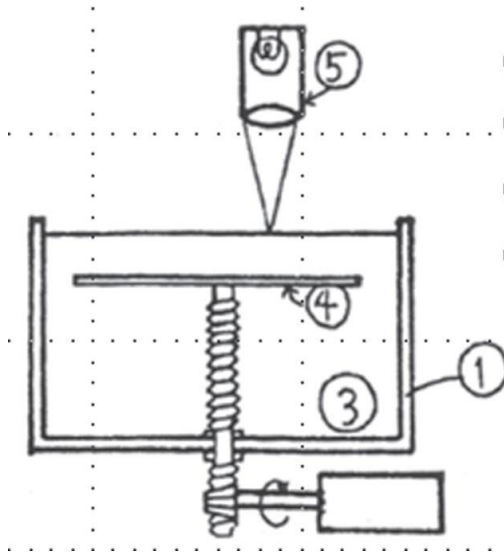
Рис. 1 – Хидео Кодама

Доктор Хидео Кодама (рис. 1) з Нагойського муніципального науково-дослідного інституту промисловості шукав найпростіший метод. У 1981 році доктор Хидео 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. 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.

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. 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.

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. 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 експонирования

Рис. 2 – Базове обладнання тривимір-
ного принтера

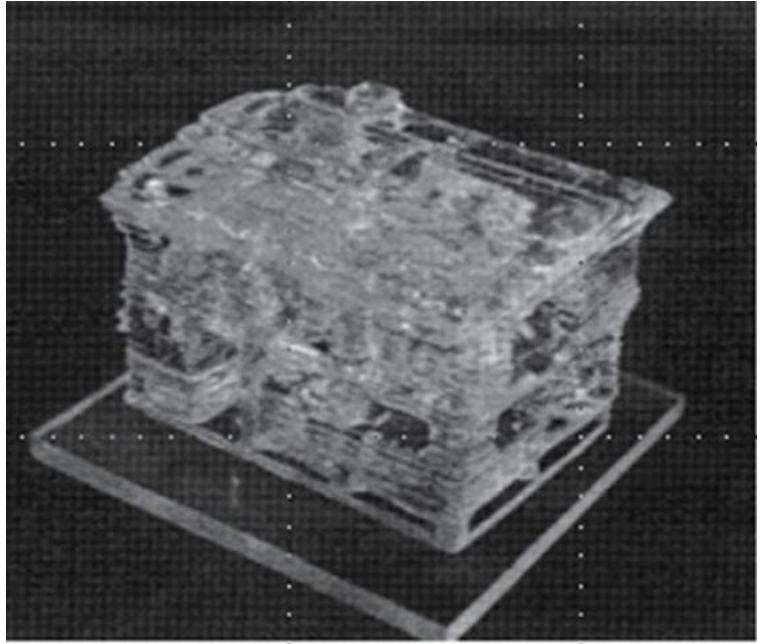


Рис. 3 – Фотографія першої 3D-моделі

На рис. 3 представлена фотографія першої 3D-моделі, виготовленої з викорис-
танням 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 впро-
вадження інновацій в основні технології виробництва побутової електроніки та авто-
мобілебудування, а також в інших сферах, таких як медицина та дизайн. Останнім
часом метод моделювання став більш різноманітним, і моделювання може бути виго-
товлене з різних матеріалів, таких як пластик і метал, що допомогло розширити за-
стосування 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 фотополі-
мерним матеріалом піддається впливу УФ-випромінювання, яке твердне і буде мо-
дель 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 тривимі-
рної моделі: він докладно пояснює свою роботу і всі експерименти, що призвели до
створення предка стереолітографії (SLA).

- Автоматичний метод виготовлення тривимірної пластикової моделі з фотот-
вердіючим полімером, в огляді Scientific Instruments. У цій статті він описує три ос-
новні методи "3D-друку" для створення пластикових деталей шар за шаром з викори-
станням фотополімеризації. Він також дає важливу інформацію для створення про-
цесу 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). 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 – 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



Рис. 5 – Чак Халл, винахідник 3D-друку

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

У багатьох джерелах батьком 3D-друку вважають Чарльза (Чака) Халла (рис. 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. 6).

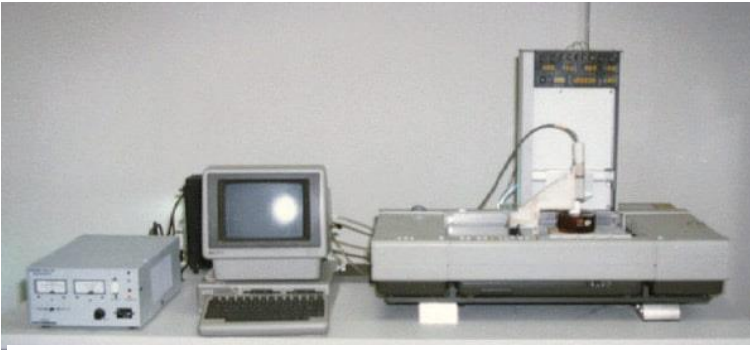


Рис. 6 – Перший 3D-принтер під назвою SLA-1

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



Рис. 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 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. 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.

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. 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. 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. 9 – Модель, виготовлена методом пошарового формування з листового матеріалу

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

Виготовлення моделі, зображеної на рис. 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. 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.

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) Декард 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.

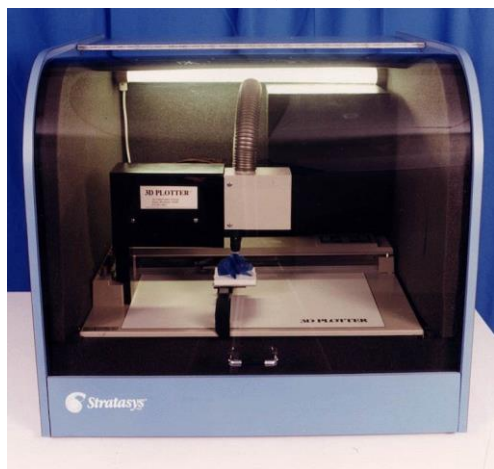
Апарат, заснований на технології SGC друку, використовує дорогі, токсичні і досить рідкісні полімери. Він працює досить гучно і потребує постійного контролю з боку оператора.

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 жабеня 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 порталльної 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. 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. 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. 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».

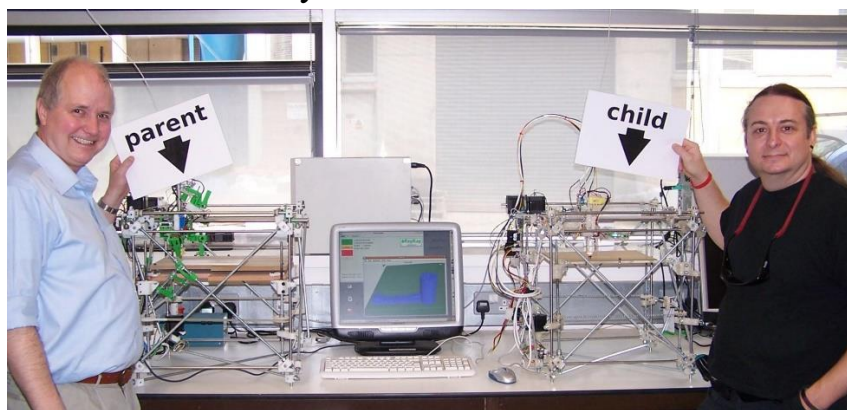


Рис. 12 - Пластикові деталі для машини праворуч були виготовлені на ліворуч. Адріан Бауер (ліва) та Вік Оллівер (праворуч) – учасники проекту RepRap0 .

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.

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.

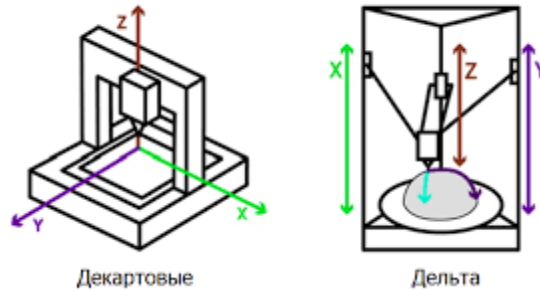


Рис. 13 – Схеми кінематики 3D-принтеру

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.

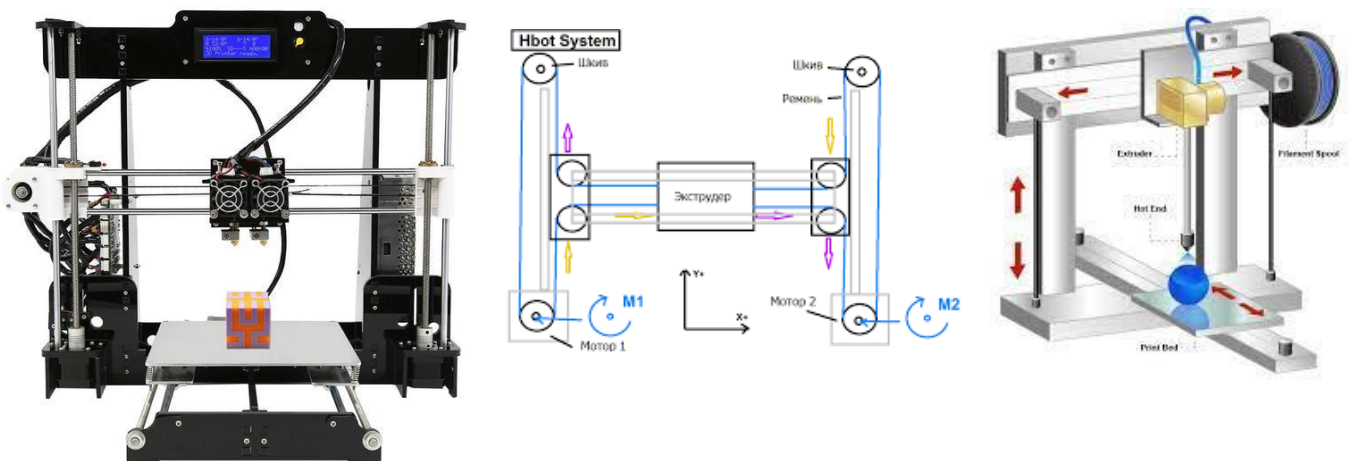


Рис. 14 – 3D-принтер декартового типу

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.

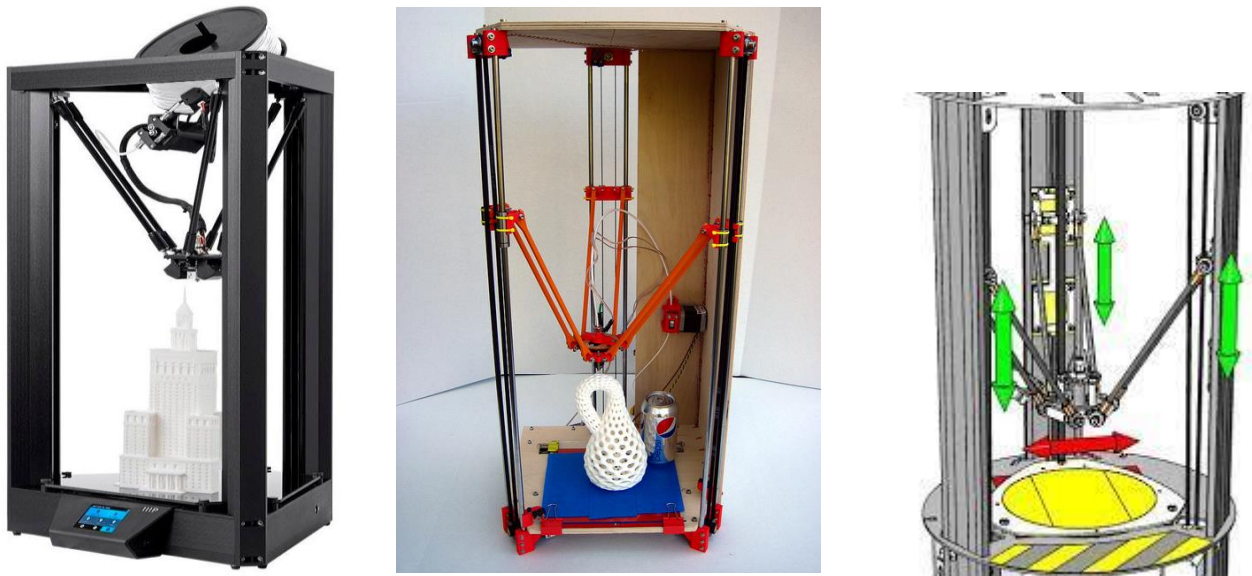


Рис. 15 – 3D-принтер с дельта кинематикой

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.
- програмне 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.

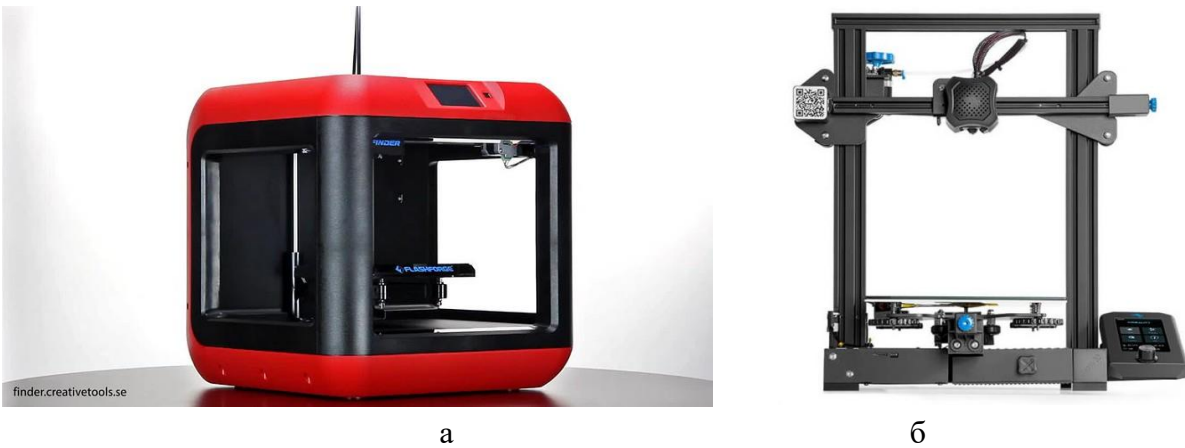


Рис. 16 - 3D-принтер із закритим корпусом (а) та з відкритим (б)

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

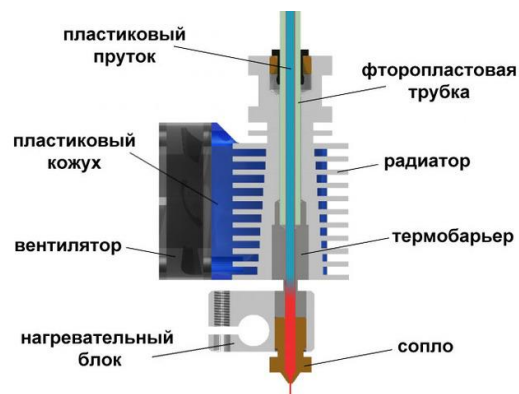
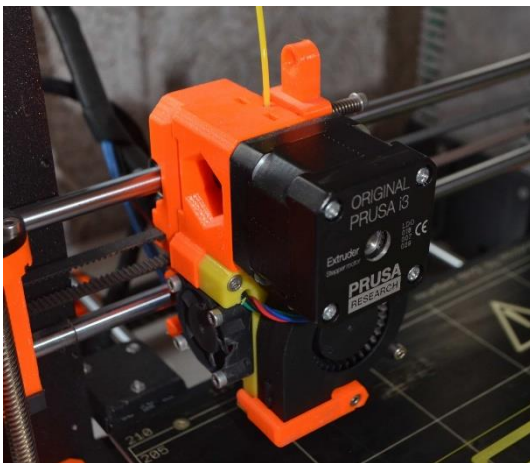


Рис. 17 – Екструдер

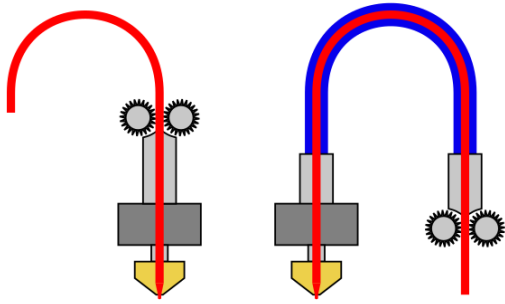
Екструдер є невід'ємним елементом будь-якого 3D-принтера. Цей інструмент призначений для розплавлення пластикової нитки та видавлювання її на стіл. Є два типи подачі матеріалу через екструдер.

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. 18 – Подача матеріалу

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 переконатися, 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.

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.



Рис. 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.

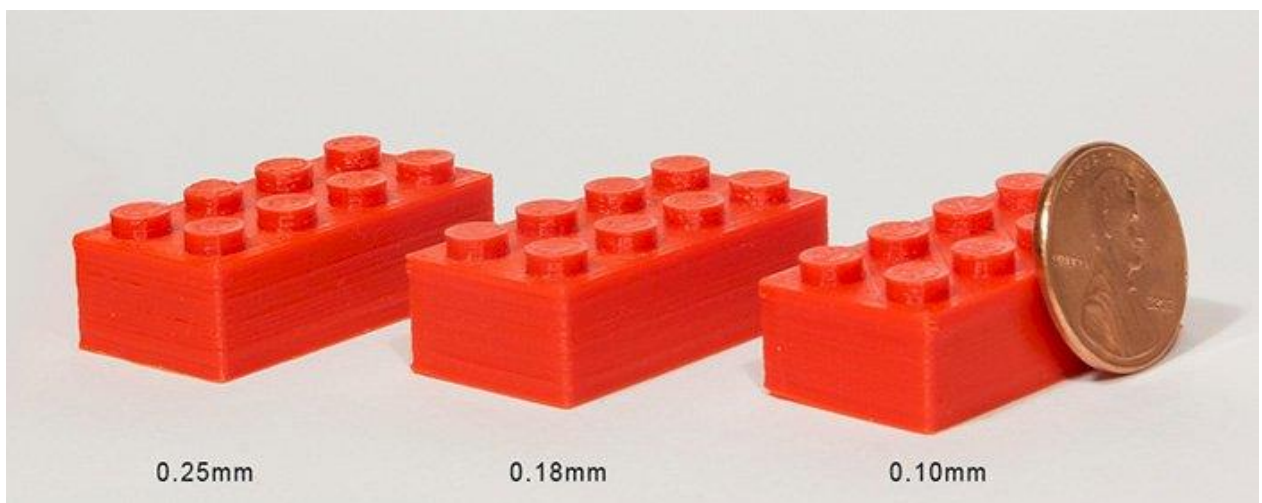


Рис. 20 – Вплив діаметру сопла

Варто відзначити, 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.

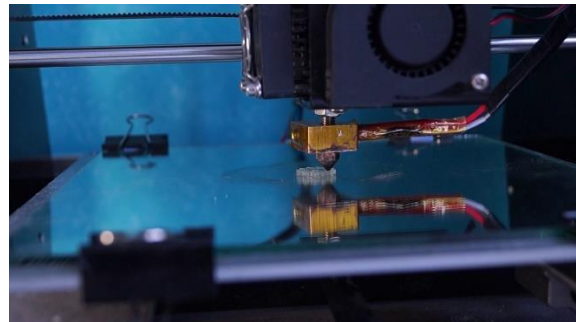
Варто відзначити, що композитні матеріали (будь-які нитки на основі частинок, такі як деревний наповнювач, мідний наповнювач, нейлон з вуглецевого волокна або армований склом нейлон) будуть викликати проблеми з екструзією при використанні тоншого сопла. Це з тим, що у цих нитках є частинки, які, хоча 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 полієфірміду використовується на багатьох принтерах. Такий вид покриття відмінно підходить, тому що вимагає мінімальних зусиль для друку.



а



б

Рис. 21 – Стіл з полієфірміду (а) 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 віддерти 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 витoku 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.

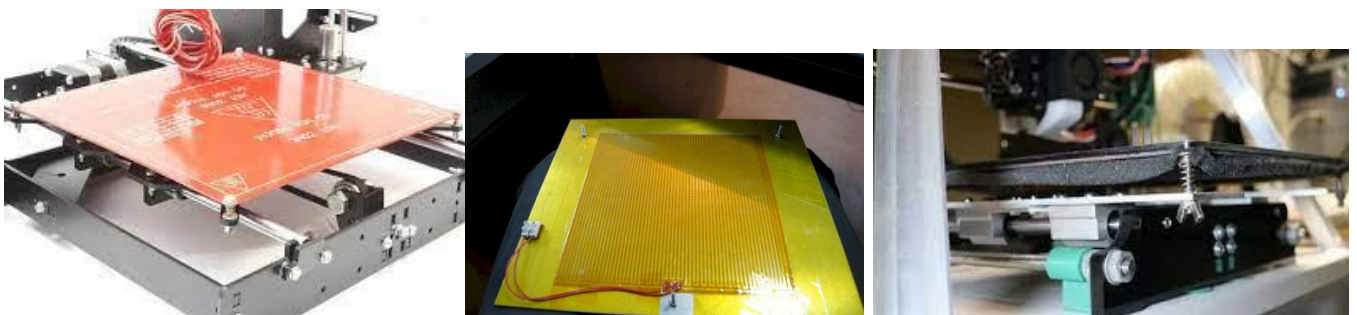


Рис. 22 – Стіл з підігрівом

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

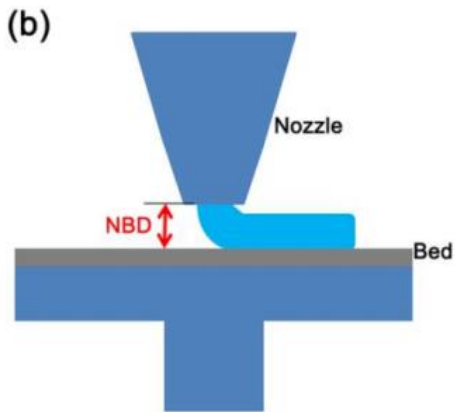


Рис. 23 – Відстань від сопла до столу

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 столу 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.

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

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 катушок) нагрівається до температури плавлення і подається в зону друку. Головка переміщається по двох координатах, синтезуючи певний шар моделі. Потім платформа опускається, створюється новий шар і т.д.

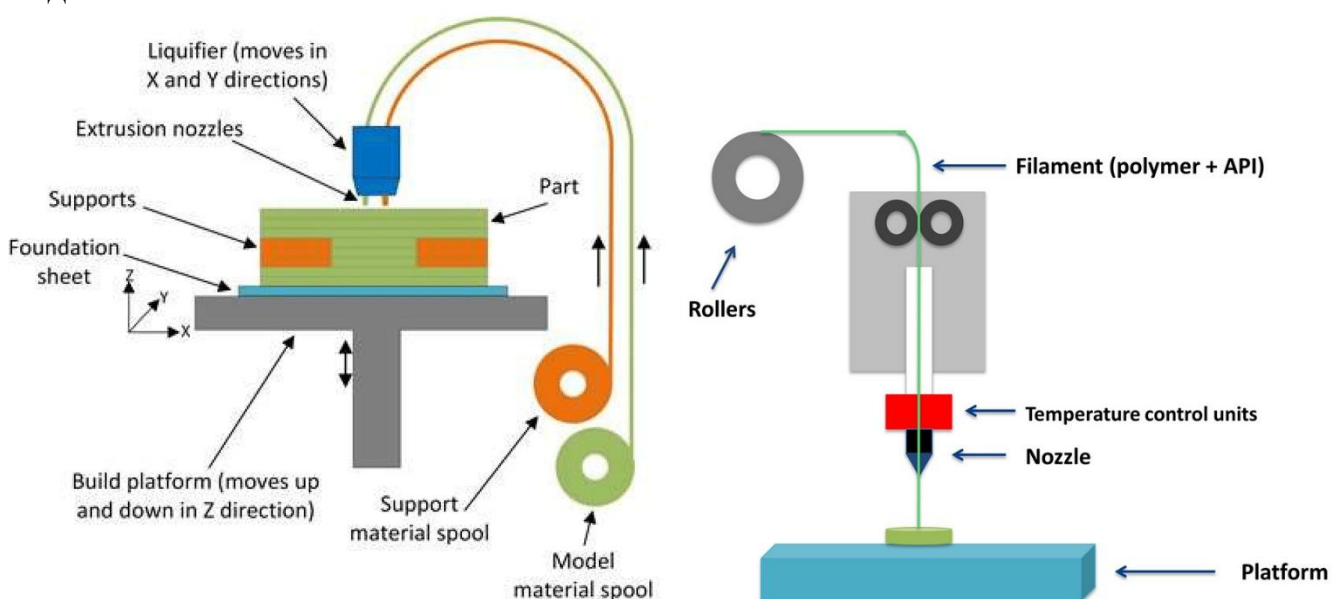


Рис.24 – Принцип роботи FDM 3D-принтерів

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. 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 плавленим 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.

3.2 Стереолітографія

Стереолітографія використовує рідкі модельні матеріали - фотополімерні смоли. Прикладом можуть служити стереолітографія (SLA - 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.

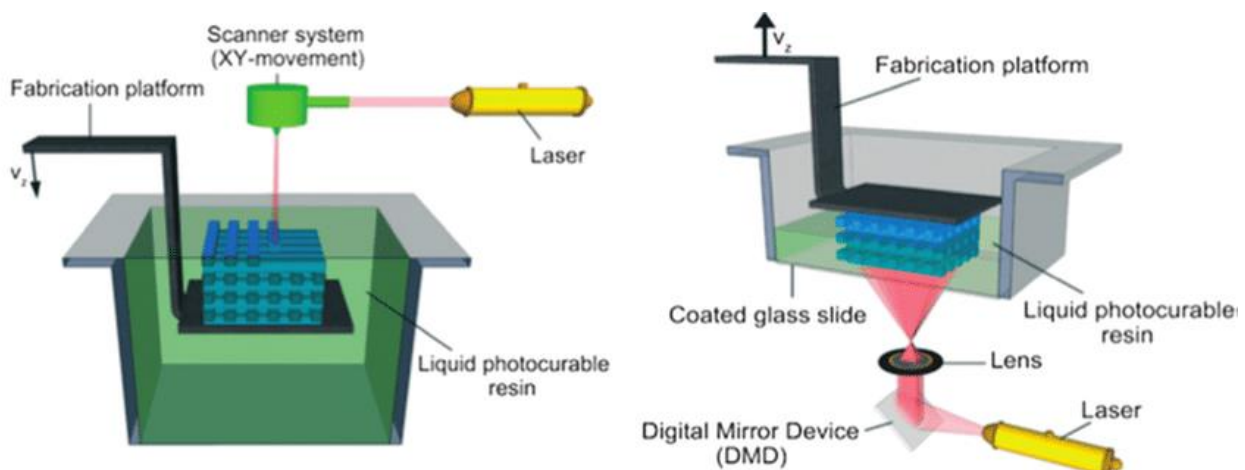


Рис. 26 - Принцип роботи SLA 3D-принтерів

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.

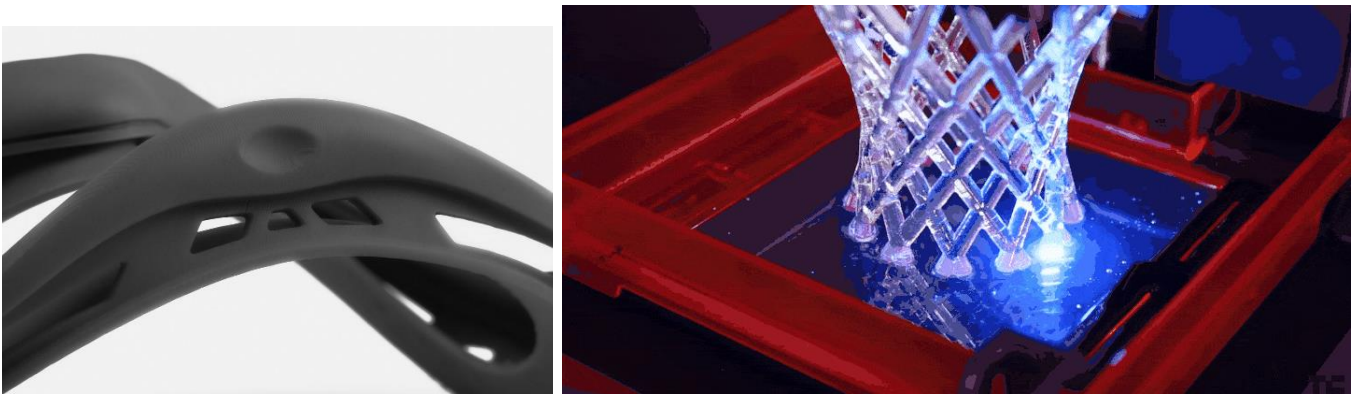


Рис. 27 – Модель отримана технологією SLA

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.

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.

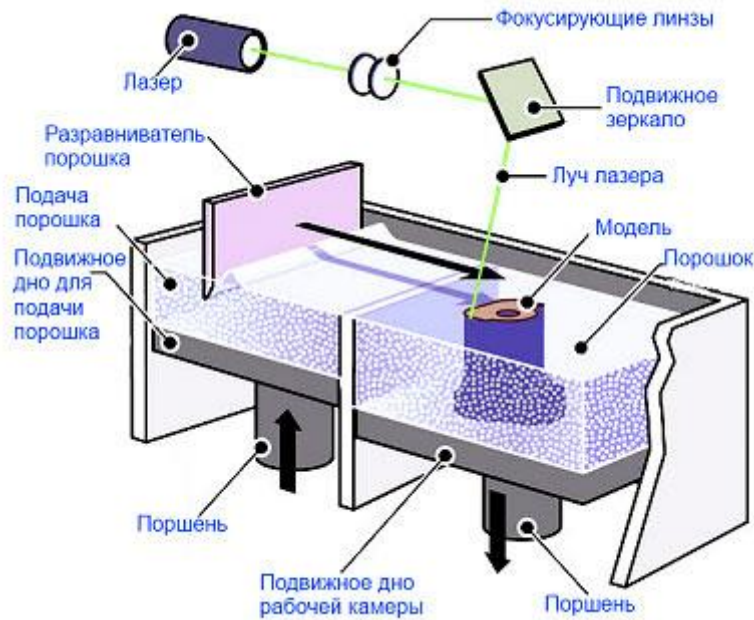


Рис. 28 – Принцип роботи принтеру на SLS технології

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. 29 - Селективное лазерное спекание (SLS) металлического порошку

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. Матеріали для 3D-друку.

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. 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 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 °С
Максимальна температура тривалої експлуатації	75-80 °С
Рекомендована температура друку	220 – 250 °С
Температура платформи	100 – 110 °С
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 врахувати, 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. 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 вентиляційною 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 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 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. PP 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 PP (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 PP 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 - 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 размягчення	160-168 °С
Максимальная температура длительной эксплуатации	100-110 °С
Рекомендуемая температура печати	200 – 210 °С
Температура платформы	80 – 90 °С
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 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°С
Максимальная температура длительной эксплуатации	75°С
Рекомендуемая температура печати	210 — 240°С
Температура платформы	около 100°С
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 проєктів, 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.

4.2 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. 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.

5. Сфери застосування 3D-друку.

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.

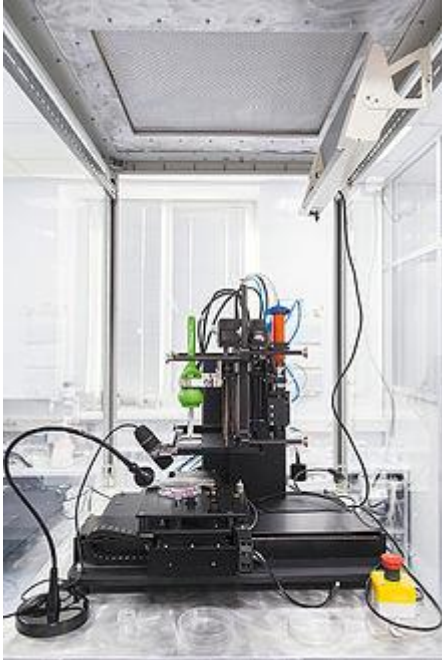


Рис. 33 – 3D-біопринтер

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, ви-

готовлення 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

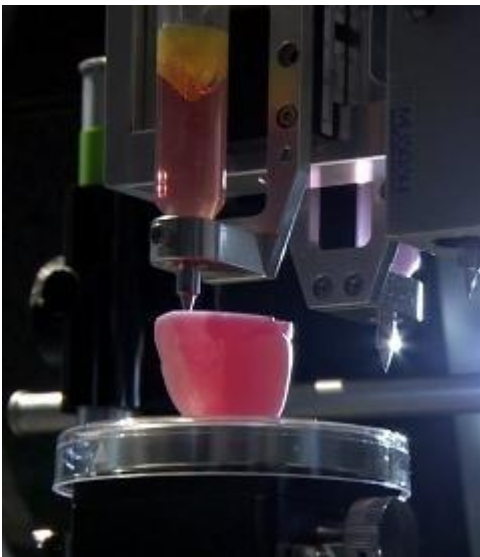


Рис. 34 – 3D друк штучної нирки

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.

5.2 Харчові принтери

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».



Рис. 35 – Принтер Cornucopia для друку продуктів харчування

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.

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. 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. 37 – Перший ручний принтер 3Doodler

Популярності нвбув, осодливо 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.

5.4 Застосування 3Д 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. V. 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 3Д 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 3Д 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 запитом;
- 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.

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 конструкторів. 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.

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-принтерам запчастини можна виробляти там, де вони потрібні. Виробництво переміщується 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. 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.

6. Програмне забезпечення для підготовки моделі для друку.

Обов'язковою умовою для початку тривимірного друку є наявність цифрової моделі планованої до друку. Існує кілька способів отримання такої моделі:

- створення тривимірної моделі об'єкта за допомогою будь-якого 3D-редактора;
- сканування існуючого об'єкта.

Звичайно ж, найпростіше відсканувати вже існуючий об'єкт. Є два варіанти сканування об'єктів:

- сканування з використанням 3D-сканера та програмного забезпечення, що поставляється в комплекті з ним;

- використання фотоапарата і спеціальних програм захоплення тривимірних моделей об'єктів за їхніми фотографіями (наприклад, Autodesk 123D Catch).

Навіть якщо ви скануєте реальний об'єкт за допомогою сканера, швидше за все вам захочеться його доопрацювати. Тому сьогодні 3D-редактор - необхідний інструмент для всіх, хто хоче друкувати унікальні і незвичайні моделі.

Найчастіше в якості 3D-редакторів застосовуються системи автоматизованого проектування або системи автоматизованого дизайну (скорочено САПР і CAD). Варто відзначити, що вітчизняний термін САПР є більш широким порівняно з англо-язичним терміном CAD. Так, до переліку САПР крім CAD-систем включаються CAE (computer aided engineering) - системи розрахунків і інженерного аналізу, CAM (computer aided manufacturing) - системи проектування технологічних процесів виробництва, PDM (product data management) - системи координації та управління проектним даними, SCM (supply chain management) - системи управління ланцюжками поставок матеріалів і комплектуючих.

Існує безліч форматів файлів для моделей, але більшість 3D-принтерів використовує STL-формат. На жаль, не всі STL-файли можуть бути роздруковані. Модель, що підходить для друку, повинна мати «герметичну» форму із закритою монолітною поверхнею, без будь-яких розривів, яка чітко розділяє внутрішню і зовнішні частини моделі. Програми комп'ютерної графіки (такі, як Blender) зазвичай моделюють поверхню, не переймаючись про «герметичності» моделі. Тому рекомендується на перших порах використовувати програмне забезпечення, спеціалізованим на створення монолітних моделей, наприклад, 123 Design. Розглянемо найбільш популярні сучасні програмні засоби тривимірного моделювання.

1. Autodesk 3Ds Max. Вкрай функціональна програма. З нею можна реалізувати будь-яку задумку, тому вона так популярна серед інженерів і дизайнерів. Це програма поверхневого моделювання, з її допомогою створюються об'єкти, не придатні для об'ємної друку.

2. SolidWorks. Своєрідна твердотільна альтернатива передньому софту. З її допомогою створюються вироби з самого початку заповненням внутрішнім простором. Програма також допоможе оцифрувати двомірні креслення.

3. Autodesk 123D Design. Це безкоштовна програма з хорошим функціоналом і вкрай зручним інтерфейсом. Один з кращих тривимірних редакторів, так як програма дуже проста в освоєнні.

4. Google SketchUp. У її роботі використовується свій власний формат SKP. З незаперечних переваг програми SketchUp є- цілий набір запатентованих розробниками інструментів, які роблять роботу з програмою легкою і результативною.

5. Materialise Magics. Дана програма відстежує всі можливі проблеми і допомагає отримати результат. Її робота починається з етапу імпортування даних і закінчується на підготовці платформи. Materialise Magics - програма, яка орієнтована на роботу з сітковими оболочками і дозволяє в автоматичному режимі виправити різні помилки і дефекти в тілі STL-файлу.

6. On-line сервіс Tinkercad призначений для створення 3D-моделей безпосередньо в браузері. Потім можна передавати його на друк. Ця розробка заснована на базі WebGL, що дає користувачеві можливість працювати з даним сервісом без необхідності установки додаткових додатків. Цілком достатньо браузера, який підтримує WebGL (Opera 12 Alpha, Firefox або Chrome). Моделі, створені за допомогою Tinkercad, можна завантажити на локальний диск або зберегти на сервері.

7. Solidworks Standard. Дана програма має два основних напрямки роботи: гібридне параметричне моделювання та проектування виробів при специфічних умовах виготовлення. Також дане програмне забезпечення надає можливість користуватися такими функціями, як:

- бібліотека проектування;
- експрес-аналіз;
- експертні системи;
- оформлення креслень в ЕСКД;
- анімація;
- трансляція даних.

8. OpenSCAD - програмне забезпечення, яке призначене для створення твердотільних 3D САПР-об'єктів. OpenSCAD працює шляхом читання файлу сценарію, в якому описаний об'єкт, а потім вона будує 3D модель. В результаті у користувача є повний контроль над процесом, можливість змінювати кроки в процесі моделювання, або при виробництві параметричних конструкцій.

OpenSCAD працює за двома основними методами:

- CSG - конструктивна суцільна геометрія,
- екструзія (видавлювання двомірних контурів).

9. T-flex CAD 3D - ідеальне рішення для того, щоб автоматизувати конструкторсько-технологічну підготовку виробництва. Дана програма дає користувачеві надійні і потужні інструменти, а також забезпечує можливу інтеграцію з найкращими програмами в цій галузі.

Можливості для просторового моделювання:

- масінерційні характеристики тривимірних складальних конструкцій і для твердих тіл;
- візуалізація тривимірних об'єктів (шейдинг, рендеринг, ре-Берні модель і видалення невидимих ліній);
- можливість отримання точних креслень за розрізами і видам 3D-моделі;
- отримання фотореалістичних зображень;
- аналіз кривизни поверхонь;

- завдання матеріалів, установка джерел світла, накладення те-кстур, установка «камер».

Різноманіття різних функцій і можливостей для отримання по-трібного результату дозволяє вибрати для роботи саме те програмне забезпечення, яке допоможе зробити проектування і друк на 3D-принтері швидкими, зручними і ефективними.

12. FreeCAD - параметричний тривимірний редактор, що дозволяє створювати об'ємні моделі і креслення їх проекцій. Буде до вподоби всім, хто хоче ознайомитися з тривимірним моделюванням і анімацією, перш ніж перейти до більш складним програмам. Це відносно проста система для тривимірного проектування, оснащена засобами моделювання руху. Крім завдань проектування, програма стане в нагоді для освоєння геометрії, кінематики, динаміки, принципів побудови механізмів і моделювання фізичних процесів.

Поширюється FreeCAD безкоштовно. Існують версії програми для різних операційних систем.

Крім класичних програм, багато дизайнерів користуються онлайн-редакторами. Якщо у вас є 3D-принтер, програма для моделювання може бути використана і в інтерактивному режимі:

- 3DTin - зручний і стильний тривимірний редактор;
- 123D Design - функціональний тривимірний редактор;
- Thinkercard - редактор, який орієнтується в основному на дитячу аудиторію, поєднаний з галереєю тривимірних об'єктів

Програма-слайсер – це програмне забезпечення для нарізки моделі на шари для друку, діє як посередник між 3D-моделлю та 3D-принтером. Після того, як ви змоделювали об'єкт, який ви хотіли б надрукувати у 3D, ви отримаєте його у файлі STL. Слайсер перетворює модель на серію тонких шарів і створює файл G-коду, що містить інструкції, адаптовані для конкретного типу принтера. Іншими словами, він ділить об'єкт на стос плоских шарів і описує ці шари як лінійні переміщення екструдера 3D-принтера, що фіксує лазера або його еквівалента.

Від роботи слайсера кінцевий результат друку залежить чи не більше, ніж від можливостей самого принтера.

Інтерфейс всіх слайсерів розбитий на блоки-розділи налаштувань. Основних блоків шість:

1. Налаштування самої програми, що не впливають на параметри друку:
 - вибір локалізації - мови, одиниць виміру;
 - включення/вимкнення розширених функцій;
 - колірне оформлення, параметри відображення;
 - інформаційні вкладки.
2. Підключення принтера:
 - вибір марки та моделі;
 - керування процесами екструдера, встановлення швидкості та температури, вказівка кількості друкуючих головок.
3. Вибір філаменту, зазначення виду матеріалу та його характеристик.
4. Робота з моделлю:
 - позиціонування;
 - масштабування;

- модифікація;
- аналіз.

5. Параметри слайсингу – порядку пошарового формування об'ємного об'єкта із цифрової моделі. Тут налаштовуються сервісні конструкції: підтримки, стіни та інші допоміжні елементи.

6. Додаткові установки: скрипти, плагіни та макроси, що містять заздалегідь розроблену послідовність команд - включення паузи для зміни філаменту, холости пересування по осях, зупинку та відновлення друку в потрібний час на вказаному шарі та інші.

Кожен розробник пише програму на основі цієї структури, формує посилання та взаємозв'язки параметрів.

Для нарізки моделей розроблено багато програмних продуктів. Деякі працюють лише з певною маркою 3D-пристроїв, але більшість є універсальними та підходять для будь-якого принтера.

Слайсер UPStudio – програма лише для принтерів Tiertime. Працює з 3D-моделями та з фотографіями, які можна перетворити на барельєф. Функції програми стандартні для слайсерів. Зв'язок з принтером здійснюється через Wi-Fi або через інтерфейс USB.

Плюси:

- зрозумілі для початківців налаштування та доступний інтерфейс;
- є бібліотека готових моделей;
- доступні стандартні та розширені налаштування;
- крім десктопної версії є мобільний додаток для пристроїв Apple (тільки англ. інтерфейс).

Мінуси:

- необхідно створити обліковий запис та прив'язувати до нього принтер, інакше функціонал буде обмежений;
- недостатній список налаштувань, немає регулювань швидкості друку;
- не працюватиме з «чужими» пристроями – лише з Tiertime.

FlashPrint - це закритий слайсер від Flashforge для однойменного 3D-обладнання. Є всі стандартні функції та кілька додаткових.

Плюси:

- мінімалістичний, зручний та зрозумілий інтерфейс;
- запропоновано налаштування Basic (для початківців) та Expert (для просунутих);
- вбудована перевірка на коректність моделі та є опція «лікування»;
- представлена функція створення барельєфів із 2D-зображень.

Мінуси:

- не русифіковано.

Незважаючи на те, що слайсер закритий, при бажанні може бути використаний для принтерів, площа друку яких збігається з пристроєм Flashforge.

IdeaMaker – це слайсер, поставляємий разом із принтерами Raise3D. Позиціонується розробниками як програмний продукт «обирай та друкуй». Незамінний інструмент для підготовки моделі, вибору філаменту, налаштування параметрів друку, що гарантує якісний результат. Працює з більшістю 3D-принтерів.

Плюси:

- легкий та інтуїтивний інтерфейс;
- збереження, імпорт та експорт профілів друку;
- віддалений контроль через Wi-Fi та керування кількома друкуючими пристроями;
- можливість різати великі об'єкти кілька частин.

Мінуси:

- через малу популярність програмного забезпечення важко знайти допомогу в спільноті користувачів.

Simplify3D - це професійна програма для роботи з 3D-пристроями різних виробників.

Плюси:

- широкий список марок та моделей принтерів для підключення;
- кінцевий результат відрізняється якістю;
- стандартні та розширені налаштування, великий вибір інструментів та опцій;
- дає змогу сформувавши власний шаблон;
- висока швидкість нарізки;
- підтримка кількох екструдерів;
- онлайн-саппорт для користувачів, відеоуроки та мануали у відкритому доступі.

Мінуси:

- для налаштування принтера за маркою потрібен доступ до Інтернету та оплачена ліцензія;

Simplify3D – потужний софт для друку моделей будь-якої складності. Встановлюється не тільки на ПК і ноутбуки, але і на планшети, але з урізаним функціоналом.

Ultimaker Cura – універсальна програма для пошарового нарізування моделей. У списку сумісних принтерів кілька десятків марок із розширеним списком моделей.

Плюси:

- простий інтерфейс;
- для початківців є вбудовані шаблони налаштувань;
- для просунутих пропонуються тонкі регулювання параметрів друку та скрипти-плагіни;
- До списку принтерів можна додати кастомний екземпляр;
- відображає час друку та витрату філаменту.

Мінуси:

- невисока якість готового об'єкта при стандартних налаштуваннях;
- розширені параметри складні для початківців.

3DPrinterOS - це хмарний сервіс для створення мережі принтерів та керування ними. Рекомендується для освітніх установ, дрібносерійних виробництв. Працює з файлами різних форматів: CAD, OBJ, STL, G-code та ін.

Плюси:

- доступ до принтерів та файлів з будь-якої точки світу;
- широкий вибір інструментів для підготовки об'єкта до 3D-друку;
- не потребує встановлення на ПК.

Мінуси:

- незначний вибір установок.

Astroprint – це cloud-сервіс для віддаленого керування принтером, завантаження та обробки для подальшого друку 3D-моделі. Є можливість встановлення на одноплатний комп'ютер Raspberry Pi та доступ до роботи у браузері.

Плюси:

- безліч вбудованих веб-сервісів для вивчення 3D-друку;
- простий інтерфейс;
- сумісний із більшістю друкувальних пристроїв;
- доступне коригування моделей.

Мінуси:

- складна установка та налаштування в Raspberry Pi, що вимагає специфічних знань;
- принтер підключається через AstroBox Touch, якщо не має вбудованого шлюзу.

Програма слайсер - програмне забезпечення, що перетворює вашу 3D модель в програмний код, який буде зчитуватися 3D-принтером. G-код – це мова програмування для верстатів з числовим програмним керуванням, яким є наш 3D принтер. Файл з G-кодом знаходиться в форматі TXT, де кожен рядок коду називається кадром. Існує базова частина мови, на основі якої різні компанії з виробництва верстатів створюють свої підмови і команди. Наприклад G-код Ultimaker і RepRap трохи відрізняються, і обидва вони дуже примітивні в порівнянні з G-кодами для промислових верстатів.

Формування G-коду відбувається автоматично програмою «слайсер» після завантаження в неї 3D моделі деталі. У слайсері задається технологія виготовлення деталі, на основі якої і формується G-код. Зазвичай структура керуючого файлу для FMD принтеру виглядає так:

- а) коментарі з різною інформацією;
- б) підготовчі операції;
- в) робоча частина-виготовлення деталі;
- г) заключні операції.

Коментарі

Коментарі можна вставляти окремим кадром або після основних команд. Починаються зі знака «;» і необхідні для чіткого розуміння, які параметри 3D друку були задані в програмі «слайсер». Наприклад, скільки часу займе процес друку, дані про заповнення моделі пластиком, товщина стінок, діаметр пластика, що видавлюється.

Підготовчі операції.

У цьому проміжку G-коду, є можливість доповнити вихідний код своїми командами і напрацюваннями. Наприклад, перед початком операції прогнати пластик через сопло, після закінчення друку екструдер повернути в домашню позицію, опустити стіл, щоб побачити результат друку, витирання сопла перед друком, зміна пластика, при друці одним соплом.

Робоча частина – виготовлення деталі.

Робоча частина складається в основному з переміщень екструдера (голівки), за координатами і видавлювання пластика, а також саморегулювання температури столу, якщо він має нагрівальний елемент.

Заключні операції.

Цей етап полягає в тому, що в ньому вимикаються всі базові настройки принтера, задані на початку роботи.

7. Підготовка 3D-моделей до друку. Налаштування друку.

7.1 Основні налаштування друку за допомогою програми Repetier Host

Налаштування принтера. У верхньому правому куті програми знаходиться



кнопка "Налаштування принтера" Printer Settings.

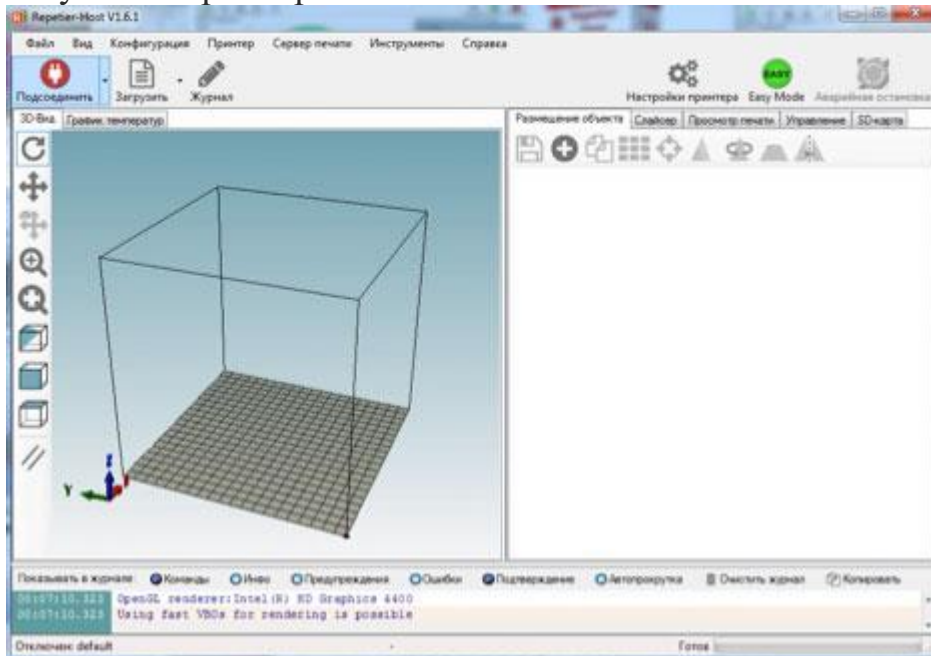


Рис.39 – Вікно програми

Натиснувши відкриється наступна вкладка, яка називається "Екструдер". Тут виставляються параметри екструдера та його елементи. По-перше, тут можна змінювати їх кількість, якщо у Вас, наприклад, 2 екструдери, що друкують одночасно різними пластиками. Нижче вказано мінімальну та максимальну температуру сопла, але зазвичай у прошивці принтера стоїть поріг у 260 °С.

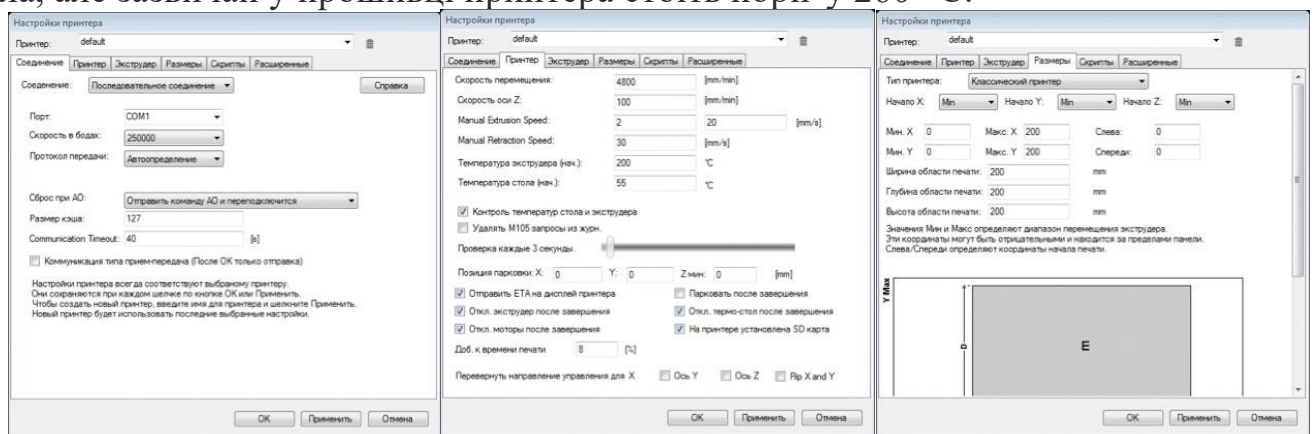


Рис.40 – Вікно програми

Кожному з екструдерів можна задати діаметр сопла та колір пластику, все це обов'язково потрібно вказувати в налаштуваннях слайсера, тому що саме звідти принтер буде черпати інформацію під час друку. Зі вкладки "з'єднання" Вам варто

звернути увагу на порт. Це usb slot, у який вставляти шнур 3D принтера. Краще поставити «Авто», якщо ви часто будете змінювати місце підключення. У наступній вкладці "Принтер" знаходяться безпечні налаштування пристрою. Більшість принтерів використовують дані налаштування та змінювати їх слід лише в тому випадку, якщо до принтера додається власний конфігураційний файл з такими параметрами. Ім'я можна змінити у верхній вкладці, спочатку він записаний, як «default». Наступна вкладка "Розміри" характеризує межі друку. Їх можна змінювати в залежності від Вашого пристрою. Якщо Ви щось змінили, то тиснемо «Застосувати» та «Ок». Тепер у лівому верхньому кутку потрібно натиснути на іконку "Під'єднати", після чого вона має стати зеленою та змінитись на "З'єднано".

Розміщення об'єкту. За допомогою вертикальної панелі керування видом, що розташована зліва. Натиснувши на одну з іконок, переходимо у певний спосіб керування видом вибраної 3D моделі. Її можна обертати, переміщати тощо.

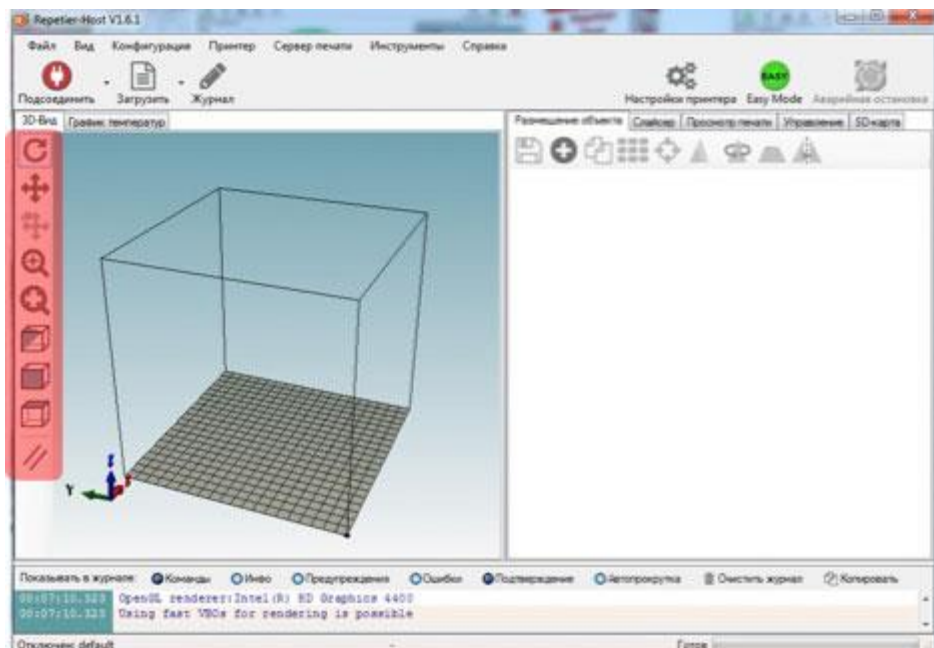





Рис.41 – Вікно програми

Перші три кнопки змінюють поведінку лівої кнопки миші. Починаючи згори, ви отримуєте «Повернути» , «Перемістити об'єкт»  та «Збільшити» . Всі функції можна використовувати за допомогою клавіш керування, тому вам не потрібно постійно щось змінювати.

Управління: Утримуючи кнопку керування, ви можете обертати вигляд лівою кнопкою миші. Утримуючи Shift, можна переміщати точку огляду лівою кнопкою миші. Переміщайте об'єкт, утримуючи праву кнопку миші. Коліщатко миші - масштабування

З цим значком  об'єкти будуть збільшені, щоб точно відповідати області попереднього перегляду.



З наступними трьома іконками ви можете вибрати одну з встановлених орієнтацій виду. Додаткові параметри перегляду ви знайдете у верхньому меню «Вид».

Праворуч у нас знаходиться практично порожнє велике поле, в якому поки що знаходяться позиції завантажених моделей. Виділена жовтим - це діюча 3D деталь. На ній видно 3 значки. Вічко, як завжди, дозволяє приховати деталь з поля графічного представлення, кошик - для видалення деталі, а шестерня потрібна для налаштування. Крім того, у вікні деталі можна вибирати кількість цих деталей.

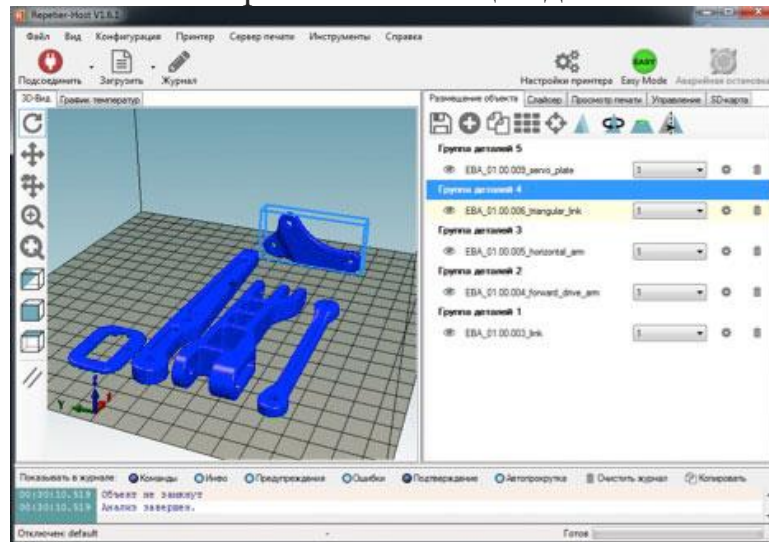


Рис.42 – Вікно програми

Вкладка "Розміщення об'єкта" (праворуч вгорі). Якщо ми хочемо додати іншу деталь, потрібно перейти в горизонтальну панель інструментів, розташовану трохи вище за поле 3D моделей. Якщо Ваша 3D модель не замкнута і її треба полагодити. Іконка з дискеткою дозволяє зберегти набір вибраних деталей у різних форматах. Тобто Ви можете при частому друку робити збірки та не збирати наново набори деталей

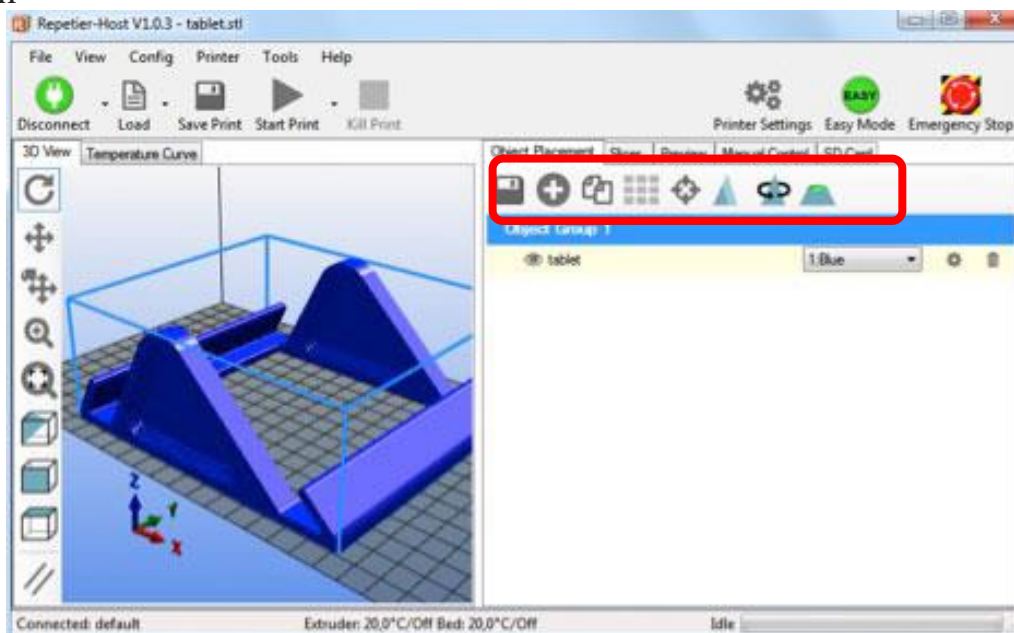


Рис.43 – Вікно програми



- цією кнопкою ви можете експортувати відразу всі об'єкти, що відображаються. Якщо ви збережете їх як файл .amf, угруповання об'єктів та призначення матеріалів залишаться без змін, якщо ви збережете їх як файл .stl або .obj, все буде об'єднано в один об'єкт.



- цією кнопкою ви можете додавати об'єкти у форматі .stl, .obj, .amf та .3ds.



- цією кнопкою ви можете дублювати зазначені об'єкти стільки разів, скільки захочете.



- цією кнопкою ви можете розмістити всі об'єкти так, щоб вони розташувалися на площині столу.



- цією кнопкою активується функція, яка центрує зазначений об'єкт у центрі столу.



- цією кнопкою можна відображати об'єкти.



- Іконка у вигляді трикутника дозволяє трансформувати модель по осях. Це дуже корисно, коли потрібно швидко масштабувати об'єкт. Можна трансформувати обрану 3D модель як за якоюсь виділеною осі, натиснувши на замок, так і по всіх трьох осях. Цифра 1, яка спочатку стоїть у полі кожної осі, означає 100%.



- іконка з трикутником і стрілкою дозволяє обертати об'єкт по осях.



Передостання іконка виконує роль перерізу моделі.

Вкладка "Слайсер". Це також дуже важливе вікно. Для максимальної зручності та якості, частіше використовують перший варіант слайсера Slic3r, тому що він дуже точний, простий у налаштуванні та дає відмінний результат. Щоб підігнати цей слайсер під свій 3D принтер (можна створити кілька різних налаштувань і просто відкривати по потребі або одну або іншу), необхідно змінити його параметри. Для цього необхідно натиснути на кнопку «Конфігурація» і у Вас з'явиться таке віконце з налаштуваннями слайсера. Конфігурація поділена на дві основні частини. Найбільша частина – це параметри друку, вони розділені на п'ять вкладок. Друга частина — це параметри нитки, які містять параметри, на які впливає вибір нитки.

Slic3r – це зовнішнє програмне забезпечення для слайсерів, яке постачається разом із хостом. Ви можете запустити його прямо з хоста за допомогою кнопки Конфігурація. Там можна створити стільки профілів, скільки захочете.

CuraEngine – це зовнішнє програмне забезпечення для слайсерів, яке постачається разом із хостом. Щоб використовувати його, вам зазвичай потрібна лише права вкладка зі швидкими налаштуваннями. Тут ви вибираєте наперед визначені конфігурації для використання, а також деякі важливі налаштування. Щоб визначити параметри конфігурації, натисніть кнопку «Конфігурація». для входу в налаштування.

Skeinforge - це зовнішнє програмне забезпечення для слайсерів, яке поставляється в комплекті з хостом і працює майже так само, з тією різницею, що у вас є тільки один тип профілю на вибір. Для Skeinforge потрібні дві програми. По-перше, це сама

програма. Вона покаже всі профілі та дозволить нарізати об'єкти. Ви будете використовувати його лише для визначення профілів нарізки. Друга «skeinforge_craft.py» - це програма, яка виконує нарізку. Skeinforge написано на python і вимагає запуску python 2.7.

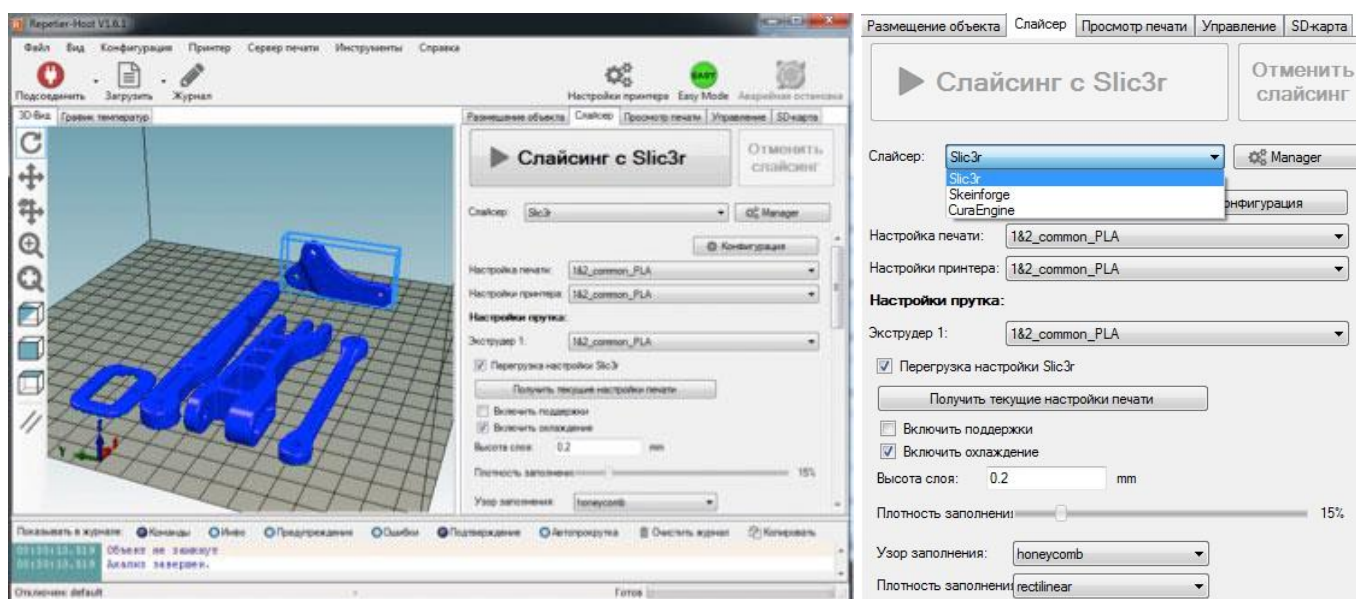


Рис.44 – Вікно програми

У випадку, якщо у Вас є 3D моделі з елементами, що висять у повітрі, треба поставити галочки в поле "Включити підтримки". Ще дуже важливо вибрати «Візерунок заповнення». Ми використовуємо «Honeycomb», українською – стільники. Справа в тому, що при друкуванні ABS пластиком, виникає скручування деталі, якщо він дуже щільний. Дуже сильно скручуються довгі волокна вздовж їхнього напрямку. Тому, якщо вибрати як візерунок заповнення, наприклад, «Rectilinear», то цей ефект буде проявлятися сильніше, адже це заповнення є прямими лініями пластику, що утворюють квадратну клітину. Після того, як вибрано всі параметри, необхідно запустити слайсинг за допомогою великої кнопки відповідної назви.

Через деякий час Repetier Host переведе Вашу stl модель у формат gcode, зрозумілий 3д принтерам.

Вкладка "Перегляд друку". Після нарізки ви можете побачити результат нарізки. Ви можете обертати та перевіряти всю модель, діапазон шарів або лише окремі шари, а також візуалізувати переміщення. Таким чином, ви можете перевірити, чи все правильно перед печаткою, що може заощадити багато часу

У верхній частині знаходяться 4 кнопки. Кнопка "Друк" працює, якщо принтер підключено до Вашого комп'ютера. Натиснувши на неї, файл у форматі gcode завантажиться в принтер і почнеться друк, стежити за яким можна буде на екрані комп'ютера.

Інша кнопка називається "Зберегти файл". Це дозволяє зберегти файл gcode для подальшого використання, наприклад на знімний носій.

Наступна кнопка дуже схожа на попередню – "Записати для друку з SD". Тут файл зберігається безпосередньо на знімний носій, щоб вставити в 3D принтер і запустити друк вручну.

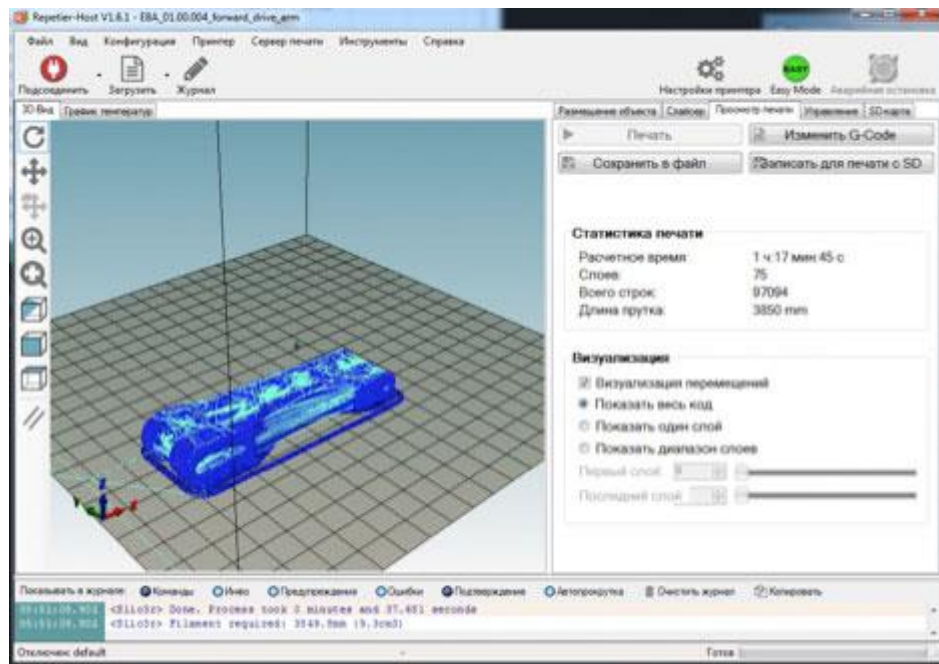


Рис.46 – Вікно програми

Кнопка "Змінити gcode" потрібна для зміни вручну програми. Коли G-код завантажений, ви бачите модель нитки зліва, якщо вона не вимкнена. Зазвичай вищі шари приховують вміст нижнього шару. Якщо ви виберете вкладку «Візуалізація» у нижній частині редактора, ви можете вибрати, яку частину ви бажаєте бачити. За замовчуванням використовується повний код, але ви можете вибрати один шар або кілька шарів. Якщо ви шукаєте відповідний g-код, перегляньте рядок стану редактора. Він показує шар, якому належить рядок із курсором. Якщо поточний рядок створить надрукований рядок, цей рядок буде виділено у попередньому перегляді. Ви навіть можете позначити більший діапазон коду, і всі ходи друку, що містяться в ньому, будуть виділені.

Наступним полем є статистика друку файлу. Основним параметром є час друку. Це досить важливо, коли потрібно знати через скільки 3D модель буде готова. Відразу варто сказати, що Repetier Host занижує цей час на 20-25%.

Ще одним важливим параметром є довжина дроту, необхідна для друку 3D моделі. Досвідченим користувачам ця інформація корисна у разі, коли котушка пластика добігає кінця. Кількість шарів і рядків зазвичай не беруть до уваги.

Наступне поле називається "Візуалізація". Тут ви зможете подивитися, як пошарово проходить друк. Це особливо важливо, коли потрібно подивитися, чи не виходить друк за межі поля, чи не перетинається 3D модель з іншими об'єктами. За допомогою різних повзунків даного поля можна вивчити кожен шар. Особливо часто дивляться, як ляже перший шар під час друку зі спідницею.

Вкладка "Керування". В ній можна спостерігати процес друку, якщо 3D принтер підключено до комп'ютера. Коли ви вмикаєте принтер, ви часто заходите на цю вкладку. Вгорі ви бачите найважливіший стан принтера, тому завжди знаєте, що відбувається. Рядок дозволяє відправити будь-яку команду G-коду, яка вам подобається. Введіть його та натисніть «Введення» або натисніть кнопку «Надіслати». За допомогою курсорних клавіш вгору/вниз можна пересуватися по історії команд, відправлених вручну. Якщо увімкнено простий режим, це поле не відображається.

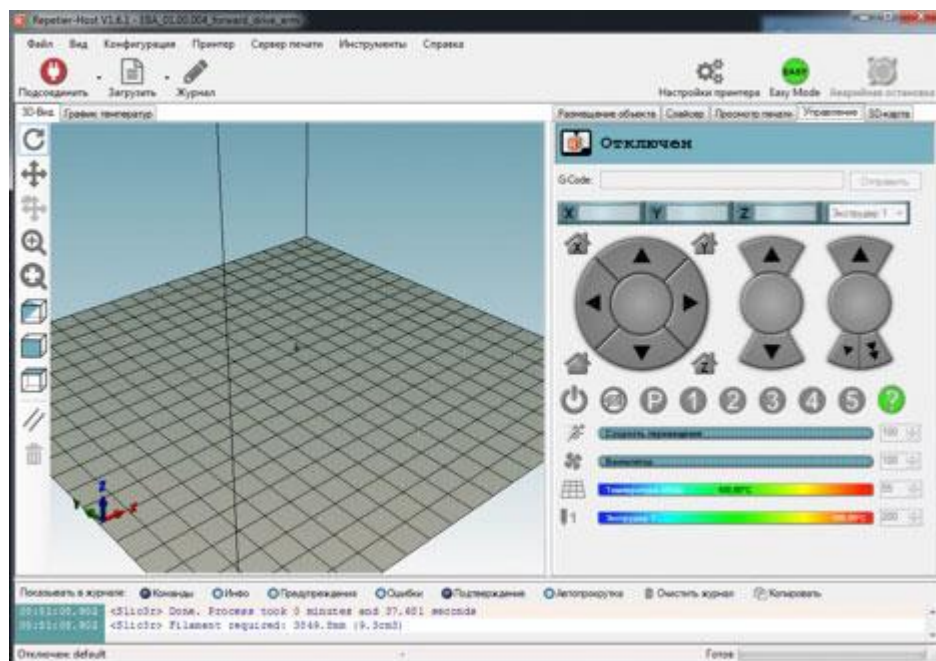


Рис.47 – Вікно програми

Наступний блок керує позиціонуванням екструдера. За допомогою клавіш зі стрілками ви переміщуєте екструдер у будь-якому напрямку. Коли ви наведете курсор на стрілку, ви побачите відстань у міліметрах, яка вказує, наскільки більшим буде переміщення. Угорі ви бачите поточне положення екструдера. Після підключення вони червоні. Червоний означає, що хост не має поняття, де насправді знаходиться екструдер. Натисніть кнопку «Додому», щоб перемістити екструдер у задане положення. Після цього колір стає чорним, повідомляючи, що позиція відома. Відтепер переміщення можливі лише всередині куба принтера, визначеного в установках принтера. Таким чином, якщо ви знаходитесь на $x = 180$, а куб має ширину 200 мм, натискання на 50 мм праворуч приведе лише до 200 мм.

Повзунок «Збільшення швидкості» дозволяє змінювати швидкість друку/переміщення залежно від швидкості подачі під час надсилання. Якщо «Простий режим» вимкнено, можна змінити швидкість потоку, тобто. кількість нитки, що екструдеться. Більш високе значення value дає жирнішу друкарську лінію. Блоки екструдера та друкарської платформи дозволяють змінювати температуру. Температуру можна встановити праворуч у текстовому полі, так і натиснувши на температурну криву. Якщо ви зміните його в текстовому полі, потрібно натиснути клавішу повернення або вийти з поля, щоб встановити значення. Якщо у вас підключений вентилятор, можна змінити швидкість обертання вентилятора і активувати/деактивувати його так само, як і температуру.

7.2 Налаштування друку

Основні модулі. Найважливіші три верхні вкладки: "Print Settings", "Filament Settings", "Printer Settings". Почнемо саме з "Print Settings", який у нас зараз і відкритий. Це налаштування 3D друку. Перше, що ми бачимо під вкладкою, це назва нашого профілю налаштування. Праворуч від нього є дві кнопки, що дозволяють зберегти чи

видалити його. Натиснувши «Зберегти», вилізе вікно, де можна зберегти змінений налаштування в існуючий файл налаштувань, або створити новий. Для кожного принтера існує власний файл опції. Крім того, трапляються випадки, коли необхідно швидко надрукувати 3D деталь. У такі моменти за якістю 3D друку ніхто не женеться, тому в налаштуваннях потрібно змінити деякі параметри для збільшення швидкості друку. Ну і останнє, для чого потрібно мати кілька файлів налаштування слайсера Repetier Host, це використання різних матеріалів пластику. Можна створювати кілька файлів налаштувань, а також їх можна експортувати та імпортувати у Repetier Host через вкладку "File". Перша графа налаштувань називається Layers and perimeters, тобто налаштування параметрів шарів і периметрів цих шарів.

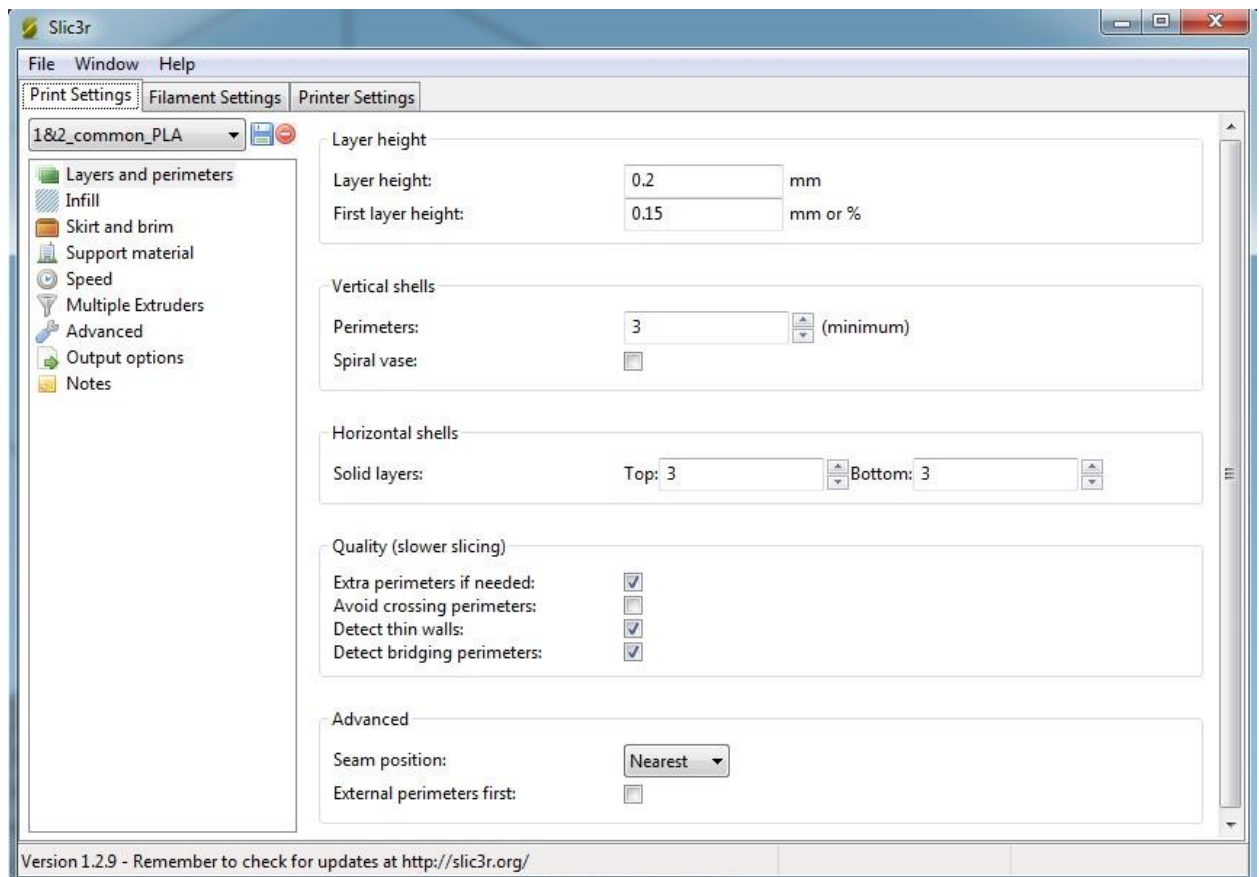


Рис.48 – Вікно програми

Layer height – товщина шарів, з яких складається Ваша деталь. Вона відповідає за якість 3D моделі. Чим тонший шар, тим вища якість, але тим довше друкуватиметься деталь. Крім того, є мінімальна товщина шару для кожного принтера, а точніше сопла. Для звичайних принтерів для досягнення відмінної якості 3D моделі при використанні сопла 0.3 мм цей параметр ставлять 0.2.

First layer height – товщина першого шару. Repetier Host пропонує виставляти цей параметр у 1.5 рази вище ніж Layer height. Так як цей параметр відповідає за прилипання до столу і служить зовнішньою поверхнею деталі, краще послухати цю рекомендацію. Можна виставити параметр, такий, як і в Layer height. Якщо з прилипанням проблем немає і у Вас буде повністю заповнених перших шарів, то можна поставити цей параметр трохи нижче Layer height.

Vertical shells – вертикальні стінки моделі. По суті це і є периметри шарів.

Perimeters – кількість стінок або периметрів. Щоб зрозуміти, що це за параметр, треба згадати, як проходить 3D друк. Спочатку екструдер окреслює контур шару. Потім заповнює його із певною щільністю заповнення. Так ось, цей показник дорівнює кількості контурів, які екструдер зробить перед тим, як почати заповнення. Чим більший цей параметр, тим міцніша зовнішня поверхня деталі. Але зі збільшенням шарів є і паразитний ефект – скручування деталей. Тому RobotON рекомендує ставити цей параметр не більше ніж 3, тому що міцність деталі і так на високому рівні.

Spiral vase – параметр для друку вази. Модель друкується в одну стінку, без верхньої поверхні та заповненням - 0%.

Horizontal shells – горизонтальні стінки. Відповідають за нижню та верхню поверхню деталі.

Solid layers Top – кількість суцільних шарів зверху моделі. Оптимальне значення 2-3.

Solid layers Bottom – кількість суцільних шарів знизу моделі. Оптимальне значення 2-3.

Quality – якість. RobotON рекомендує ставити галочку навпроти 1, 3 та 4.

Extra perimeters if needed - додає додаткові стінки, якщо є перепустки на похилих стінках.

Avoid crossing perimeters - рух екструдера здійснюється так, щоб не перетинати стінки під час руху.

Detect thin walls – виявлення тонких стінок. Цей параметр шукає тонкі стінки, які можна побудувати лише в один прохід екструдера. І проводить слайсинг з огляду на це.

Detect bridging perimeters – виявляє звисаючі елементи та виставляє на них параметри, як на друк мостів – швидкість, подачу матеріалу (flow) та обдування.

Seam position – початок побудови шару. Має три варіанти:

- Random – випадковий.
- Nearest – найближчий.
- Aligned - вирівняний\посередині-краю.

External perimeters first - зовнішні периметри будуються першими (за умовчанням вимкнено).

Тепер переходимо до наступної графі налаштувань "Infill". Цей розділ відповідає за заповнення шару. Того, що лежить усередині його контуру. Перейдемо до розгляду налаштувань заповнення 3D друку.

Fill density – густина заповнення. Показує, наскільки порожня буде деталь. Для звичайного 3D друку, що застосовується в робототехніці, домашніх виробів та інших подібних застосувань, ми рекомендуємо ставити цей параметр 15-20%. Якщо Ви хочете надрукувати дуже міцну деталь, Вам буде достатньо поставити 80%. Цей параметр дуже впливає на час друку!

Fill pattern – рисунок заповнення. Для зменшення ефекту скручування 3D деталі, ми рекомендуємо використовувати малюнок у вигляді бджолиних сотень Honeycomb.

Top/bottom fill pattern - рисунок заповнення перших шарів. Тут краще ставити лінійне наповнення Rectilinear.

Reducing printing time – скорочення часу друку.

Combine infill every – на яких шарах відбуватиметься повне заповнення. RobotON рекомендує ставити 10 - тобто кожен десятий шар матиме 100% заповнення.

Only infill where needed - буде заповнення тільки там, де верхнім рівням потрібні підтримки, в інших місцях модель виходить пустотілою. RobotON рекомендує не використовувати цей параметр.

Advanced – просунуті налаштування.

Solid infill every – друк горизонтальних перегородок поверх заповнення через вказану кількість шарів. RobotON рекомендує не використовувати цей параметр.

Fill angle – кут друку сітки заповнення. RobotON рекомендує 45.

Solid infill threshold area – заповнення площі менше зазначеної буде здійснюватися 100% заповненням. RobotON рекомендує 40-70.

Only retract when crossing perimeters – ретракція лише тоді, коли йде обхід периметра. Ретракція – це процес, коли екструдер втягує пластик назад. Це дуже корисний інструмент, тому що при русі екструдера, той тягне за собою тонкі нитки пластику, створюючи павутину всередині моделі. Це призводить до сильної втрати якості. Тому RobotON рекомендує не використовувати цей параметр.

Infill before perimeters – спочатку друкується наповнення, а потім друкуються шари периметра. RobotON рекомендує не використовувати цей параметр.

Skirt and Brim -спідниця (друк контуру навколо моделі. Дозволяє оцінити калібрування друкарської поверхні і прочищає сопло перед печаткою, щоб побачити чи поступово поступає пластик) і край (додаткова окантовка першого шару, для підвищення прилипання)

Loops – кількість проходів спідниці навколо моделі. RobotON рекомендує не більше 3. Якщо принтер добре відкалібрований, то взагалі не слід використовувати цей параметр і поставити 0, так як все теж ми отримаємо в брими, який обов'язковий в більшості випадків.

Distance from object – відстань від окантування до моделі. Відстань потрібно вибирати так, щоб друк не виходив за розміри столу. 6 мм буде достатньо.

Skirt height – висота шарів "спідниці". RobotON рекомендує не більше ніж 1.

Minimum extrusion length – мінімальна кількість пластику в мм, яка буде витрачена на друк спідниці.

Brim width – ширина краю моделі у мм навколо моделі. Цей параметр дуже важливий для друку. Однією із найчастіших проблем, що виникають у процесі 3D друку, є відсутність прилипання пластику до столу. Слабке прилипання теж чревато поганими наслідками, наприклад, зривом високої моделі зі столу в кінці друку. Використання матеріалів для прилипання часто теж не допомагають, особливо якщо у Вашого 3D принтера є металевий стіл. У таких випадках рятує цей параметр. Справа в тому, що чим більша площа зіткнення моделі зі столом, тим сильніша вона до нього прилипає. За допомогою бриму можна збільшити площу першого шару. При цьому ця добавка легко відірветься від моделі після остигання. Тому RobotON рекомендує використовувати цей параметр і ставити його не менше 6. Але звертаємо увагу, що треба стежити, щоб друк не виходив за межі друкованої області! Тому іноді можна поставити і менше ніж 6.

Support material – підтримки. Вони використовуються для створення конструкцій, що легко відриваються, для друку елементів 3D моделі, що висять у повітрі. Найчастіше, ця функція не потрібна і навіть без неї нормально друкуються елементи, що провисають. Поставивши галочку навпроти Generate support material, Ви вмикаєте цю функцію і отримуєте доступ до налаштувань підтримки. RobotON рекомендує встановити стандартні налаштування.

Overhang threshold – Кут нахилу бічних стінок, з якого починається формування підтримки.

Enforce support for the first – генерація підтримок до вказаного шару моделі незалежно від кута стінки. Потрібно для покращення прилипання моделей, які мають невелику площу першого шару.

Raft layers – друк плоту. У параметрах вказуємо кількість шарів друку. Пліт зазвичай служить для друку на перфорованих столах та нівелювання неточного калібрування робочої поверхні.

Options for support material and raft - налаштування підтримки та рафта.

Contact Z distance – відстань від підтримки до моделі по вертикалі. Коли 0 – підтримки стикаються з моделлю.

Pattern – візерунок заповнення підтримки.

Pattern spacing – відстань між лініями підтримки та рафту.

Pattern angle – кут друку підтримки та рафта.

Interface layers – кількість шарів між об'єктом та матеріалом підтримки.

Interface pattern spacing – відстань від внутрішніх підтримок до моделі. 0 – підтримка стосується моделі.

Don't support bridges - не друкувати підтримки під "мостами".

Speed – швидкість друку. У цьому розділі є параметри, що відповідають за швидкість пересування головки екструдера та інші переміщення. Все це впливає на якість друку. Якщо ставити велику швидкість пересування, це може призвести до втрати якості 3D друку. Тому давайте розберемося докладніше.

Perimeters – швидкість друку контурів шарів моделі. RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку в межах 45-60.

Small perimeters – швидкість друку невеликих периметрів (менше 6,5мм). RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку в межах 15-20.

External perimeters – швидкість друку зовнішнього контуру. RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку в межах 30-40.

Infill – швидкість друку заповнення. RobotON рекомендує встановити цей параметр для звичайного друку 40.

Solid infill – швидкість друку суцільного горизонтального наповнення. RobotON рекомендує встановити цей параметр для звичайного друку 35.

Top solid infill – швидкість друку верхньої поверхні моделі. RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку 25.

Support material – швидкість друку підтримки. RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку 100.

Support material interface – швидкість друку внутрішніх підтримок, які не стосуються поверхні столу. RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку 100.

Bridges – швидкість друку горизонтальних поверхонь між двома точками, без підтримуючих елементів знизу. RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку 60.

Gap fill – швидкість заповнення невеликих поверхонь. При швидких і звивистих траєкторіях руху екструдера можуть виникати коливання. RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку 15.

Speed for non-print moves Travel – швидкість переміщення екструдера без друку. RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку 200.

First layer speed – швидкість друку першого шару. RobotON рекомендує встановити цей параметр для звичайного друку 50.

Acceleration control (advanced) – не чіпаємо.

Perimeters – прискорення друку шарів за зовнішнім контуром моделі.

Infill – прискорення друку заповнення.

Bridge – прискорення друку мостів.

First layer – прискорення друку першого шару.

Default – основне прискорення.

Autospeed (advanced) – автоматичне управління швидкістю.

Max print speed – максимальна швидкість друку. RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку 250.

Max volumetric speed – максимальна швидкість подачі матеріалу екструдером. RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку 0.

Для високої якості друку рекомендує встановити параметри швидкості, такі, як на рис. 49.

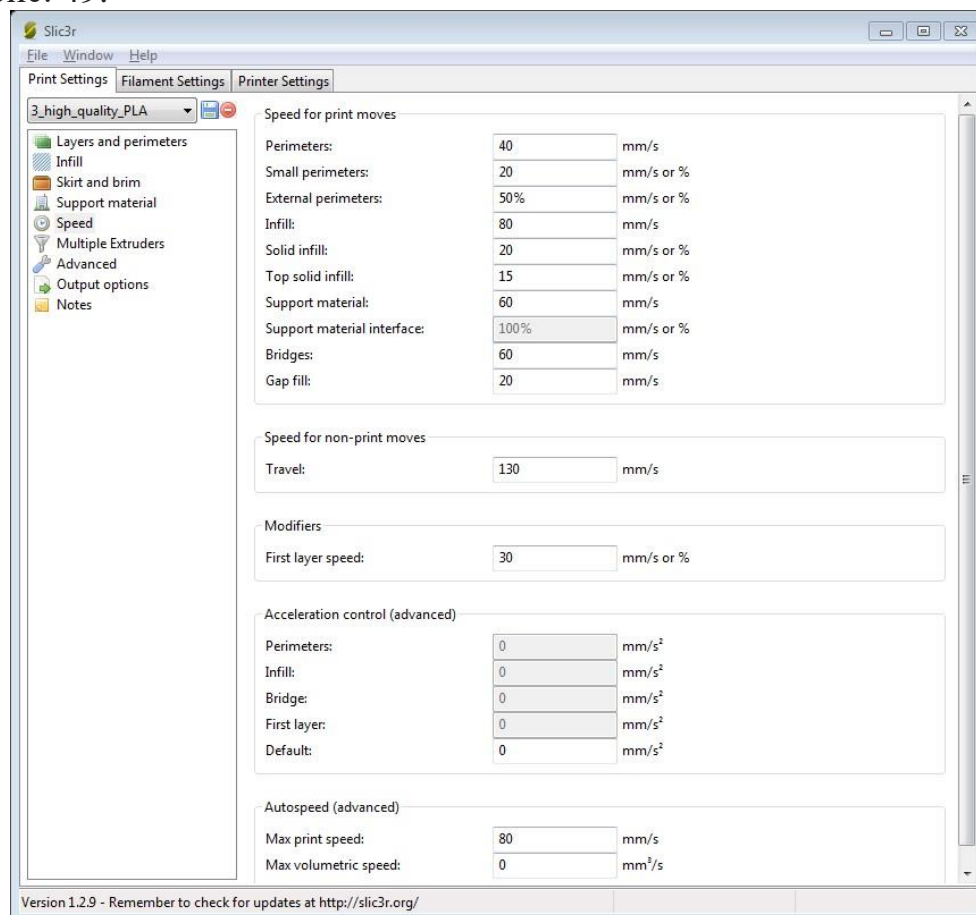


Рис.49 – Вікно програми

Multiple Extruders – графа налаштування екструдерів. Якщо у Вас принтер має кілька екструдерів, то цей розділ обов'язковий. В іншому випадку навіть не варто звертати на нього уваги.

Perimeter extruder – номер екструдера, який друкує зовнішні межі моделі.

Infill extruder – номер екструдера, який друкує заповнення.

Solid Infill extruder – номер екструдера, який друкує суцільні шари заповнення.

Support material/raft/skirt extruder – номер екструдера, який друкує підтримки, рафт, спідницю.

Support material/ raft interface extruder – номер екструдера, який друкує внутрішні підтримки, рафт.

Advanced - налаштування екструдера. У цьому розділі є корисні параметри, але їх мало. Тому давайте швидко пробіжимося ними і дізнаємося, що треба міняти, а що ні.

Default extrusion width – ширина друку в мм. Якщо встановлено "0", слайсер автоматично налаштує цей параметр залежно від принтера.

First layer – ширина першого шару. RobotON рекомендує ставити цей параметр для звичайного друку 200.

Perimeters – ширина друку зовнішніх шарів моделі.

Infill – ширина друку при заповненні моделі.

Solid Infill – ширина друку суцільних горизонтальних поверхонь.

Top solid infill – ширина друку верхніх горизонтальних поверхонь.

Support material – ширина друку підтримки.

Overlap - перекриття під час друку заповнення та зовнішніх стінок.

Infill/perimeters overlap - параметр вказує на скільки мм або % друк заповнення перекриває зовнішні стінки.

Bridge flow ratio – обдування під час друку мостів.

Інші - інші

XY Size Compensation – корекція розмірів моделі з урахуванням усадки.

Threads – кількість потоків для слайсингу. На потужних комп'ютерах можна запускати облік слайсингу в кілька потоків, що зменшить час слайсингу. Але збільшить навантаження на процесор і об'єм пам'яті комп'ютера.

Resolution – мінімальна роздільна здатність деталей моделі для слайсингу.

Інші розділи "Print Settings" не потрібні, тому ми переходимо до "Filament Settings".

"Filament Settings" - налаштування властивостей використовуваного матеріалу для друку. Найчастіше використовується пластик, тому ми розглянемо 2 види пластиків та налаштування до них. У цьому розділі є 2 графи: filament та cooling.

Color – колір пластику. Даний параметр потрібно ставити, якщо Ви використовуєте кілька екструдерів з різними дротиками пластику, щоб не помилитися.

Diameter – діаметр пластикового дроту. Дуже важливий параметр. Якщо Ви введете цифру, яка не відповідає поперечному розміру прутка, що використовується, то друк не вдасться.

Extrusion multiplier – кількість пластику, що подається. Ставимо 1.

Temperature Extruder (C) – Температура сопла. Теж у край важливий параметр. Цієї температури має бути достатньо, щоб перетворити тверду нитку пластику на рідкий стан, але в той же час не переплавити його. Для різних пластиків своя температура, тому ми і радили робити кілька файлів налаштування слайсера та зберігати їх для кожної графі Print Settings, Filament Settings, Printer Settings після внесення змін. Для пластику PLA температура має стояти в районі позначок 210-225. Для ABS пластику – 240-255.

Temperature Bed – температура столу. Ще один дуже важливий параметр, який відповідає за прилипання пластику до столу. Як і попередньому випадку, для кожного пластику своя температура. Для пластику PLA температура столу має бути в районі 60-80. Для ABS пластику ми рекомендуємо – 110–120.

Cooling – охолодження. Цей розділ дозволяє керувати вентилятором, який охолоджує шари пластику. Це потрібно для того, щоб ті склеювалися і для підвищення якості 3D об'єкта.

Keep fan always on – вентилятор увімкнений завжди.

Enable auto cooling – вентилятор вмикається автоматично.

Fan speed – швидкість обдування мінімальна 14 та максимальна 100.

Bridges fan speed – швидкість обдування під час друку мостів 100.

Disable fan for the first layers - відключення обдування для вказаної кількості перших шарів, ставимо 3.

Enable fan in layer print time is below – увімкнення обдування, якщо друк шару займає більше вказаної кількості секунд. Ставимо 60.

Slow down if layer print time is below – уповільнити друк, якщо час друку шару менший за вказану кількість секунд. Ставимо 5.

Min print speed – мінімальна швидкість друку. Ставимо 10.

Тепер переходимо до останнього розділу налаштувань самого принтера Printer Settings. У ньому є 3 графі, з яких нам знадобиться одна.

Extruder – налаштування екструдера. Це важлива графа, де є кілька обов'язкових полів, у яких не можна помилятися.

Nozzle diameter – діаметр сопла. Перший та найважливіший параметр. Він характеризує розмір отвору сопла, встановлений на Вашому екструдері. Якщо виставити не той, то друк не вдасться.

Position (for multi-extruder printers) - налаштування зміщення для багатоекструдерних принтерів

Extruder offset – зміщення екструдера по осях X та Y, не чіпаємо.

Retraction – налаштування ретракту. Важливий параметр, раніше пояснювалося навіщо потрібна ретракція.

Length – довжина нитки, що втягується. Ставимо 2.

Lift Z – піднімання сопла на певну кількість мм. при переміщенні екструдера без друку. Ставимо 0.3.

Speed – швидкість ретракту. Ставимо 350.

Extra length on restart – довжина пластику, що видавлюється, перед поновленням друку, після роботи ретракту. Ставимо 0.

Minimum travel after retraction – мінімальна відстань переміщення для включення ретракту.

Retraction layer change – увімкнути ретракт під час переходу з шару на шар. Вмикаємо.

Wipe before retract - очищення сопла після ретракту. Не вмикаємо.

Коли ви змінили зміни в цих конфігураціях, потрібно поставити галочку в полі "Перевантаження налаштувань Slic3r.

7.3 Типові помилки під час друку

Проблеми та дефекти виникають в результаті двох чинників, неправильне налаштування друку і невіправні дефекти самого принтера, найчастіше дефект екструдера. Все це впливає на якість друкувати моделі, її цілісності і механічні властивості.

Немає екструдювання при початку друку. Ця проблема досить часто виникає у користувачів нових 3D принтерів. Екструдер не починає з початком виконання завдання продавлювати пластик. Є три причини чому це відбувається:

а) Екструдер не був підготовлений (заповнений) перед початком друку. У більшості екструдерів є погана звичка протікати пластиком, коли вони не працюють, але при цьому перебувають у високій температурі. Гарячий пластик усередині сопла просочується через хот-енд, в результаті чого всередині сопла виникають порожнечі, звідки пластик витік. Протікання в стані спокою може виникнути перед початком друку, коли йде попередній прогрів екструдера, а також в кінці друку, коли екструдер починає поступово остигати. Якщо частина пластика з екструдера витекла, при наступному екструдюванні, швидше за все, знадобиться кілька секунд, перш ніж пластик знову почне виходити з сопла. Стандартний прийом усунення проблеми полягає в тому, щоб надрукувати так звану «спідницю» (skirt).

б) Сопло починає працювати дуже близько до платформи. Якщо сопло знаходиться дуже близько до платформи друку, простору для виходу з екструдера пластика може виявитися недостатньо. Отвір на кінці сопла по суті виявляється заблокованим, так що пластику нікуди дітися. На такого роду проблему вказує ситуація, коли пластик не екструдюється на перший, а то і на другий шар, а дець з третього або четвертого, у міру того як платформа опускається по вертикальній осі, все нормалізується. Проблема вирішується налаштуванням G-Code, який знаходиться під однойменною вкладкою програми 3D-друку.

в) Екструдер засмічений. Це може статися тоді, коли в сопло потрапляє всякого роду сміття, коли гарячий пластик занадто довго перебував всередині екструдера, або якщо екструдер недостатньо охолоджується і філамент починає розм'якшуватися не там, де слід. Прочистити сопло можна механічно.

Термопластик не прилипає до платформи 3D- принтера. Дуже важливо, щоб перший шар роздруківки надійно прикріпився до платформи принтера так, щоб всі інші шари використовували його як фундамент. Якщо перший шар до платформи не прилип, в подальшому виникнуть проблеми:

а) Платформа друку не правильно відрегульована. Багато принтерів дозволяють підлаштовувати положення платформи друку за допомогою декількох гвинтів або ручок. Якщо є проблеми з прилипанням першого шару, найперше, що треба зро-

бити, переконатися, що платформа друку рівна і не перекошена. Якщо спостерігається перекис, одна зі сторін платформи може виявитися занадто близько до сопла, тоді як інша буде занадто далеко.

б) Сопло починає працювати занадто далеко від платформи. Для того щоб друкований об'єкт краще тримався на платформі, необхідно філамент злегка в неї вмінався. Це можна налаштувати безпосередньо на принтері, але, як правило, набагато простіше і точніше виходить через програму G-Code.

в) Перший шар роздруковується занадто швидко. Якщо друкувати перший шар занадто швидко, пластик може не встигнути приклеїтися до платформи. З цієї причини, виявляється дуже корисним друкувати перший шар на більш низькій швидкості.

г) Налаштування температури або охолодження. Буває так що, спочатку шар наче й прилипає до платформи, але потім, остигаючи, починає відставати, причина саме в налаштуваннях температури і охолодження. Функція підігріву платформи, може допомогти боротися з цією проблемою.

Пластика видавлюється недостатньо. У програмі є настройка в якій вказується, скільки пластика 3D принтер повинен видавити. Однак, оскільки сам 3D-принтер не дає ніяких сигналів щодо того, скільки пластика він видавив насправді, може статися, що філаменту було видавлено менше, ніж це передбачує програма (це називається неоекструдунням). Якщо виникла така проблема, можуть з'явитися щілини між сусідніми шарами. Існує кілька причин цієї проблеми:

а) Невірний діаметр нитки філаменту. Найбільш поширені значення діаметра нитки філаменту - 1,75 мм і 2,85 мм. На багатьох котушках пластика вказується точний діаметр ниток. Потрібно переконатися чи правильно вказано діаметр в програмі друку.

б) Маленький коефіцієнт екструдуння. Якщо діаметр філаменту правильний, а пресування і раніше недостатнє, потрібно підлаштувати коефіцієнт екструдуння. Цей параметр (показник витрат), дозволяє легко змінювати кількість екструдіруемого пластика. Для PLA коефіцієнт екструдуння зазвичай виставляють 0.9, для ABS – ближче до 1.

Пластика екструдується занадто багато. Для вирішення цієї проблеми треба звернути увагу на декілька параметрів в установках програми друку. Вище написано про те, що робити при недостатній екструзії. Хоча це інструкції на випадок неоекструдуння, необхідно налаштувати ті ж самі параметри, тільки в інший бік.

Павутина, з'являються тоді, коли при друку 3D-моделі утворюються тонкі, небажані нитки пластика. Як правило, це пов'язано з тим, що такі нитки витягуються з сопла, коли екструдер переміщається на нову позицію. Наладка, яка бореться з описуваної проблемою, називається «Retraction» (втягування). Найважливіша настройка у втягування – це дистанція, вона визначає, скільки пластика втягується назад в сопло. Зазвичай, чим більше пластику втягується, тим менш імовірно, що сопло буде протікати під час переміщення. Наступний параметр втягування, який потрібно перевірити – швидкість, на якій філамент втягується в сопло. Якщо вона занадто мала, пластик буде повільно стікати вниз і може почати капати ще до того, як екструдер завершив переміщення на нову позицію. Якщо вона занадто висока, філамент може відірватися від гарячого пластику в соплі. Золота середина зазвичай знаходиться десь

між 1200 і 6000 мм / хв (20-100 мм / с), тоді втягування проходить найкращим чином. Якщо з настройками параметрів втягування все добре, другою причиною виникнення павутини є надлишкова температура екструдера. PLA особливо чутливий до температури. Якщо вона занадто висока, пластик всередині сопла стає надмірно рідким і йому набагато легше витікати через сопло. Якщо ж температура занадто низька, пластик буде занадто твердим і його буде важко продавити через хот-енд.

Розщеплення шарів Проблема друку, коли шари розділяються або розщеплюються. Щоб надрукований об'єкт був досить міцним і надійним, потрібно зробити так, щоб кожен шар був належним чином пов'язаний з попереднім. Для цього потрібно ретельно контролювати такі параметри:

- а) Висоту шару;
- б) Температуру друку.

У першому випадку, для уникнення розщеплення, висота шару повинна бути на 20% меншим, ніж діаметр сопла. Наприклад, якщо сопло 0,4 мм, висота шару повинна бути 0,32 мм – в іншому випадку шари пластика не будуть належним чином прилипати один до одного. Гарячий пластик завжди краще з'єднується, ніж холодний. Якщо зчеплення шарів недостатня, а висота шару задана правильно, можливо філаментам для з'єднання шарів потрібна більша температура. Наприклад, якщо друкувати пластиком ABS при 190 ° С, швидше за все шари друкованого об'єкта будуть занадто легко розщеплюються. Це відбувається тому, що для друку ABS потрібна температура 220 – 235 °С, тоді шари склеюються надійно.

Погане заповнення. Заповнення 3D-моделі грає дуже важливу роль в плані її міцності. Воно відповідає за те, щоб скріплювати зовнішню оболонку 3D-об'єкта і підтримувати ті його площини, які друкуються поверх нього. Цю проблему можна усунути без особливих зусиль, просто змінивши тип заповнення деталі в налаштуванні програми «слайсер» або збільште ширину екструдювання наповнювача, цей параметр так само є в програмі налаштувань друку. Кожен шар друкованого 3D-об'єкта створюється в результаті комбінації зовнішнього периметра і заповнення. Периметри шарів слідує контуру моделі, створюючи міцну поверхню. Заповнення, яке друкується всередині цих периметрів, становить іншу частину шару. Воно зазвичай виповнюється у вигляді шаблонів, які виходять в результаті зворотного-поступального руху голівки. Через цю особливість побудови можливі **щілини між контуром і заповненням деталі**. Існує дві причини виникнення цієї проблеми друку. Занадто велика швидкість. Заповнення моделі зазвичай друкується значно швидше, ніж контури. І може виявитися що, часу на те, щоб воно зчепилося з периметром недостатнім. Знизивши швидкість заповнення, можливо, вирішить цю проблему. Недостатнє перекриття контуру. У деяких програмах управління 3D-печаткою є параметр, який дозволяє регулювати міцність зчеплення зовнішнього контуру і наповнення. Наприклад, якщо вказано 20% перекриття контуру, це означає, що програма передасть на принтер інструкції, за якими заповнення буде на 20% перекривати внутрішню частину периметра. Якщо збільшити його до 30%, можливо проблема зникне.

Через якийсь час буває, що деякі частини роздруківки починають загинатися, проблема зазвичай в перегріві. Пластик екструдюється при дуже високій температурі і якщо він швидко не охолоджується, з часом він може змінити форму. Цю проблему

можна уникнути, якщо швидко холодітиме кожен шар у пластика не залишалося часу на деформацію до повного застигання.

Література

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – 2015. – 220 с.
2. Валетов В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). Учебное пособие. - Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. – 63 с.
3. Каменев, С.В. Технологии аддитивного производства / С.В. Каменев, К.С. Романенко ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2017. – 145 с.
4. Мастенко И. В., Стельмах Н. В. Поліпшення механічних властивостей друкованих деталей. – 2018.
5. Griffey, Jason. 3-D The types of 3-D printing / Library Technology Reports, 2017.
6. Новиков С. В., Рамазанов К. Н. Аддитивные технологии: состояние и перспективы : учебное пособие [Электронный ресурс] / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : УГАТУ, 2022. – URL: https://www.ugatu.ru/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-41.pdf
7. Жеманюк П. Д., Басов Ю. Ф., Овчинников А. В., Джуган А. А. Применение титановых порошков нового поколения (HDH2) в аддитивных технологиях. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. №8 (135). С. 139-144.
8. 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.
9. Вишнепольский С. В., Павленко Д. В., Двирнык Я. В. Прогнозируемые эффекты упрочнения алмазным выглаживанием деталей полученных с помощью селективного лазерного спекания. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. №4. С. 43-52.
10. 3D друк в умовах біомедичного використання [Електронний ресурс] : концепт 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.
11. Андрощук Г. О. Аддитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (I частина). *Наука, технології, інновації*. 2017. № 1. С. 68-77.
12. Андрощук Г. О. Аддитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (II частина) *Наука, технології, інновації*. 2017. № 2 (2). С. 29-36.
13. Андрощук Г. О., Копил Я. В. 3D-друк в епоху інноваційних технологій: проблеми регулювання. *Інтелектуальна власність в Україні*. 2016. № 5. С. 17-26.
14. 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.

15. 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>.

16. Олексієнко С. В., Прибисько 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.

17. Назаркевич Є. Адитивні технології та 3D моделювання в ювелірному мистецтві. *Народна творчість та етнологія*, 2021, №2(390). С. 113-122.

18. 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.