

**М. А. Шевцова, С. М. Пургіна**

**СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА АВІАЦІЙНОЇ  
ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ.  
АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО АРКТ**

2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

**М. А. Шевцова, С. М. Пургіна**

**СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА АВІАЦІЙНОЇ  
ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ.  
АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО АРКТ**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2021

УДК 629.7.002:004.356.004.94(075.8)  
Ш37

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. А. В. Кондратьєв,  
Ю. В. Гаврилко

**Шевцова, М. А.**

Ш37 Системи технічної підготовки виробництва авіаційної та ракетно-космічної техніки. Адитивне виробництво АРКТ [Електронний ресурс] : навч. посіб. / М. А. Шевцова, С. М. Пургіна. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 83 с.

Викладено оглядовий і технічний матеріал використання адитивних технологій у виробництві АРКТ. Докладно наведено різновиди 3D-друку, матеріали, що застосовуються, та особливості підготовки до друкування.

Для студентів вищих навчальних закладів, які вивчають курси «Технології виготовлення агрегатів літальних апаратів», «Оптимальне конструювання конструкцій», «Загальні принципи проектування у техніці». Може бути корисним для спеціалістів галузі при дипломному та курсовому проектуванні.

Іл. 41. Табл. 9. Бібліогр.: 13 назв

**УДК 629.7.002:004.356.004.94(075.8)**

© Шевцова М. А., Пургіна С. М., 2021  
© Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2021

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 5  |
| 1 ІСТОРІЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ПРИКЛАДІ ТЕХНОЛОГІЇ FDM...                         | 7  |
| 2 ОСНОВИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ЙОГО ВИДИ.....                                      | 10 |
| 2.1 Багатошарове наплавлення матеріалу (FDM).....                                      | 10 |
| 2.2 Стереолітографія (SLA).....  | 12 |
| 2.3 Лазерне спікання (SLS).....  | 15 |
| 2.4 Виробництво за допомогою електронно-променевої гармати (EBAM).                     | 18 |
| 2.5 Виробництво об'єктів за допомогою ламінату (LOM).....                              | 19 |
| 2.6 Багатоструминне просочення (MJF).....  | 20 |
| 2.7 Технологія струминної обробки матеріалів (MJ).....                                 | 21 |
| 3 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ 3D-ДРУКУ.....                                      | 24 |
| 4 ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ФІЛАМЕНТА.....  | 27 |
| 5 ЗАГАЛЬНА ТЕХНІКА ДРУКУВАННЯ.....   | 35 |
| 5.1 Тестування, орієнтація, поширення і G-code.....                                    | 36 |
| 5.2 Аналіз деталі або моделі.....  | 36 |
| 5.3 Опорні конструкції.....  | 37 |
| 5.4 Заповнення моделі.....   | 38 |
| 5.5 Позиціонування та орієнтація.....  | 39 |
| 5.6 Генерація G-code.....  | 40 |
| 5.7 3D-друк.....   | 42 |
| 5.8 Витягування деталі.....  | 43 |
| 5.9 Пост-обробка.....  | 43 |
| 5.10 Пост-затвердіння.....   | 44 |
| 6 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....  | 45 |
| 7 ОБМЕЖЕННЯ ДЛЯ ДРУКОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА СПОСОБИ<br>ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЇХ ДРУКУВАННЯ..... | 48 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 7.1 | Обмеження залежно від типу технології адитивного виробництва .....                      | 49 |
| 7.2 | Способи підвищення якості та властивостей конструкцій, виконаних методом 3D-друку ..... | 50 |
| 7.3 | Помилки 3D-друку .....  | 52 |
| 8   | ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА.....  | 56 |
| 8.1 | Застосування в аерокосмічній та оборонній промисловості .....                           | 56 |
| 8.2 | Автомобільна промисловість .....  | 62 |
| 8.3 | Додатки для електронної індустрії.....  | 65 |
| 8.4 | Інструментальна та прес-індустрія.....  | 65 |
| 8.5 | Чотиривимірний (4D) друк за допомогою полімерного композиційного філамента .....        | 67 |
| 9   | ТЕОРІЯ АРМУВАННЯ ПОЛІМЕРУ КОРОТКИМ ВОЛОКНОМ.....  | 69 |
| 10  | ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБУ.....   | 73 |
|     | БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....   | 82 |

## ВСТУП

Аддитивне виробництво (АВ) є швидкозростаючою галуззю завдяки своїм незаперечним перевагам. Це один з основних напрямків сучасної науки і техніки. 3D-друк є технікою виготовлення об'ємних виробів на основі цифрових моделей. Незалежно від конкретної технології суть процесу полягає в поступовому нашаруванні 3D-моделі до повного відтворення форми виробу. Технологія АВ формує об'єкти шар за шаром, з'єднуючи рідкі, порошкові або листові матеріали, на відміну від традиційних технологій виробництва (наприклад, механічна обробка), які є субтрактивними процесами. Метод АВ має безліч переваг, таких як відсутність необхідності підготовки форми або відсутність системи грубих/чистових операцій. Однак всі ці особливості можна звести до двох показників – швидкість і ціна, за яких АВ не має аналогів у своїй ніші.

Переваги АВ порівняно зі звичайними традиційними технологічними процесами:

- менше кроків між моделлю САПР і виробництвом виробу;
- невеликі вимоги до людських ресурсів у зв'язку з високим рівнем автоматизації;
- можливість зробити велику кількість геометричних форм виробу, наприклад виробництво деталей, оптимізованих за топологією, з внутрішніми каналами і т. п.;
- швидкісне виробництво дрібних і складних деталей;
- зазвичай менше матеріальних втрат;
- можливість ремонту пошкоджених ділянок існуючих об'єктів залежно від типу застосованого матеріалу друку;

– для виробництва не потрібні спеціальні інструменти.

Виробнича система 3D-принту може бути набагато швидшою за машину з ЧПК. До переваг АВ також належать: наявність відходів матеріалів на основі 3D-друку набагато менше, ніж на верстатах з ЧПК, допоміжний матеріал зазвичай становить менше 20 відсотків від загальної матеріальної маси виробу, а іноді може бути перероблений у майбутньому.

Порівняно з традиційними технологіями виробництва, які потребують високих початкових інвестицій (прес-форми, виробничі інструменти і т. п.), при АВ можна виготовляти першу серію і деталі/продукти без будь-яких додаткових інвестицій, крім самої технології АВ, тому початкові витрати можуть бути значно нижчими. АВ є економічно ефективніше, коли продукт має бути високо персоналізованим і/або має невеликий обсяг виробництва. З іншого боку, собівартість сировини, необхідної для АВ, може бути значно вищою, ніж сировина, що використовується в традиційному виробничому процесі, тому для великих обсягів виготовлення АВ буде менш конкурентоспроможним.

Іншими словами, технології АВ є більш економічно ефективними, оскільки обсяг одиниць виробу не дозволяє знецінити необхідні інвестиції в традиційні технології. Традиційні технології зазвичай пропонують більш низькі витрати на одиницю виробу.

Іноді характеристики розробленої деталі унеможливають його виготовлення з використанням традиційних технологій. При цьому дилема буде між запуском продукту, розробленого за відповідною вартістю агрегату або проходженням процесу редизайну для створення продукту, може бути виготовлений з використанням традиційної технології з передбачуваним зниженням ціни. Виходячи з цього при будь-якому процесі розроблення слід враховувати, що виробництво продукту, виготовленого за підтримкою АВ, має проходити структурований і сумлінний аналіз з урахуванням всіх аспектів техніко-економічного обґрунтування.

## 1 ІСТОРІЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА НА ПРИКЛАДІ ТЕХНОЛОГІЇ FDM

Історія АВ починається з технології 3D-друку, в якій багато вчених почали експериментувати з кінця 1980-х років. Відомим і значним досягненням у цьому став винахід методу селективного лазерного спікання (SLS) Карлом Декардом у 1986 році: лазерний промінь спікає порошок (пластик, метал і т. п.), маса порошку нагрівається в робочій камері до температури, близької до точки плавлення матеріалу, а основа для роботи принтера заздалегідь моделюється на комп'ютерній цифровій моделі (3D-моделі). Після того, як лазер проходить горизонтальний шар, камера спускається на висоту шару (зазвичай 0,1...0,2 мм), а маса порошку вирівнюється спеціальним пристроєм і потім наноситься новий шар.

Однак найбільш відомим і поширеним методом 3D-друку на сьогоднішній день є шаруватий напрямок (FDM). Ідея технології належить Скотту Крумпу, патент бере свій початок з 1988 року: від нагрітої насадки друкувальної головки за допомогою крокового двигуна подається матеріал (зазвичай пластиковий), друкувальні головки рухаються на лінійних напрямних у одному або двох напрямках. Основою, що визначає рух елементів принтера, також є 3D-модель.

Усі описані вище пристрої належали до класу промислових пристроїв і були досить дорогими, тому один з перших принтерів 3d Dimension від Stratasys 1991 року коштував від 50 до 220 000 доларів США (залежної від моделі і обробки). Принтери, що працюють за описаними вище технологіями, були ще дорожчими і до недавнього часу ці пристрої були відомі тільки вузькому колу зацікавлених фахівців.

Усе почало змінюватися в 2006 році, коли був заснований проект Replicating Rapid Prototyper з метою створення самостійно копіювального пристрою, яким став 3D-принтер на потужності FDM (багатошарове нанесення). Тільки на відміну від дорогих промислових пристроїв це було схоже на непривабливий винахід перероблення підручних засобів. І навіть якщо ці пристрої виглядали непривабливо, і значно поступалися за якістю промисловим аналогам, все це зробило неймовірний поштовх до розвитку технології 3D-друку.

Під час розроблення проекту RepRap почали з'являтися 3D-принтери, які спиралися на базу тогочасних технічних рішень з концепцією відкритого вихідного коду OpenSource. Компанії, які виробляли 3D-принтери, намагалися зробити їх кращими як з огляду продуктивності, так і дизайну та користувацького досвіду. Перші принтери RepRap не можна назвати



комерційним продуктом, оскільки ним не так просто керувати, а домогтися стабільних результатів не завжди вдавалося.

Тому MakerBot, створений як стартап, взяв за основу ідею RepRap і перетворив її на продукт нової якості. Їх флагманським продуктом став 3D-принтер MakerBot Replicator 2. Виробництво цієї моделі розпочалося у 2012 році і пізніше було припинено, але до цього дня залишається однією з найпопулярніших моделей 3D-принтерів «особистого» сегмента (за даними 3dhubs). Слово "особистий" знаходиться в дужках, оскільки цей принтер вартістю \$ 2200 на момент випуску в основному використовувався (і використовується) для професійних цілей, але потрапляє в особистий сегмент через його вартість. Ця модель відрізняється від своїх прапринтерів (RepRap), будучи, по суті, повним комерційним продуктом, але згодом виробники відмовилися від концепції OpenSource, закривши всі джерела і коди програмного забезпечення (рисунок 1).



Рисунок 1 – Етапи розвитку 3D-друку на прикладі FDM-технології

У 2014 році інша компанія Mark One представила принтер MarkForged, який застосовує для друку поліамід, армований вуглецевим волокном, що дозволяє підвищити в 10 разів міцність друкованого матеріалу. Наступним раундом розвитку 3D-друку стало використання високотемпературних полімерів: полієфірефіркетону, полієфіріміду, що ще більше розширило використання адитивних технологій.

### **Контрольні запитання**

1. Які переваги АВ?
2. Коли виготовлення виробу за допомогою АВ стає економічно ефективним перед традиційними технологіями?
3. Яка подія сталася у 2009 року, що дала поштовх розвитку створення 3D-принтерів?

## 2 ОСНОВИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ЙОГО ВИДИ

Застосування тієї чи іншої технології АВ об'єкта залежить від матеріалу переробки (таблиця 1).

Таблиця 1 – Технології АВ залежно від використовуваного матеріалу, переваги та недоліки

| Технологія | Процес  | Матеріал, що застосовується  | Точність | Недолік   | Швидкість процесу |
|------------|---|------------------------------|----------|---|-------------------|
| FDM        | Шари розплавленого пластику                           | Полімер                      | Середня  | Низька роздільна здатність                      | Середня           |
| SLS        | Спікання порошку лазером                              | Метал, полімер, кераміка     | Добра    | Необхідна подальша обробка                      | Висока            |
| SLA        | Полімеризація під дією ультрафіолету                  | Рідкий фотополімер           | Висока   | Тільки для фотополімерів                        | Висока            |
| SLM        | Металевий порошок розплавляється лазером              | Метал: мідь, алюміній, титан | Середня  | Висока ціна процесу, необхідна подальша обробка | Середня           |
| EBM        | Металевий порошок розплавляється електронною гарматою | Метал: кобальт, хром, нікель | Погана   | Обмеження щодо вибору металу                    | Висока            |
| POLYJET    | Впорскування рідкого фотополімеру                     | Метал, пластик, віск         | Висока   | Тільки для фотополімерів, не довговічний        | Висока            |
| MJ         | Впорскування воскового матеріалу, фотополімеру        | Віск, рідкий фотополімер     | Добра    | Обмеження щодо вибору матеріалу                 | Низька            |

### 2.1 Багатошарове наплавлення матеріалу (FDM)

**Технологія FDM** є найдешевшою і найпростішою у використанні, а принтери – найдешевшими і можуть бути самостійно зібрані за допомогою надзвичайно дрібних деталей (рисунок 2).

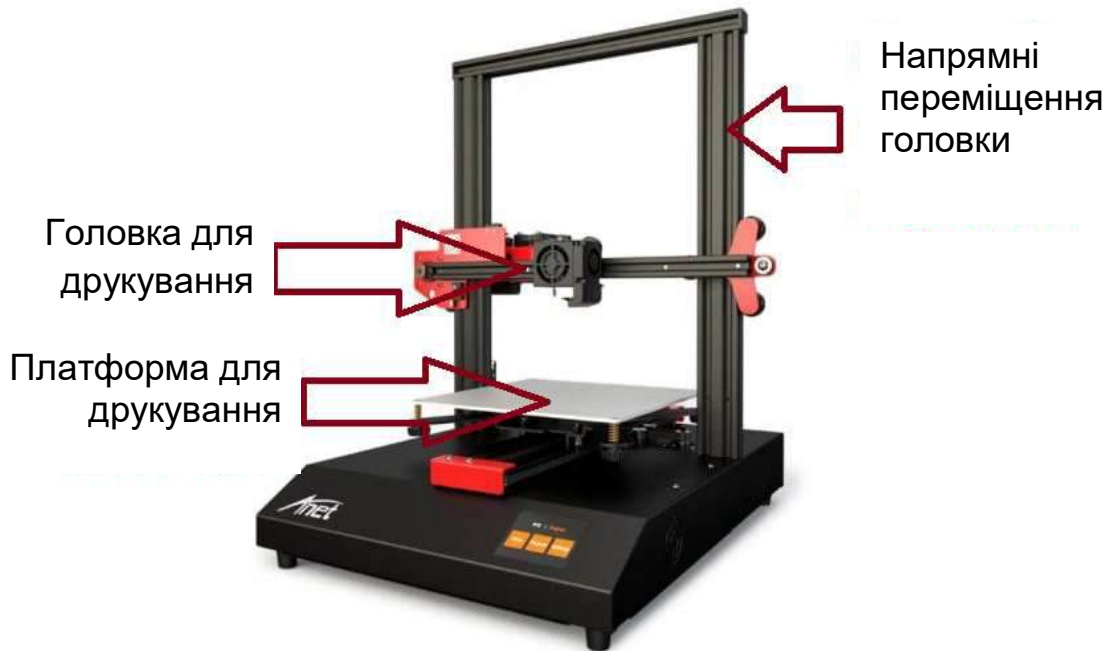


Рисунок 2 – Основні елементи принтера для FDM-технології

Ця технологія основана на плавленні матеріалу з котушки і його багат шаровому розміщенні методом наплавлення за формою 3D-моделі.

Коли справа доходить до вибору технології 3D-друку, то спочатку оцінюється її вартість. Друкарські машини FDM-технології вважаються одними з найдешевших і доступних, особливо для тих, хто використовує їх у домашніх умовах. Багато брендів сьогодні доступні в готовому вигляді, а також у комплектах Do-it-yourself, за допомогою яких можна зібрати 3D-принтер з базових і друкованих деталей. Також FDM вважається дуже чистою технологією, зазвичай вона проста у використанні і придатна для роботи у офісу. Що стосується точності, то 3D-відбитки не досягають такого ж рівня точності і якості, як вироблені за допомогою стереолітеографії (SLA). Однак результат вважається досить якісним залежно від галузі, де використовується ця технологія.

Роздільна здатність забезпечується в основному розміром використовуваної насадки – сопла. Точність машини залежить від руху екструдера по осях X і Y. Але існують й інші вагомні фактори, наприклад, міцність зчеплення між шарами нижче, ніж у процесі стереолітеографії. Крім того, вага шарів може стискати нижні шари, що може вплинути і навіть поставити під загрозу якість 3D-друку (рисунок 3).

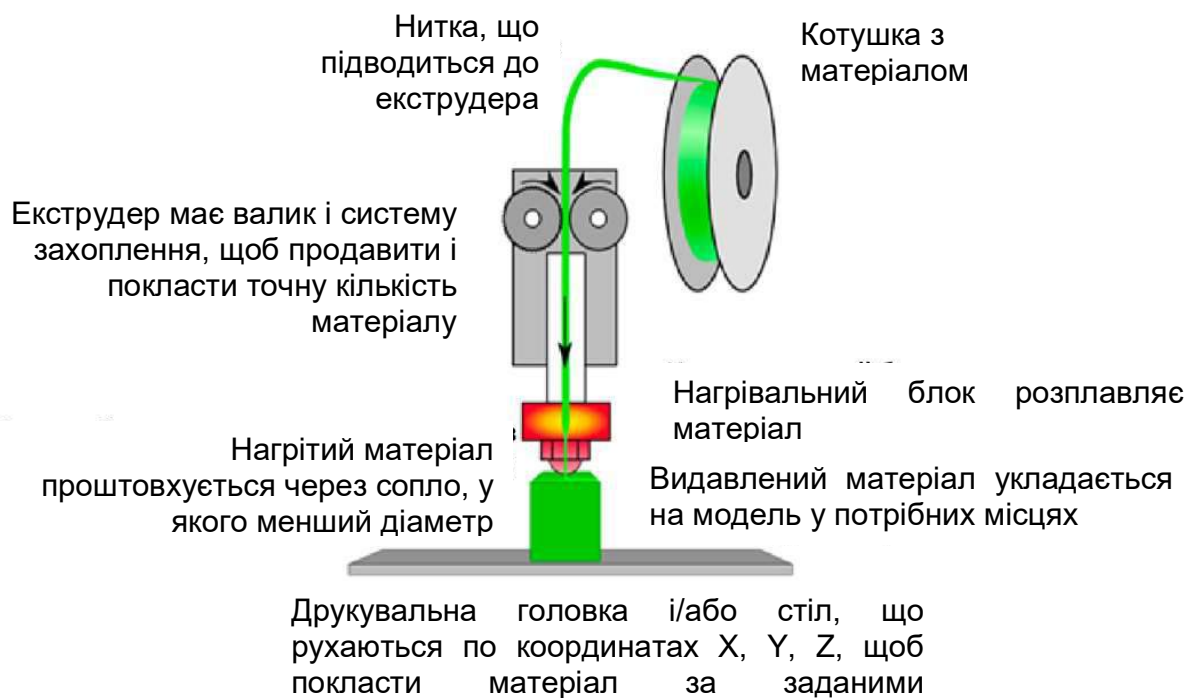


Рисунок 3 – Основи технології друку FDM

Ще одним недоліком FDM є те, що він зазвичай є повільнішим порівняно з двома іншими методами (стереолітографія і селективне лазерне спікання, які будуть проаналізовані далі). Більш того оброблення поверхні вважається задовільним, але не на тому ж рівні, що й при двох інших методах. Насправді при друку виробу за допомогою FDM потрібно враховувати, що друк потребуватиме у подальшому обробки поверхні. При цьому ця технологія є найпоширенішою у зв'язку з вищевказаним і може забезпечувати характеристики виробу, зазначені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Параметри виробу, що забезпечує FDM-друк

| Мінімальна товщина шару | Максимальні розміри робочої зони | Стандартна точність розмірів |
|-------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 0,178 мм                | 914x610x914 мм                   | ± 0,15 мм                    |

## 2.2 Стереолітографія (SLA)

Стереолітографія (SLA) є найкращою технологією 3D-друку з огляду співвідношення ціна/точність друку. При цьому принтери досить дорогі, оскільки технологія їх виготовлення складна для самостійного відтворення, як це можливо при FDM (рисунок 4).

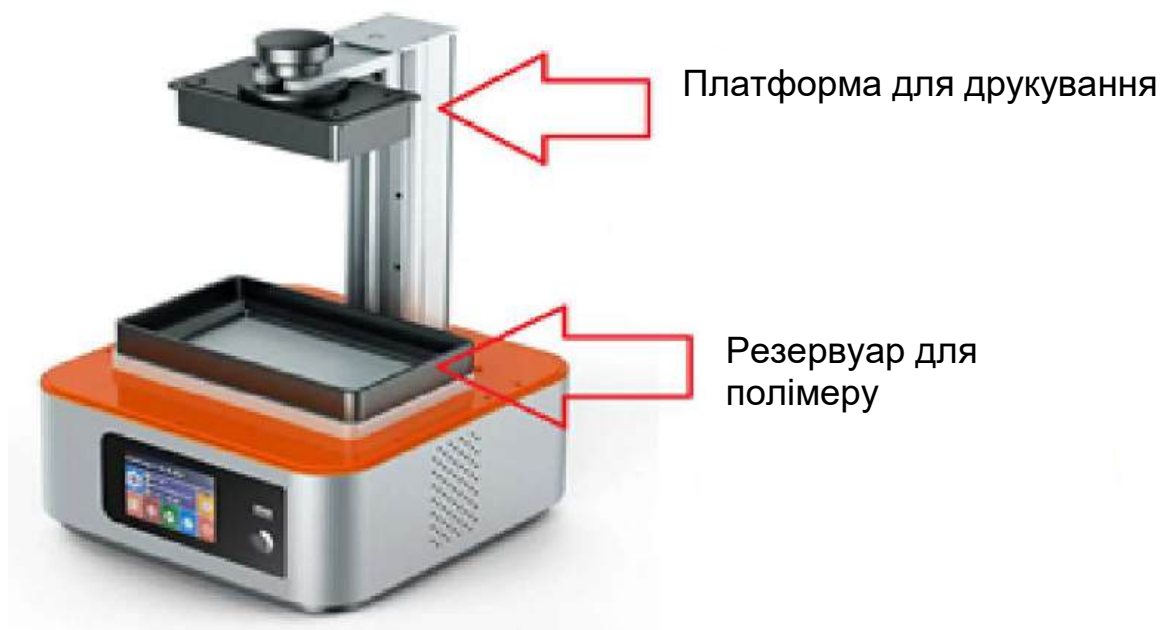


Рисунок 4 – Основні елементи SLA принтера

Технологія основана на використанні полімерів, здатних до фотополімеризації. Полімеризація відбувається, коли лазер зосереджується в точці або відразу засвічує шар. Але при подальшому друку його якість падає за рахунок засвічення шару (рисунок 5).



Рисунок 5 – Механізм друкування методом SLA

Це найстаріша технологія в історії 3D-друку, що продовжує розвиватися і нині. Процес передбачає використання друкарського верстата під назвою «стереолітографічний апарат», який перетворює рідкий пластик на тверді

тривимірні об'єкти. При цьому процес відбувається у великому резервуарі і починається тоді, коли шар рідкого полімеру поширюється на платформу. Комп'ютерно-керований лазер рисує перший шар на поверхні рідини і полімер твердне. Після кожного шару резервуар зі смолою зміщується, щоб звільнити заполімеризований матеріал. Оскільки модель опускається на 25...200 мкм залежно від вибраної висоти шару, щоб підготуватися до процесу подальшого затвердіння матеріалу, наступний шар рисується безпосередньо зверху попереднього. Покроковий процес повторюється до завершення побудови моделі. Коли модель буде завершена, вона піднімається з резервуара і надлишок рідини витікає. Опори знімаються вручну після того, як модель буде видалена з машинної платформи. Побудована модель перевертається на 180 °, це називається зворотною стереолітографією. Коли мова йде про матеріали, стереолітографія пропонує безліч варіантів, включаючи використання фарбування смоли. Полімер можна змішувати з пігментами перед друком, що надає об'єкту привабливий вигляд. Поверхня виробу при SLA виходить гладка, а «покрокову» поверхню від 3D-друку можна зменшити шліфуванням наждачним папером. Моделі завжди будуть більш гладкими, ніж моделі на основі порошку.

Стереолітографія може бути використана в багатьох областях. Нині найбільш популярними є автомобільні, аерокосмічні, медичні та споживчі товари.

### ***Сильні та слабкі сторони***

Серед усіх технологій 3D-друку стереолітографія є однією з найкращих; її потужність в основному залежить від 3D-відбитків з високою роздільною здатністю. Це дозволяє друкувати об'єкти з дуже складною геометрією, зберігаючи при цьому якість деталі. Точність виробу зазвичай оцінюється як дуже добра. SLA використовується там, де форма, посадка та збирання мають вирішальне значення, особливо, якщо можна виготовити деталі за допомогою смоли, зокрема фотополімерних матеріалів, які забезпечують відмінну якість поверхні. Однак високі витрати є головним недоліком при виборі стереолітографії. Хоча 3D-друкарські верстати можуть бути більш-менш доступними, однак фотополімерні матеріали можуть бути дуже дорогими, що робить звичайне використання цієї технології доступним не для всіх.

Недоліком технології, коли мова йде про стереолітографію, є також той факт, що рідкі смоли зазвичай є подразним і токсичним компонентом, тому потрібно вживати запобіжні заходи для роботи з ними за допомогою відповідних інструментів і обладнання. Не слід забувати, що при стереолітографії, на відміну від свого аналога селективної технології лазерного спікання, потрібні опорні конструкції, що підвищує ціну виробу,

оскільки потрібно більше матеріалу для його друку. Характеристики виробу, що може забезпечувати SLA-технологія, зазначено у таблиці 3.

Таблиця 3 – Параметри виробу, що забезпечує SLA-друк

| Мінімальна товщина шару | Максимальні розміри робочої зони | Стандартна точність розмірів |
|-------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 0,025 мм                | 1500x750x500 мм                  | ± 0,15 мм                    |

### 2.3 Лазерне спікання (SLS)

Метод лазерного спікання є поєднанням двох попередніх технологій FDM і SLA. Є одним з небагатьох найбільш точних способів друкування металу. Однак він також має багато недоліків: велика кількість пилу, слабкі механічні характеристики друкованих деталей і головне – вартість принтерів від \$80 000. Лазер спікає порошок у точці або шар залежно від типу лінзи і потужності лазера, новий шар подається роликком з сусідньої ємності, а готовий шар опускається вниз (рисунок 6).

Використання титану стане одним з прикладів майбутніх можливостей його застосування у військових, аерокосмічних, медичних та інших галузях, які прагнуть використовувати легку вагу, довговічність і стійкість до корозії. Значна частина інновацій в 3D-друку використовує пластик, і перехід від пластику до металів всіх типів є наступним кроком.

Використання технології SLS дозволяє використовувати різні матеріали: нейлон, скло і кераміку, алюміній, срібло і навіть сталь. Однак деякі з них, такі як кераміка, не випікаються лазером. У цьому випадку для склеювання порошкових шарів деталі використовують додатковий порошок, який має низьку температуру плавлення і таким чином склеює частинки основного порошку матеріалу.

Застосування технології SLS варіюються від автомобільного сектору до сектору споживчих товарів. Вона може бути використана для розроблення продукції і швидкого моделювання для різноманітних галузей промисловості. Наприклад, в аерокосмічній галузі SLS бере участь у розробленні прототипів авіаційних компонентів. Це велика перевага для компаній, оскільки літаки виробляються в невеликих кількостях і використовують їх протягом досить тривалого часу. Тому виробничим компаніям не вигідно створювати фізичні форми деталей літаків. Насправді, ці форми будуть занадто дорогими для виготовлення, а потім мають зберігатися протягом тривалого періоду часу без пошкоджень або корозії. Тому SLS ідеально підходить для виробництва невеликих партій деталей.



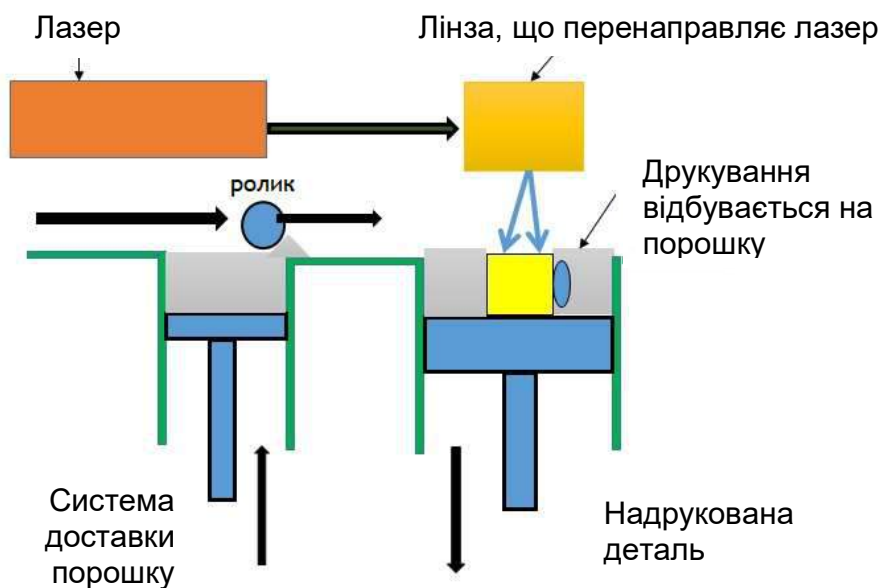


Рисунок 6 – Схема роботи SLS-друку

### ***Сильні та слабкі сторони SLS-технології***

Однією з перших переваг селективного лазерного спекання (рисунок 7) є те, що не потрібно використовувати допоміжні структури для створення підтримки для друкування моделі, оскільки матеріал, що застосовується, повністю самодостатній. Друга перевага полягає в тому, що SLS може вирішувати проблему, пов'язану з геометрією високої складності. Деякі вироби настільки складні, що без цієї технології їх було б не просто виготовити.

Зазвичай SLS вважається технологією 3D-друку з найшвидшим процесом виготовлення для створення функціональних, міцних прототипів і деталей для користувачів.

Крім того, довговічність підтримується використанням міцних матеріалів, таких, як нейлон, що також надає певної еластичності надрукованому виробу. Завдяки своїм хорошим механічним властивостям матеріал, який використовується в SLS, часто є заміником типового процесу лиття пластику. У той же час SLS виробляє деталі, які зазвичай оцінюються як дуже міцні й жорсткі, з хорошою хімічною довговічністю. Складні деталі з внутрішніми компонентами, каналами можна будувати, не захопивши матеріал всередині і не змінивши поверхню після зняття опори.



Рисунок 7 – SLS-принтер sPro 60

Точність є ще однією важливою перевагою технології SLS. Процес є таким же швидким, як і за вже проаналізованими технологіями. При цьому масштабованість дозволяє використовувати SLS для друкування як одного виробу, так і для багатьох десятків. Деталі можуть бути виконані від одного до чотирьох днів, що є великою перевагою для компаній, які повинні швидко вийти на ринок.

Однак зазвичай надруковані SLS вироби мають певну поверхневу пористість, тому, як і в FDM, їм потрібна додаткова обробка. Характеристики виробу, що може забезпечувати SLS-технологія, наведено у таблиці 4.

Таблиця 4 – Параметри виробу, що забезпечує SLS-технологія

| Мінімальна товщина шару | Максимальні розміри робочої зони | Стандартна точність розмірів |
|-------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 0,025 мм                | 900x1500x900 мм                  | ± 0,25 мм                    |

## 2.4 Виробництво за допомогою електронно-променевої гармати (EBAM)

Ця технологія схожа на SLS-технологію, але має невеликі відмінності. У цьому випадку електронно-променева гармата використовується для створення калюжі розплавленого металу, а додатковий металевий матеріал подається у цей басейн. Підкладка переміщує продукт так, щоб машина подавала матеріал саме туди, де він необхідний, а осад відразу ж затвердівав далеко від джерела тепла електронного пучка. Ця послідовність повторюється шар за шаром, доки не буде створено потрібний тривимірний об'єкт (рисунок 8). Процес відбувається у вакуумному середовищі без необхідності використання інертних газів. Доступні для технології матеріали включають нержавіючу сталь, мідні сплави нікелю, титан, тантал і нікель на основі сплаву. «Нестандартні сплави» можуть бути створені шляхом комбінування двох різних матеріалів з подвійною подачею дроту. АБ за допомогою електронно-променевої гармати відбувається швидше, ніж інші процеси обробки порошкового металу і тому може бути використане для створення швидких прототипів. Так як матеріал подається тільки там, де він потрібен, цей процес також підходить для ремонту або підвищення точності металевого виробу після його 3D-друку.

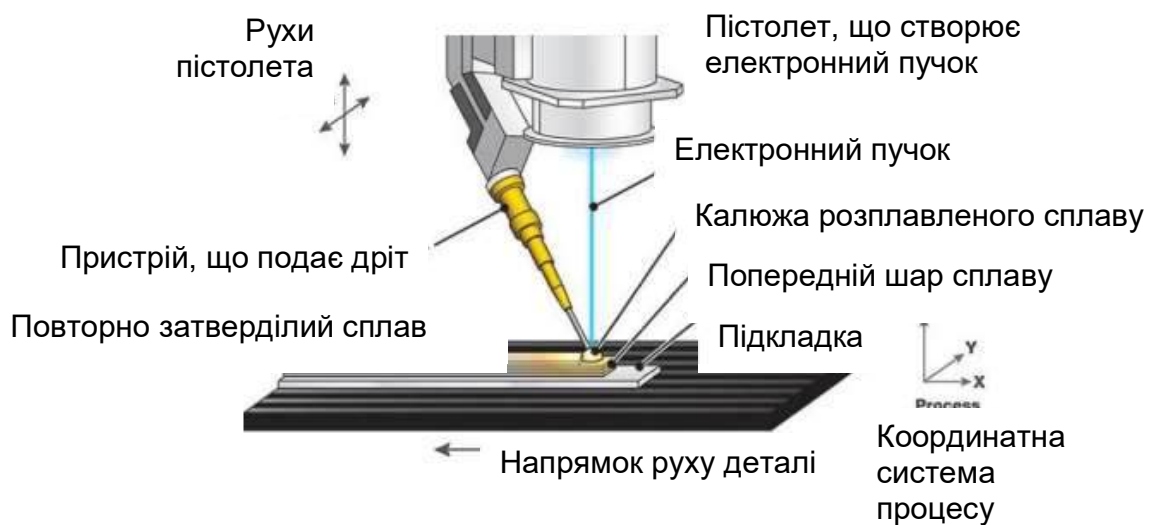


Рисунок 8 – Схема створення виробу за допомогою електронно-променевої гармати

### ***Сильні та слабкі сторони технології EBAM***

Перевагою є те, що технологія EBAM є однією з кращих відповідних технологій ремонту і виготовлення великих деталей.

Недоліки: погана якість поверхні та великі допуски через товщину шару. Характеристики виробу, що може забезпечувати ЕВАМ-технологія, наведено у таблиці 5.

Таблиця 5 – Параметри виробу, що забезпечує ЕВАМ-технологія

| Мінімальна товщина шару | Максимальні розміри робочої зони | Стандартна точність розмірів |
|-------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 0,1 мм                  | 5790x1220x1220 мм                | ± 0,05 мм                    |

## 2.5 Виробництво об'єктів за допомогою ламінату (LOM)

LOM був розроблений Helisys inc., США в 1991 році, в якому 3D-деталі виробляються шляхом різання плоских секційних листів за допомогою лазера або різачка і послідовного їх ламінування – склеювання (рисунок 9). Папір, метали, пластмаси, тканини, синтетичні матеріали і композити є матеріалами, які можуть бути використані в LOM. Вакуумне термоформування було застосовано для склеювання препрегів. Відхилення за висотою було близько 7,9 %, а точність інших напрямків – нижче 1 %. Процес LOM може бути застосований для друкування тривимірних, односпрямованих і безперервних скляних волокон з об'ємним вмістом 52...55 % на епоксидній матриці. Міцність виготовлених цим методом композитів становить приблизно 24,8 МПа, що є прийнятним для звичайного застосування.

Основною проблемою для процесу LOM є нездатність теплового ролика до повного ущільнення і затвердіння деталі зі зменшенням кількості порожот до рівня нижче 5 % після циклу затвердіння. Нещодавно з'явився новий метод під назвою Laser Assisted AM, розроблений дослідниками Канзаського університету для безперервних армованих термопластичних композитів і для скорочення відходів, характерних для LOM. Автори запропонували використовувати препреги-стрічки замість препрегів-листів на основі тканини. Стрічки односпрямованого армувального матеріалу розміщуються шар за шаром за допомогою валика ущільнення перед лазерним різанням кожного шару. Деталі, отримані за цією технологією, виявляють хороші механічні властивості завдяки армуванню безперервним волокном, високому ваговому співвідношенню волокон і зв'язуючого, мінімальному вмісту порожот і хорошому міжфазному з'єднанню.

## 2.6 Багатоструминне просочення (MJF)

При цьому процесі спочатку наноситься шар порошкового матеріалу на платформу, потім – об'єднуючий та деталізуючий агенти, і весь шар підсвічується лампами інфрачервоного випромінювання. Деталізуючий агент захищає зерна від процесу спікання, а об'єднуючий розплавляється та з'єднує частинки порошку між собою. Багатоструминне просочення відбувається швидше, ніж селективне лазерне спікання, оскільки весь шар сплавляється відразу, а не окремі його частинки.

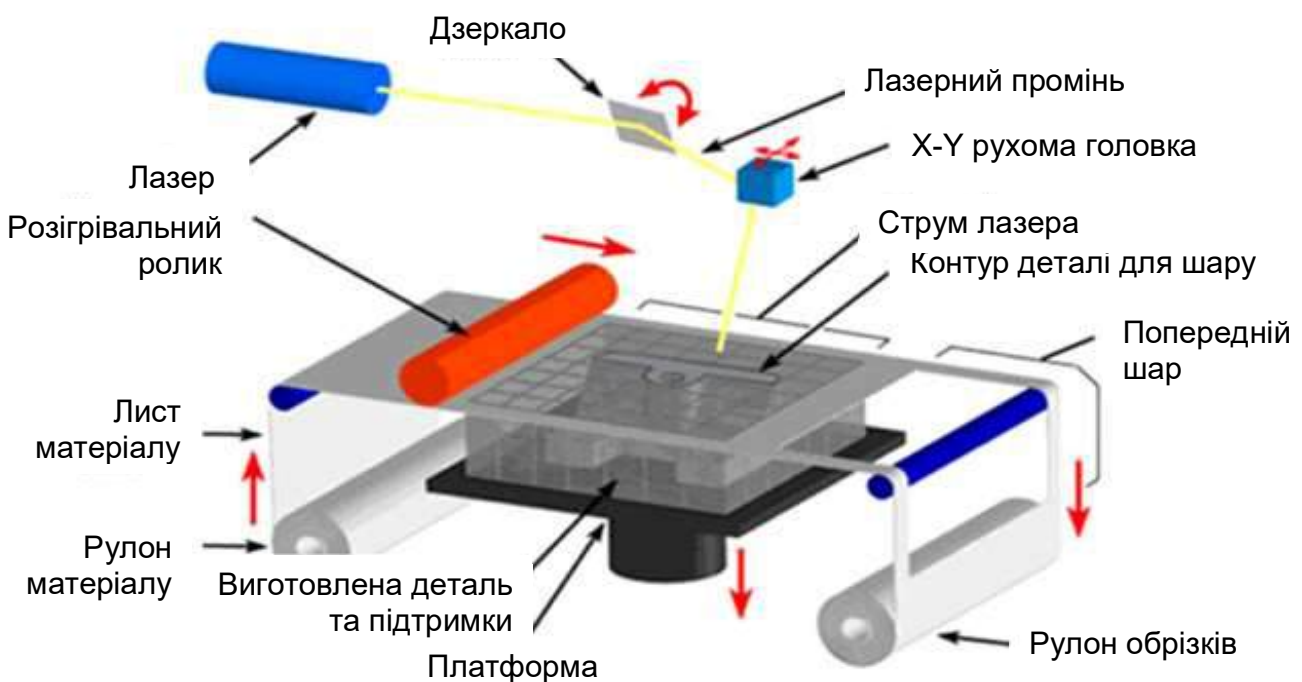


Рисунок 9 – Схема створення виробу за допомогою LOM-технології

Після того як перший шар сформовано (рисунок 10), новий шар будується за тим же процесом. Коли продукт завершено, все переходить в охолоджувальну станцію. Вакуумні трубки видаляють більшу частину невикористаного порошку і оператор закінчує роботу. Нерозпилений порошок можна використовувати повторно.

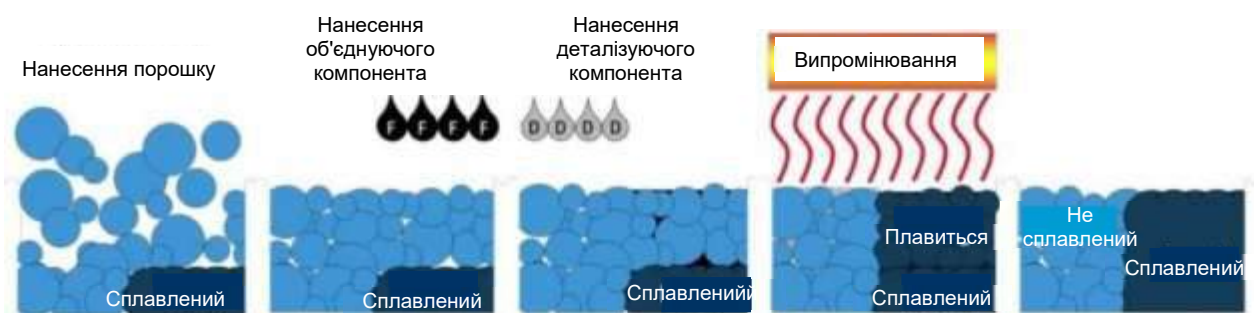


Рисунок 10 – Схема створення виробу за допомогою багатоструминного просочення

### **Матеріали та основне застосування**

Ця техніка дуже нова і друкує тільки чорним кольором з використанням нейлону, проте нові матеріали і кольори знаходяться в розробленні. Технологія забезпечує хорошу міцність і поверхню одержуваної продукції. Multi-jet Fusion має багато застосувань, таких, як швидке створення прототипів і виробництво деяких функціональних компонентів, що приводить до зниження вартості та їх ваги в багатьох галузях промисловості. Додатково такий друк можна використовувати в короткостроковому виробництві, він має потенційне застосування для вбудованої електроніки.

### **Сильні та слабкі сторони MJF**

Перевагою технології є те, що вона підходить для функціональних і довговічних пластикових деталей.

Недолік: нині це нова технологія, тому технічних даних недостатньо. Деякі характеристики, такі, як розміри конструкції, поступаються процесам лазерного спікання шару (SLS) (таблиця 6).

Таблиця 6 – Параметри виробу, що забезпечує MJF-технологія

| Мінімальна товщина шару | Максимальні розміри робочої зони | Стандартна точність розмірів |
|-------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 0,07 мм                 | 380x284x350 мм                   | ± 0,2 мм                     |

## **2.7 Технологія струминної обробки матеріалів (MJ)**

За технологією струминної обробки матеріалу розпорошуються тонкі шари рідкого фотополімеру через сопло, яке рухається горизонтально над будівельною платформою, на якій формується об'єкт. Краплі матеріалу

осідають за шаблоном тривимірного дизайну, ультрафіолетова лампа проходить над об'єктом, полімер миттєво твердне. Після того, як перший шар сформовано, платформа опускається, і наступні шари будуються на вершині попереднього шару 3D-об'єкта. Для деяких складних геометрій потрібні підтримки для виступів, для яких машина випускає інший гелеподібний матеріал. Як тільки всі шари сформовані, матеріал підтримки видаляють водою або у ванні з розчином для отримання готового виробу.

Можуть бути використані різні світлочутливі смоли з різною текстурою, міцністю, кольором і властивостями. Створені об'єкти можуть бути прозорими і жорсткими або з гумоподібною гнучкістю. Деякі машини можуть друкувати кількома матеріалами одночасно, використовуючи декілька струменів, і створювати комбінації різних властивостей і характеристик, в тому числі кілька кольорів.

Цей метод забезпечує надзвичайно високу роздільну здатність шару, тому можуть бути виготовлені реалістичні прототипи з дрібними деталями і гладкою поверхнею. Крім того, моделі для лиття з високою точністю можуть бути виготовлені для таких галузей, як медичне, стоматологічне і ювелірне виробництво.

### ***Сильні та слабкі сторони MJ***

Переваги: технологія підходить для детальних і реалістичних моделей зі смоли, з різними властивостями; можливість використати кілька кольорів в одному об'єкті; дуже просте використання принтерів завдяки застосуванню картриджів для сировини подачі матеріалу; легке видалення матеріалу, що не стверділо.

Недоліком є те, що сировина, яка застосовується для 3D-друку, чутлива до ультрафіолету, тому за наявності світла властивості продукту можуть з плином часу змінюватися.

Характеристики виробу, що може забезпечувати MJ-технологія, зазначено у таблиці 7.

Таблиця 7 – Параметри виробу, що забезпечує MJ-технологія

| Мінімальна товщина шару | Максимальні розміри робочої зони | Стандартна точність розмірів |
|-------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 0,014 мм                | 490x390x200мм                    | ± 0,025 мм                   |

### **Контрольні запитання**

1. Розшифруйте назву процесів 3D-друку: FDM, SLS, SLA, EBAM, LOM, MJF, MJ.
2. В яких процесах як початковий матеріал застосовують порошок, а в яких дріт?
3. Які процеси 3D-друку можна застосовувати як для полімеру, так і для металевих матеріалів?
4. Які процеси можна застосовувати для виготовлення мегагабаритних конструкцій?



### 3 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ 3D-ДРУКУ

Розглянемо основні матеріали, які нині доступні на ринку для 3D-друку виробів: полілактид (PLA), акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), поліефірефіркетон (PEEK), поліефірімід (ULTEM), поліетилентерефталат (PETG).

**Полілактид** простий у використанні, друкування відбувається при низькій температурі, що означає економію електроенергії і ціни принтера, який не повинен витримувати високих температур. PLA нетоксичний та біорозкладний.

**Акрилонітрил-бутадієн-стирол** стійкий до агресивних хімічних речовин і фізичного впливу. Він дуже простий в обробленні і недорогий. Має сильні й потенційно небезпечні пари. ABS підходить для виробів, які потребують гладкої поверхні, зазнають ударних навантажень або нагріваються.

**Поліефірефіркетон** є хімічно стійким. Має надзвичайно високу термостійкість, а також стійкість до ультрафіолетового випромінювання і гідролізу. Добре піддається обробленню: зварюванню, склеюванню і т. п. Має низьке вологопоглинання, мало виділяє диму та токсичних парів при пожежах. Однак є дорогим і має низьку ударну в'язкість. Використовується при виробництві деталей літаків, автомобілів та інших виробів, що працюють у термічно і хімічно агресивних середовищах. В основному застосовується у технології виробництва FDM.

**ULTEM** має високу термостійкість, міцність на розрив і хімічну стійкість порівняно з будь-яким іншим пластиком. Він не токсичний, може контактувати з харчовими продуктами і використовується для певних медичних інструментів. Через зазначені властивості його використовують для створення оснасток для композитів. Однак ULTEM є дорогим матеріалом і потребує особливих умов для друкування, наприклад друкування в нагрітому середовищі.

**PETG** є модифікованою гліколем версію поліетилентерефталату (PET), який зазвичай використовується для виготовлення пляшок для води. Матеріал має гарну теплопровідність і коефіцієнт температурного розширення, що означає маленьку усадку і викривлення. На ринку існує кілька варіантів цього матеріалу, включаючи PETG, PETE і PETT. Виділяє мало парів при друкуванні, однак застигає повільно і залишається тягучим у твердому стані.

З кожним роком ринок матеріалів розширюється, і знайти матеріал для конкретного завдання стає легше, проте головними пластиками все одно

залишаються ABS і PLA через їх поширеність, дешевизну, простоту використання та велику експериментальну базу (таблиця 8).

Таблиця 8 – Властивості матеріалів

| Температура плавлення, °C             | PLA         | ABS       | Nylon     | PC        | PEEK      | PETG      | ULTEM     |
|---------------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                       | 157 – 170   | 105       | 220       | 288 – 316 | 343       | 80        | 340       |
| Температура друкування, °C            | 185 – 205   | 230       | 240       | 250 – 320 | 450       | 230 – 250 | 350       |
| Температура застосування, °C          | 49 – 52     | 98        | 160       | 140       | 152       | 70        | 204       |
| Границя міцності на розтягування, МПа | 61 – 66     | 46        | 76        | 59        | 97–100    | 28        | 113,76    |
| Границя міцності на вигин, МПа        | 48 – 110    | 74        | 110       | 93        | 125       | 68        | 137,89    |
| Щільність                             | 1,24        | 1,06      | 1,13      | 1,19      | 1,30      | 1,27      | 1,27      |
| Усадка, %                             | 0,37 – 0,41 | 0,5 – 0,7 | 1,3 – 1,7 | 0,6 – 0,9 | 1,0 – 1,3 | 0,004     | 0,5 – 0,7 |

Недоліки чистих полімерів спонукали матеріалознавців знаходити шляхи для поліпшення їх характеристик, щоб їх структурні функції відповідали функціональним вимогам. Одним з можливих рішень є розроблення полімерних композитів з сировини для FDM-технології з включенням вибраних добавок (наповнювач/волокно) у полімер, щоб отримати систему з унікальною комбінацією властивостей, які неможливо отримати тільки при застосуванні складових матеріалу.

На практиці полімер і наповнювач/волокно поєднують разом через розплав в екструдері перед отриманням відповідного вихідного матеріалу – філамента діаметром  $1,75 \pm 0,1$  мм. Проте вміст наповнювача в полімерній матриці може бути обмежений через технологічні властивості. Наприклад, для FDM-друку наповнювач робить філамент жорстким, що не може забезпечити його гнучкість і тримання тиску в процесі друкування. Таким чином, філамент буде руйнуватися під час його вставлення в машину FDM.

Перші розробки сировини для FDM спочатку були зосереджені на поліпшенні властивостей матеріалу ABS, який спеціально використовується для швидкого інструментального додатка. Щоб виконати вимогу, ABS був змішаний з різними типами і розмірами частинок/волокон, таких як графен, короткі волокна, монтморилоніт і метали. Кількість підсилювального агента, який вводили, зазвичай становила від 0,2...8 мас.% до 10...40 мас.% для нано- та мікророзмірних матеріалів відповідно. Загалом з додаванням підсилювального агента було досягнуто деяке поліпшення механічних, теплових та електричних властивостей, у той же час ці властивості вплинули на його технологічність. Зі збільшенням жорсткості композитний матеріал буде виявляти значну втрату пластичності і менше значення деформації руйнування порівняно з чистим зразком.

### **Контрольні запитання**

1. Які проблеми обладнання для 3D-друку необхідно вирішити при застосуванні полімерів, що мають високу температуру плавлення?
2. Назвіть підсилювальні агенти, що застосуються для армування полімеру для 3D-друку.
3. Якими технологічними параметрами філамента обмежується вміст підсилювального агента?
4. Назвіть переваги застосування біополімеру для створення філамента для 3D-друку.

## 4 ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ФІЛАМЕНТА

Ступінь успіху 3D-друку в першу чергу визначається якістю філаменту, яка, в свою чергу, залежить від декількох аспектів. Найважливішим є якість нитки, що забезпечується допуском на діаметр, який описує змінення діаметра філаменту. В ідеальному випадку нитка має підтримувати абсолютно постійний діаметр по всій катушці. Катушки з ниткою зазвичай мають діаметр 1,75 або 2,85 мм. У разі принтерів Bowden (де двигун від'єднаний від головки) діаметр нитки 2,85 мм забезпечує високу жорсткість, допомагаючи точно розподіляти нитку з екструдера. Цей більший діаметр краще помітний при використанні еластичних ниток, оскільки нитка більшого діаметра згинається менше, що дозволяє друкувати матеріал через довгий тракт екструдера Bowden. Однак важливо знати, що діаметр також впливає на механічний результат, який передбачається досягти, і в деяких випадках необхідні певні технічні рішення для друкування особливого об'єкта. Для нитки діаметром 2,85 мм потрібно більше часу на плавлення полімеру порівняно з ниткою діаметром 1,75 мм, що потребує більш високої температури сопла, оскільки в ньому більше пластика. У разі використання нитки діаметром 1,75 мм досягається більша однорідність при екструзії через дуже малі діаметри сопел, забезпечуючи найкращі характеристики для 3D-друкованого об'єкта. Насправді, у разі принтерів з прямим приводом, в яких двигун встановлено безпосередньо на друкувальній головці, допускається використання обох діаметрів.

Найбільш вживаний допуск на діаметр становить 0,05 мм по всій галузі. Серйозні проблеми можуть виникнути при використанні нитки неправильного діаметра. Наприклад, відхилення від загального діаметра можуть призвести до того, що екструдер вийде з ладу і полімер не потрапить на гарячий кінець. Інший ризик – це коли двигун екструдера недостатньо потужний для проштовхування філаменту або не підходить до отвору гарячого кінця, якщо той занадто широкий.

Ще одна важлива характеристика для успішного 3D-друку – постійна округлість ниток по всій довжині катушки. Це пов'язано з тим, що нитка, яка не має гарної круглої форми, може призвести до серйозної поломки екструдера так само, як і непостійний діаметр нитки.

Домішки є третьою основною проблемою при виробництві або виборі нитки для 3D-принтера. Хімічні домішки призводять до поганої в'язкості розплавленого пластику, оскільки сміття блокує сопло екструдера. Це може бути дорогим досвідом з точки зору як грошей, так і часу.

Якість філаменту визначається при досягненні таких вимог:

1. Розмірний допуск знаходиться в межах  $\pm 0,05$  мм по осях X і Y.
2. Допуск за розміром знаходиться в межах  $\pm 00:04$  мм по округлості.
3. Сталість розплаву в усьому продукті. Внутрішня частина філамента має бути якомога більш однорідною і не мати ділянок з більшою або меншою щільністю.
4. Філамент не має містити забруднювальних речовин або відходів.

Суворі вимоги до точності розмірів виробів і часто нестандартні характеристики матеріалу роблять виробництво філамента для 3D-принтерів однією з найскладніших технологій екструзії з пластмас. Найбільш поширені проблеми, з якими стикаються виробники:

- пульсація діаметра нитки;
- округлість;
- бульбашки повітря в ядрі нитки;
- дефекти поверхні.

Один із способів створення філамента з новими властивостями полягає у введенні в полімер добавок і наповнювачів. У цьому випадку змінюється в'язкість полімеру, наповнювач агрегує, що ускладнює рівномірний розподіл його по основному матеріалу – полімеру, захоплюється повітря, а нитка не утворює однорідної структури.

Однією з головних проблем при розробленні ниток є вибір відповідної технології виробництва ниток на екструдері. Часто нові рішення з оброблення матеріалів приводять до змінення в налаштуваннях процесу екструзії, а отже, до змінення в обладнанні.

Екструзія є одним з найбільш поширених виробничих процесів у пластиковій промисловості. Це безперервний процес, при якому пластик перетворюється на продукт з рівномірним поперечним перерізом, проходячи через філь'єру в контрольованих умовах. Основні компоненти екструдера містять бункер, циліндр, шнек, стрічки нагрівача і філь'єру. При звичайній екструзії пластмас пластик у формі гранул або порошоків подається в бункер. З бункера матеріал надходить на обертовий шнек всередині циліндра, який транспортує пластик уперед у закриту нагріту зону, де пластик розплавляється механічною енергією від обертання шнека і нагрівальними елементами, розташованими вздовж циліндра. Гвинт переміщує розплавлений пластик вперед, поки він не досягне філь'єри, де він виходить через отвір. Філь'єра – це те, що надає кінцевому продукту форми. Після виходу з філь'єри пластиковий потік твердне, зазвичай це досягається протягуванням філамента через систему охолодження. Допоміжне обладнання, таке як знімач з регульованою швидкістю, розміщується після системи охолодження і

використовується для переміщення екструдату від екструдера через систему охолодження з належною швидкістю. Інше допоміжне обладнання може містити різальний пристрій для нарізання філаменту відповідної довжини і упакування його для відвантаження намотуванням. Схему типового шнекового екструдера з основними компонентами зображено на рисунку 11.

Екструдер можна розглядати як горизонтальний хімічний реактор, обладнаний одним, двома, трьома або більше внутрішніми шнеками для постійної подачі реагентів у змінній формі, такої, як тверда речовина, розплав, рідина або газ. Порівняно з одношнековими екструдерами двошнекові мають більш високу здатність до плавлення, змішування і видалення летких речовин, що є основною причиною їх частішого використання під час екструзії. Двошнекові екструдери класифікують залежно від напрямку обертання шнека (взаємне або зустрічне обертання) і за відстанню між гвинтами.

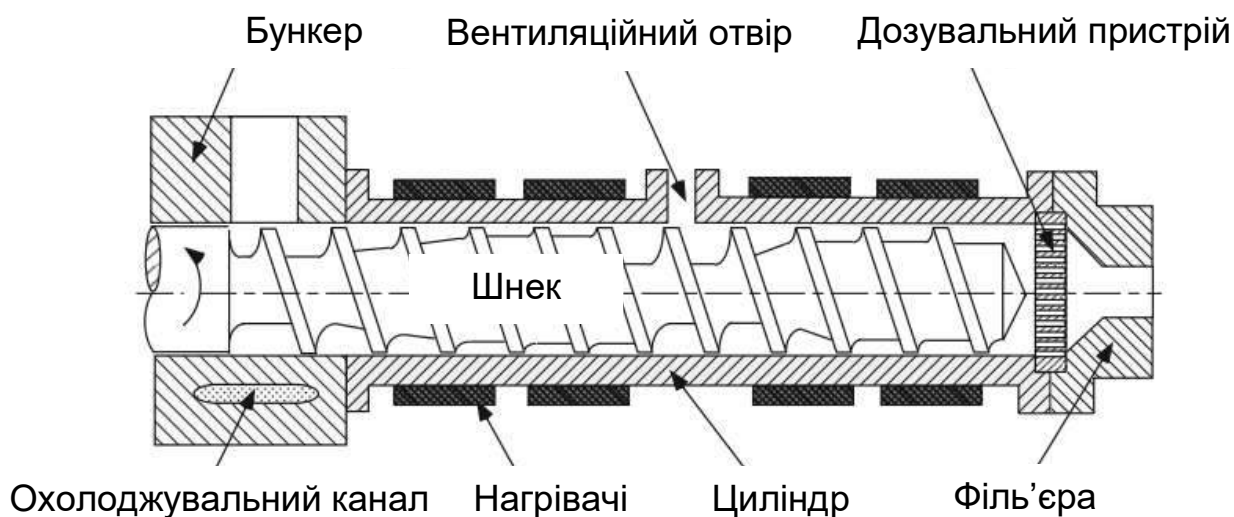


Рисунок 11 – Схема шнекового екструдера

Найбільш поширеними в промисловості є двошнекові екструдери зі взаємним обертанням, які працюють на досить високій швидкості шнека і генерують вищі зусилля зсуву, ніж двошнекові екструдери з протилежним обертанням. Цікавою альтернативою звичайній одно- і двошнековій екструзії є тришнекова екструзія, яка є відносно новою технологією. Згідно з літературними даними перший тришнековий екструдер з трикутними ґратами був розроблений дослідною групою з Пекінського університету хімічної технології та запатентований у 2001 році, а перші випробування в промисловому масштабі були проведені в 2006 році. Це нове обладнання для перероблення полімерів забезпечує переваги при змішуванні полімерних сумішей і композитів. Гарні характеристики змішування і диспергування

трихшнекового екструдера обумовлені характеристиками потоку і змішування, які відрізняються від традиційних одношнекових і двошнекових екструдерів. Конструктивні рішення, що застосовуються в потрійних екструдерах, збільшують час перебування полімеру всередині циліндра і збільшують зсувні потоки, що впливають на оброблювані матеріали. Крім того, екструдери з потрійними шнеками мають більшу ефективність пластифікації і змішування, ніж екструдери з подвійним обертанням та подвійним перемішуванням. Тому трихшнекові екструдери підходять для перероблення високов'язких полімерів або полімерів з більш високим вмістом наповнювачів. Крім того, опубліковані дані показують, що в трьохшнекових екструдерах енергоспоживання в 1,5 раза вище, ніж в двошнекових екструдерах з одночасним обертанням, при цьому їх продуктивність збільшується приблизно в 1,3 раза.

Двошнекові екструдери з протиобертанням широко використовуються для отримання полімерів з низькою термостабільністю при переробленні. Звісно, що двошнекові екструдери з протилежним обертанням можуть знайти застосування для оброблення окремих біополімерів і біорозкладальних полімерів, що характеризуються низькою стійкістю до термомеханічної деградації. Двошнекові екструдери, що спільно обертаються, зазвичай встановлюються в сегментований циліндр, кожен сегмент якого може незалежно нагріватися або охолоджуватися ззовні. Крім того, внутрішнє тепло генерується під час зсуву і змішування в'язкого полімерного матеріалу в екструдері. Джерела внутрішнього і зовнішнього тепла дають енергію, необхідну для активації хімічних реакцій. Сегментована конструкція циліндра дозволяє краще контролювати температуру всередині екструдера. Це дуже важливо, особливо у разі реактивної обробки, де можуть виникнути деякі проблеми з відведенням тепла від матеріалу під час екзотермічної реакції. Крім того, модульна конструкція шнеків у спільнообертаних екструдерах дозволяє легко модифікувати конструкцію шнека. Застосування змінних гвинтових елементів (наприклад, для транспортування, перемішування, дисперсійного перемішування і т. п.) у поєднанні з зовнішнім нагріванням дозволяє визначити загальну енергію і ефективність перемішування матеріалу в кожній секції циліндра. При використанні наповнювачів особливо важливо забезпечити адекватну ступінь диспергування в полімерній матриці. З цієї причини полімерні композити та композиції з високим коефіцієнтом наповнення найчастіше виготовляються з використанням двошнекових екструдерів з коротким замиканням, оскільки ці машини характеризуються дуже високою ефективністю перемішування. Ефект гарного розподільного перемішування досягається завдяки значній частці радіального перемішування між парою елементів і потоком полімеру між гвинтами.

Розглянемо окремі ділянки екструдера, їх конструктивні особливості і призначення.

### Шнек

Шнек екструдера є важливим компонентом машини. Конструкція шнека відіграє важливу роль і поряд з оптимальними параметрами обробки, такими, як швидкість шнека і швидкість подачі, є ключовим аспектом у досягненні гарної якості продукту. Шнеки екструдера мають кілька функціональних зон або секцій (рисунок 12).

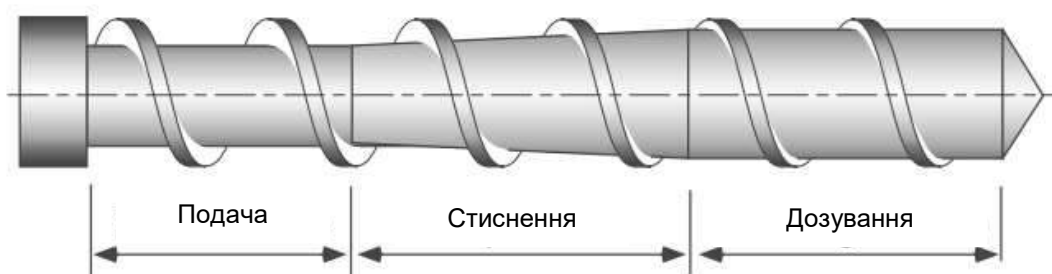


Рисунок 12 – Геометрія звичайного шнека екструдера

Це секція подачі, секція стиснення і секція дозування. Їх можна описати трьома основними параметрами: довжиною, кутом зсуву кулачкових елементів відносно один одного і товщиною кулачкового елемента.

Багато теоретичних, експериментальних та імітаційних досліджень описують поведінку полімеру в процесі екструзії, фокусуючись на поведінці полімеру всередині циліндра і механічній роботі шнека в різних умовах обробки. Проведені дослідження дозволяють правильно спроектувати екструдер, вибрати геометрію шнека і розподілити температурні зони. Хоча при модифікації полімеру добавками виникає багато питань, що потребують проведення додаткових досліджень.

#### **Секція подачі (також зона транспортування твердих матеріалів)**

Зона подачі розташована безпосередньо під воронкою подачі і завантажує полімер в екструдер, зазвичай це від 3 до 10 витків шнека. Призначенням цієї зони є попереднє нагрівання і транспортування твердих матеріалів до секції стиснення полімеру, де матеріали розплавляються. Матеріал у вигляді грануляту сушать для видалення вологи в спеціальних сушарках, а потім подають у завантажувальну воронку екструдера. У той же час наповнювачі подаються разом з основним матеріалом, зазвичай у формі суперконцентрату або порошку.



### **Секція стиснення (також зона плавлення)**

Секція плавлення або стиснення – це місце, де більша частина полімеру плавиться. Це може характеризуватися поступовим збільшенням діаметра кореня шнеку і поступовим зменшенням глибини каналу по всій довжині зони.

### **Секція дозування (також зона транспортування розплаву)**

Діаметр шнека у цій зоні постійний, а глибина каналу дуже мала і також постійна. Тут останні частинки розплавляються, забезпечується остаточне перемішування, після чого гомогенний розплав подається в головку. Матеріал проходить через екструдер, досягаючи відповідного тиску на головці, що спричиняє «набухання» матеріалу після виходу з екструдера.

### **Філь'єра**

Філь'єра є ще одним ключовим компонентом, яка встановлена на кінці екструдера. Призначення філь'єри – це надання форми розплавленому матеріалу, щоб після виходу з філь'єри він міг затвердіти з потрібними розмірами. Філь'єра контролює розміри і форму одержуваного екструдату, який, будучи ще пластичним, розтягується через натяг нитки.

Однією з найбільш важливих проблем при екструзії полімеру є розбухання екструдату, коли він залишає головку філь'єри. Пластичний розплав дуже в'язкий під час оброблення, і екструзія гарячого розплаву через більш холодну область матриці значно розширює розбухання деяких термопластів. При екструзії набухання екструдату залежить від технології і швидкості зсуву, молекулярно-масового розподілу полімеру (MWD), відношення довжини до діаметра (L/D) шнека і різниці діаметрів між резервуаром для екструзії і отвором філь'єри. Визначення умов набухання полімеру є одним з найбільш важливих завдань при проектуванні процесу екструзії.

### **Охолодження**

Після виходу з філь'єри гарячий екструдат потрібно охолодити для затвердіння до бажаних розмірів. Гарячий матеріал надходить у гарячу ванну через впускний отвір, де більшість матеріалів розігрівають до підвищених температур для зменшення усадки. Інша ванна з холодною водою має забезпечити стабільність розмірів на наступному етапі. Температура води змінюється залежно від потреб конкретного матеріалу; це може бути кімнатна температура, або холодніша, або тепліша. Перед тим, як філамент проходить через протяжний пристрій, охолоджувальна вода здувається з нитки

стисненим повітрям, а діаметр перевіряється за допомогою високоточного пристрою двовісного лазерного вимірювання. Після цієї операції матеріал намотується на котушку.

Екструдат також можна охолодити повітрям або комбінацією систем охолодження, це залежить від типу полімеру.

### **Швидкість течії розплаву**

Індекс плинності розплаву (ІПР) або швидкість – це метод аналізу для визначення характеристик плинності розплавленого пластику шляхом визначення кількості грамів полімеру, що протікає через філь'єру за 10 хвилин. ІПР є одним з найбільш важливих параметрів, зазначених при описі полімеру. Метод дослідження, описаний в стандартах ASTM D1238 і ISO 1133, проводиться з використанням індексатора потоку розплаву. Для екструзії рекомендується використовувати пластики з ІПР в діапазоні від 26 до 38 г/10 хв (з розрахунку на 10 кг навантаження при температурі 220 °С). Чим вище індекс ІПР, тим швидше і при меншому навантаженні тече розплавлений полімер. ІПР залежить від температури і структури полімеру – його середньої молярної маси. Екструзія матеріалів з більш високою швидкістю плинності розплаву можлива, але може призвести до нестабільності розмірів нитки. Найбільш поширеною проблемою є округлість нитки під впливом сили тяжіння, і занадто легкий потік матеріалу не зможе забезпечити армування нитки. З цієї причини пластмаси з високим ІПР переробляються при температурах нижче, ніж рекомендовані виробником.

### **Обговорення способів виробництва високоякісної нитки**

Для вирішення проблем виробництва високоякісної нитки використовуються різні методи:

- Попереднє змішування полімеру з наповнювачем у більш високих концентраціях.
- Висушування наповнювача у вакуумі, його нагрівання для запобігання потраплянню повітря і кращого зв'язування наповнювача з полімером.
- Перепроекування гвинта і змінення температури в камері для поліпшення змішування компонентів.
- Установлення додаткового насоса для забезпечення рівномірного виходу наповненого полімеру через головку.
- Змінення шляху охолодження: температура, довжина, напрямок виходу нитки напруження, охолоджувальна рідина.

Пульсація діаметра пов'язана з раптовими змінами тиску в головці, що призводить до нерівномірного виходу матеріалу з екструдера, а коли філамент

витагується, це може навіть призвести до його розриву. Пульсації тиску можна запобігти за допомогою насоса для пластику, який подає розплав з рівномірною швидкістю. Насос забезпечує стабільне дозування матеріалу і дозволяє підвищити тиск на нього. Змінення напрямку потоку полімеру, яке відбувається в насосі, призводить до зменшення напруження в матеріалі, що позитивно впливає на якість екструдата.

Запобігання появі пухирців мона досягти декількома способами. Найпростішим з них є змінення температури в першій зоні плавильної системи і підвищення тиску в головці екструдера. Змінення температури шнека і циліндра в зоні подачі дозволяє більш щільно упакувати матеріал. Якщо цих дій недостатньо, іноді необхідно змінити структуру машини: використовувати гофровану зону засипки або збільшити ступінь стиснення гвинта.

### **Контрольні запитання**

1. Які параметри повинен мати філамент для забезпечення якісного друку?
2. Який процес застосовується для виготовлення філамента?
3. Назвіть основні елементи машини для виготовлення філамента.
4. Які методи застосовуються для підвищення якості виготовлення філамента?

## 5 ЗАГАЛЬНА ТЕХНІКА ДРУКУВАННЯ

Наведемо етапи друкування за допомогою FDM-методу як найпоширенішого методу (рисунок 13).

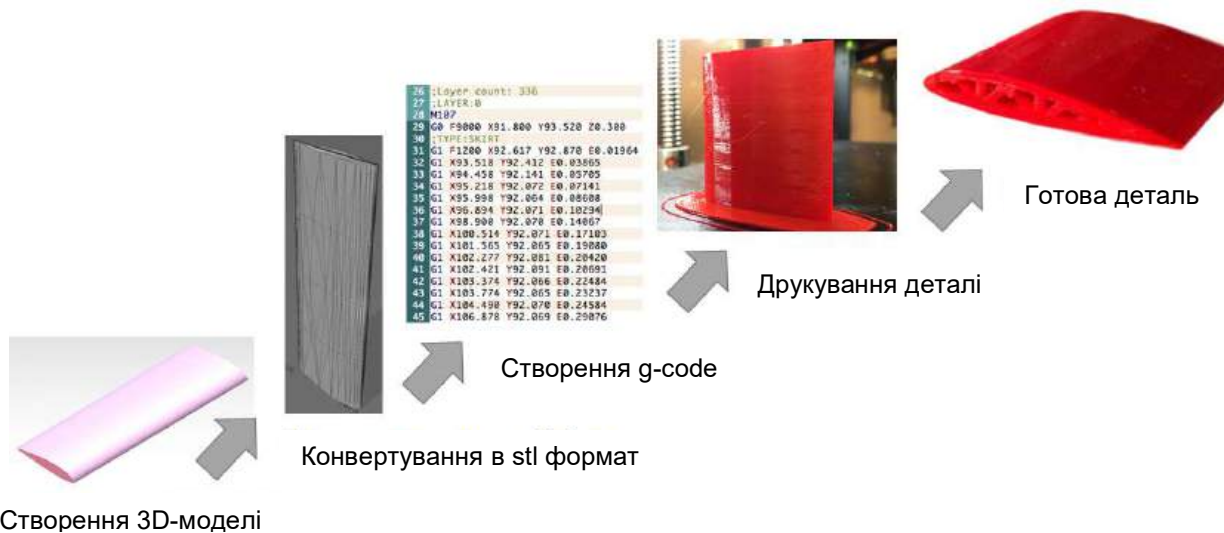


Рисунок 13 – Схема дій для друкування деталей методом FDM

Для друкування деталі необхідно мати 3D-модель, її можна отримати, використавши CAD-програми для моделювання деталі, або завантажити деталь з репозиторіїв в інтернеті. Модель необхідно конвертувати в stl-формат. Далі, використовуючи слайсер (програма, яка розділяє модель в stl-форматі на шари і створює список команд, G-code, що складаються з координат і кількості необхідного матеріалу в цій точці), підставити правильні настройки для вашого принтера і створити G-code. Після цих налаштувань можна друкувати модель.

Коли ви працюєте над дизайном для друкування 3D-моделей, вам доступний широкий спектр форматів або типів файлів. Деякі з них призначені для проектування або сканування, але інші прив'язані до 3D-друку, такі, як: STL, OBJ, PLY або FBX та ін. Залежно від типу деталі, що моделюється, програмного забезпечення, функцій 3D-принтера тощо необхідно використовувати той чи інший формат. Коли об'єкт спроектований і змодельований, необхідно перетворити у файл «\*.stl». Якщо модель була завантажена з інтернету, це перетворення часто вже зроблено. Однак, якщо було використано безкоштовне або комерційне програмне забезпечення САПР, це перетворення є необхідним.

Перш за все коротко пояснимо, що таке формат STL і як він працює.

STL означає «Стандартна мова трикутника». Інакше кажучи, цей формат використовує пов'язані трикутники для відтворення твердої поверхні моделі. Залежно від складності моделі більше або менше трикутників (різного розміру) будуть необхідні для її відтворення, і розмір файла також буде менше або більше. У файлі кожен трикутник визначається набором параметрів, такі, як вектор нормалі до межі трикутника і координати (x, y, z) для кожної вершини трикутника. Зазвичай експортувати проект САПР в формат STL так само просто, як перейти до використовуваного програмного меню і натиснути «Зберегти як ...» або в «Експорт» і вибрати STL. Крім того, залежно від програмного забезпечення деякі характеристики, наприклад точність або допуск, мають бути вибрані. Кроки, які необхідно виконати в деяких програмах CAD, показано нижче. Іноді виникають проблеми при перетворенні в STL, оскільки при побудові моделі не подумали про 3D-друк, або тому, що дизайн у програмному забезпеченні CAD було зроблено невірно або з інших причин. Таким чином, продукція за моделлю, що була експортована може мати помилки. Ці помилки бувають різних видів: дірки або прогалини, перевернуті трикутники (це означає, що нормальні вектори направлено в протилежному напрямку), дубльовані межі або трикутники, які перетинаються, особливі точки або межі поза моделлю тощо. Ремонт цифрової моделі пояснюється на наступному етапі виробничого процесу в 3D-друці.

## **5.1 Тестування, орієнтація, поширення і G-code**

Цей етап виробничого процесу в 3D-друці полягає в підготовці частин деталі або її цифрової моделі (раніше експортованої в STL). Йдеться про виконання такого процесу:

- проаналізувати деталі або моделі: товщина, отвори, стійкість, кути, трикутна сітка і т. п;
- спроектувати опорні конструкції або автоматично згенерувати їх;
- вибрати заповнення моделі як у відсотках, так і в формі;
- розташувати деталь на друкувальній поверхні (або платформі) і вибрати найбільш відповідну орієнтацію;
- згенерувати машинний код або G-code.

## **5.2 Аналіз деталі або моделі**

Аналіз необхідний, коли частини деталі є відносно складними або коли походження моделі невідоме. Це потрібно зробити, якщо ви хочете бути певними на сто відсотків, що модель підходить для 3D-друку. Крім того,

хороший аналіз може виявити помилки в трикутній сітці при перетворенні на STL-формат.

Цей аналіз геометрії моделі можна реалізувати за допомогою програмного забезпечення:

- товщини: рекомендована товщина залежить від 3D-друкарської машини (використовуваної технології). Деякі машини допускають велику товщину нанесення матеріалу. Взагалі кажучи, для машин FDM товщину приблизно 1 міліметр слід вважати прийнятною. Цей параметр не треба плутати з товщиною шару;

- отворів або прогалін: модель, яку потрібно надрукувати, має бути ідеально закрита, тобто водонепроникною. Це означає, що трикутна сітка не повинна мати отворів або зазорів або в ній не повинно бути вершин або не поєднаних трикутників; кожен з них має бути пов'язаний з іншими трикутниками. Рекомендується перевіряти перед друкуванням щільність моделі, щоб побачити помилки або збої;

- кутів і вильотів: цей аналіз може бути проведений залежно від вибраної технології та машини, коли модель або деталь потребують опорних конструкції для друкування. Зазвичай для принтерів за FDM-технологією мінімально допустимий кут нахилу становить 45 градусів. Деталі з великими кутами потребують формування підтримок. Цей аналіз іноді не потрібен, оскільки багато програм безпосередньо перед друкуванням встановлюють необхідні опори для моделі;

- іншого: залежно від використовуваного програмного забезпечення можна виконувати інший аналіз. Крім того, за допомогою деяких програм можна проводити стандартний аналіз, але тоді можуть виникнути різні проблеми. Нарешті зауважимо, що багато програм для аналізу моделі дозволяють не тільки виявляти помилки або проблеми, а й налагодити або проводити автоматичне налагодження моделі.

### **5.3 Опорні конструкції**

Для деяких технологій (майже для всіх тих, які використовують пластик) при друкуванні виступаючих частин (або внутрішніх зазорів) необхідно вставляти опорні конструкції чи підтримки у цих зонах. Вони зазвичай необхідні за наявності в деталях кутів від 45 градусів (для принтерів FDM). Підтримки зазвичай виготовляють з того ж матеріалу, що й основна деталь, хоча є 3D-принтери, які друкують двома матеріалами: перший – основний, другий – для опорних конструкцій. В цих принтерах використовуються розчинні матеріали для друкування підтримки, яку потім розчиняють у певних рідинах.

## 5.4 Заповнення моделі

Цей крок можна реалізувати перш ніж формувати опорні конструкції. Коли говорять про заповнення, мова йде про структуру, надруковану всередині об'єкта. Це означає, що якщо друкується куб, шість зовнішніх стінок будуть надруковані твердим способом з певною товщиною, але внутрішня частина куба не буде суцільною; доведеться вибирати відсоток заповнення і навіть геометричну форму заповнення. Деякі приклади наведено на рисунках 14 і 15.

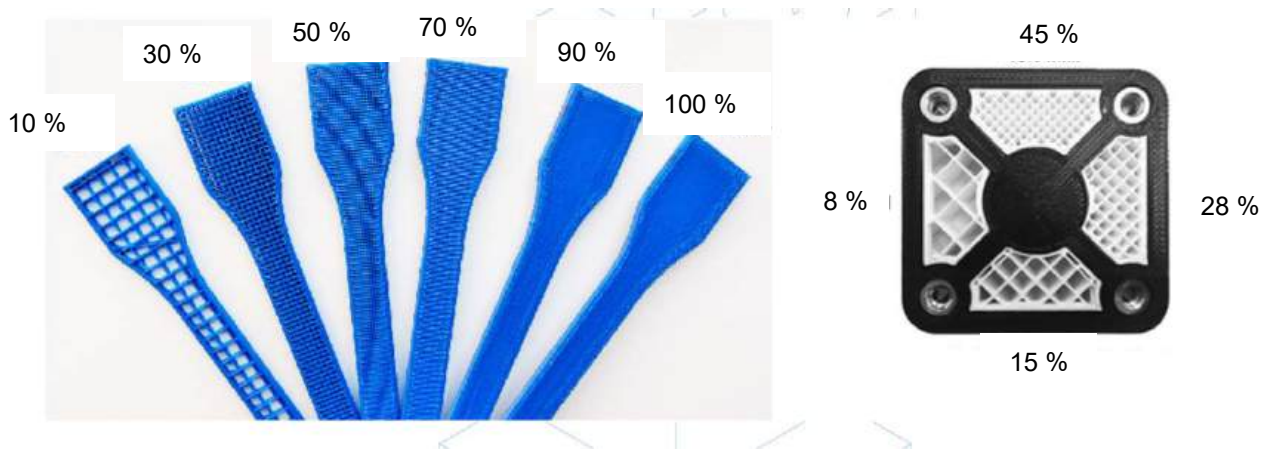


Рисунок 14 – Приклади щільності заповнення внутрішньої структури деталі

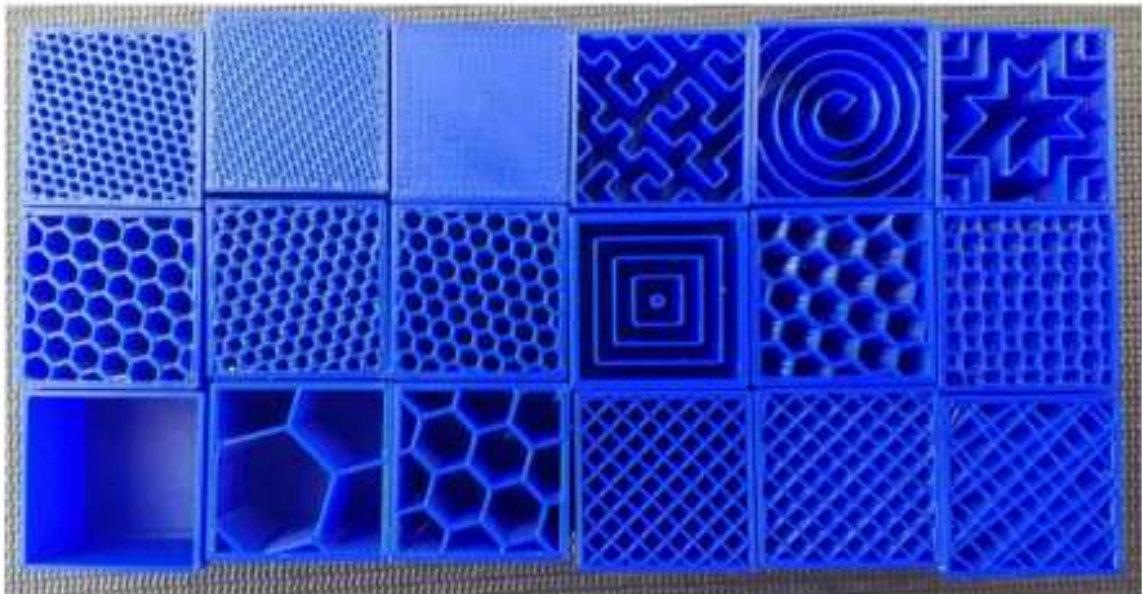


Рисунок 15 – Типи заповнення внутрішньої структури при 3D-друку

## 5.5 Позиціонування та орієнтація

Визначення положення і орієнтації моделі на поверхні друку або друкувальної плати є однією з найважливіших частин всього процесу. Це рішення матиме подальший вплив на якість і властивості виробу. Необхідно враховувати, що те чи інше позиціонування буде виконано залежно від технології, що використовується для друкування (FDM, SLA і т. д.). Пояснимо це згідно з FDM-технологією.

Одним з найбільш часто використовуваних критеріїв вибору позиції і орієнтації є використання мінімальної кількості матеріалу (і витрат на час друкування). Це досягається шляхом мінімізації ваги деталей. Отже, чим менше буде надруковано допоміжних структур, тим модель буде побудована швидше і з меншими витратами. Іноді якість є важливішою, тому можуть бути вибрані орієнтації, які не є оптимальними з погляду матеріалу і часу друкування (рисунок 16).



Рисунок 16 – Види позиціонування деталі при друкуванні

Розглянемо кілька порад:

1. Центрувати модель на поверхні друку. Це зменшить рух головки (та час друкування) і підвищить якість і точність виробу, оскільки друкувальні платформи зазвичай більш вирівняні і відкалібровані в центральній частині, а якщо вони з підігрівом, то тепло зосереджується в центральній частині.
2. Якщо ви хочете надрукувати кілька частин одночасно, вони мають бути зібрані разом з пропуском між ними близько 5...15 міліметрів.
3. Якщо є вигнуті або похилі поверхні деталі, то їх бажано розташувати у площині XY (горизонтальна площина) або паралельно їй. Таким чином,



ефект «сходинки» буде виключено, якщо вигнуті або похилі поверхні не є гладкими.

4. Спостерігаючи попередню картинку, якщо деталь має внутрішній або наскрізний отвір, поверхня якого потребує високої якості, то досить помістити отвір таким чином, щоб його вісь була перпендикулярна до друкувальної платформи.

5. Дуже довга і плоска ділянка, надрукована на горизонтальній площині або у площині XY може мати деформації викривлення, оскільки її зовнішні межі дуже швидко остигають і стискаються, змушуючи надруковану частину деформуватися вгору. Іноді, щоб надрукувати ці частини якісно, необхідно розташовувати їх переріз перпендикулярно до плити для друкування.

6. У загальному випадку верхня поверхня надрукованого виробу буде найкраще оброблена.

7. Якщо друкувати функціональні елементи, які мають витримувати навантаження, то в них можуть відбутися розшарування і руйнування, коли сили або навантаження перпендикулярні до напрямку шарів. Це зображено графічно на рисунку 17.

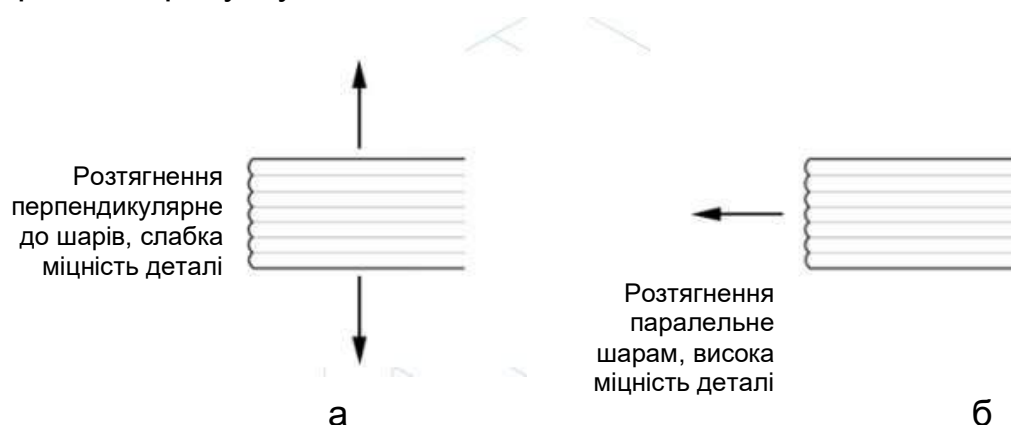


Рисунок 17 – Схема навантаження надрукованого пластику: а – слабка міцність надрукованого пластику; б – висока міцність надрукованого пластику

## 5.6 Генерація G-code

Після того, як всі попередні кроки було зроблено, необхідно генерувати так званий G-code або машинний код. Цей код є перекладом моделі (і всіх параметрів, які були попередньо встановлені) в інструкції, які машина може зрозуміти. Перед цим залежно від використовуваного програмного забезпечення необхідно вибрати висоту шару або товщину шару. Такий параметр має велике значення, оскільки впливатиме на остаточну якість

поверхні деталі. Чим менше висота шару, тим кращою буде якість, але більшим час друкування (рисунки 18, 19). Слід розуміти, що у цьому випадку необхідно вибрати, що є важливішим – естетика або швидке і дешеве друкування. Іноді відмінності між двома однаковими зразками з висотою шарів у 100 мікрон та 200 мікрон важко розрізнити. Але зразок у 100 мікрон потребує в два рази більше часу і буде коштувати дорожче. Тому дуже важливо знати, яка кінцева мета використання деталі. Також слід знати, що наявність кривих поверхонь і кутів у моделі робить висоту шарів на цих ділянках помітнішою, ніж на прямих стінках.

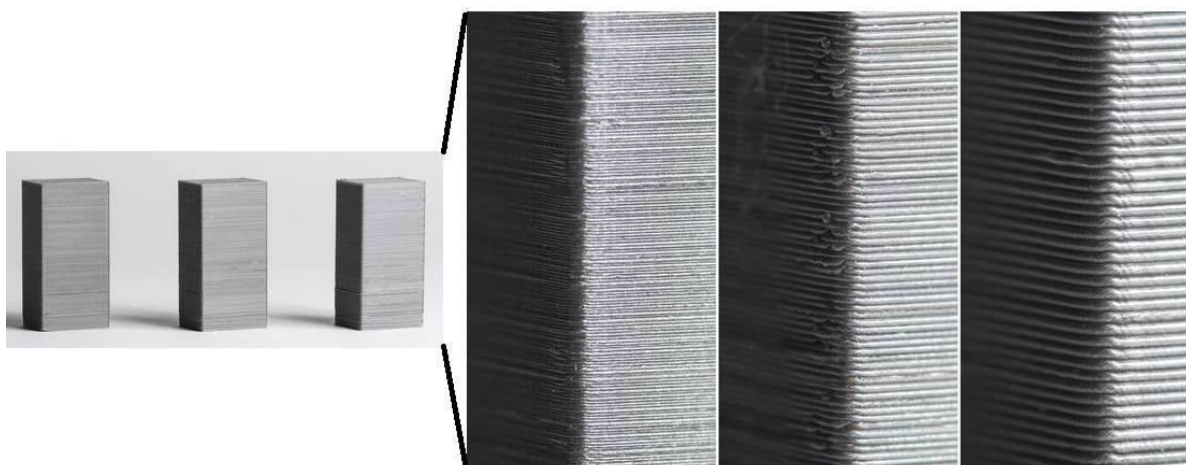


Рисунок 18 – Вплив товщини шару друкування на якість поверхні деталі

Зауважимо, що для кожної машини і технології існує певний діапазон значень висоти шару для вибору. Наприклад, для FDM загальний діапазон становить від 50 до 300 мікрон (від 0,05 до 0,3 мм).



Рисунок 19 – Якість поверхні шару залежно від товщини шару друкування

Отже, на цьому етапі G-code має бути згенеровано, і це може бути зроблено за допомогою різного програмного забезпечення. Програма розрізає модель на горизонтальні «зразки» або шари, генеруючи шлях, за яким головка машини буде пересуватися. Вона також розраховує кількість матеріалу (вагу і метри) і потрібний час друкування підтримки.

G-code може бути створений за допомогою таких програм, як Skeinforge, Cura, Slic3r ... (рисунок 20).

З вибраної програми G-код експортується і зберігається на SD-картці або у флеш-накопичувачі. Також він може бути відправлений безпосередньо на апарат, що залежить від програмного забезпечення та апарата.

Підводячи підсумок цієї частини, слід враховувати, що існує безліч параметрів, які можна змінити: товщину стінки, швидкість друкування, температуру друкування і температуру шару, потік і т. п., але ці параметри редагуються користувачами з досвідом.

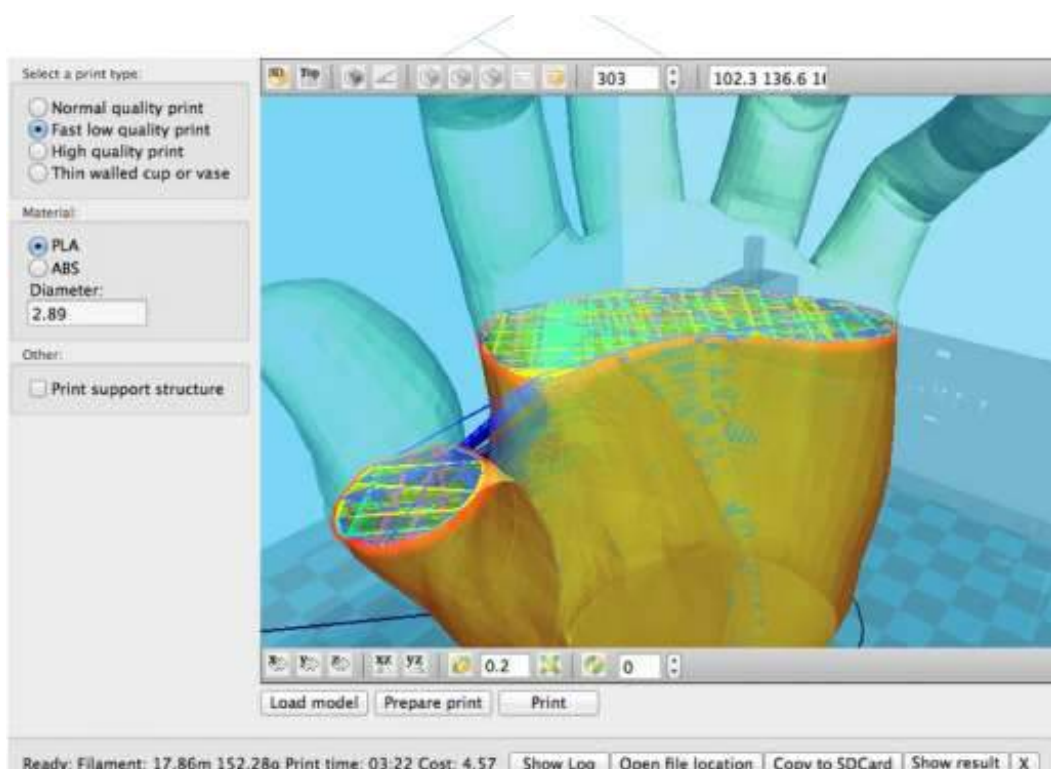


Рисунок 20 – Приклад роботи програми Slic3r

## 5.7 3D-друк

Тепер, коли G-code отримано, процес 3D-друку може бути реалізований, але є кілька речей, які слід розглянути і перевірити перед друкуванням.

Для принтерів FDM має бути перевірена температура підставки або друкувальної платформи і екструдера (програмне забезпечення або принтер роблять це автоматично, коли друкування починається). Рекомендується також використовувати будь-який лак, щоб полегшити екстракцію деталі.

Бажано прочитати інструкції, щоб знати, як завантажити нитку у принтер, а також для отримання додаткової інформації.

Таким чином, G-code відправляється на машину, і принтер починає працювати.

## 5.8 Витягування деталі

Коли принтер вже закінчив друкування настав момент для реалізації процесу вилучення деталі. Залежно від машини і головним чином від технології та використовуваних матеріалів процеси вилучення будуть варіюватися.

Для машин FDM-друку деталі часто видаляються вручну або за допомогою плоского інструменту, наприклад леза, або гнучких платформ, які значно полегшують екстракцію. Є навіть методи з використанням розчинника, застосуванням холоду чи зубної нитки.

## 5.9 Пост-обробка

Для багатьох деталей необхідний додатковий процес оброблення, який також змінюється залежно від виду технології і машини. Для деяких технологій і принтерів цей процес є необхідним. Оскільки існує безліч технологій і машин, розглянемо найпоширеніші процеси, які використовуються для принтерів FDM.

Перш за все слід зазначити, що деякі з надрукованих частин, можливо, не потребують кроків додаткового оброблення. Або деяким з них потрібно буде просто механічно видалити опору підтримки. Є багато процесів оброблення і пост-процесів:

- Видалення опорних конструкцій: це можна зробити механічно, як було сказано, або з використанням ванни з розчинником (або навіть з водою), якщо матеріал для друкування підтримок є відповідним до цього процесу.

- Шліфування: цей процес застосовують, коли опорні конструкції вже видалені. Можна вибрати кілька класів шліфування.

- Завершальні: це роблять, коли деталь повинна мати «дзеркальну» поверхню, тоді її необхідно відполірувати. Необхідно попередньо відшліфувати модель наждачним папером № 2000. Потім порошок необхідно очистити, а деталь відполірувати мікрофіброю або покрити спеціальною емаллю, яка буде довго блищати.

## **5.10 Пост-затвердіння**

Для таких технологій, як стереолітографія, іноді потрібно подальше затвердіння в печі під ультрафіолетовими променями. Цей процес використовують для поліпшення властивостей матеріалу та закріплення форми виробу.

### **Контрольні запитання**

1. Назвіть основні етапи 3D-друку.
2. Проаналізуйте основні обмеження при 3D-друку методом FDM.
3. Назвіть основні недоліки при аналізуванні 3D-моделі.
4. Розкрийте особливості формування підтримок.
5. Назвіть типи заповнення внутрішньої структури при 3D-друку.
6. Назвіть поради до розташування деталі на друкувальній платформі.
7. Що таке G-code, яким чином він створюється?
8. Які додаткові операції можуть знадобитись після друкування деталі?

## 6 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Створення 3D-моделі відбувається безпосередньо кресленням, скануванням або завантаженням з репозиторії. Програмне забезпечення, яке можливо буде потрібно, подано на рисунку 21.

1. Створення 3D-моделі: безкоштовні програми: SketchUp, FreeCAD, Wings3d; студентська версія Autodesk Fusion, Autodesk Inventor; комерційні програми: SolidWorks, Catia.

2. Програми для 3D-сканування: Structure (<https://structure.io/>), Sense (<https://3dsystems.com/3d-scanners/sense-scanner>)

3. Завантаження 3D-моделей з веб-сайтів репозиторії. Щоб надрукувати за завантаженою 3D-моделлю іноді необхідно виконати її невелике редагування. Натиснувши на посилання нижче, можна знайти багато веб-сайтів, на яких доступні різні приклади моделей: <http://3dprintingforbeginners.com/3d-модель-репозиторії/>

4. Програми тестування, орієнтування та ремонту: AutoDesk NetFabb, Autodesk MeshMixer (<https://www.mmmmanual.com/>), MeshLab (<https://meshlab.net/#support>)

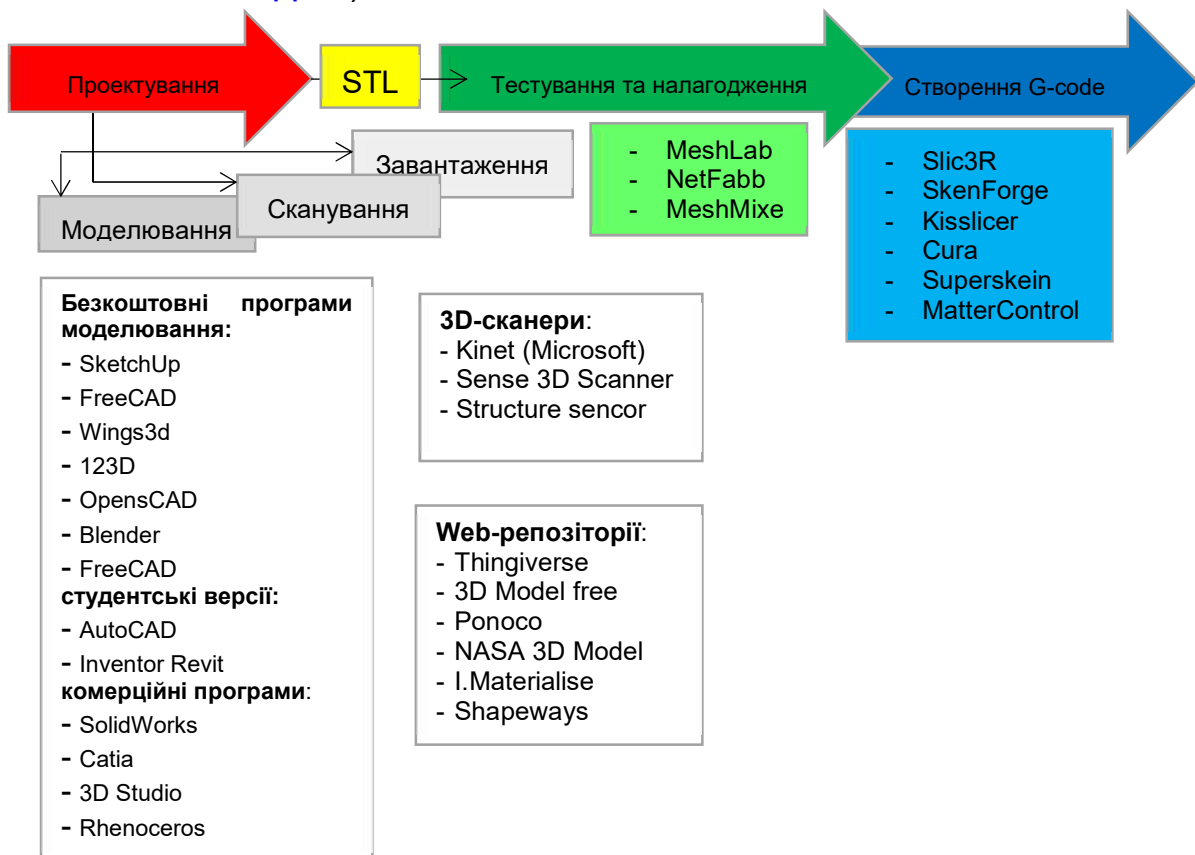


Рисунок 21 – Програмне забезпечення для підготовки моделі для 3D-друку

## Як перетворити зображення (JPG / PNG) в STL?

Існує три основні способи:

**Варіант 1.** Використовуйте програму 3D Builder (для Windows).

Алгоритм:

1. Перетягніть зображення в робочу область або натисніть кнопку «Додати» в Меню Inset і виберіть файл.
2. Використовуйте налаштування «Рівні» і «Згладжування», щоб зробити зображення чітким. Якщо необхідно досягти потрібних ефектів, зверніться до методів «Contour», «Height Map», «Edge» і «Stamp».
3. Якщо ви задоволені результатом, натисніть кнопку "Імпортувати зображення". Воно буде зберігатися у форматі STL.

**Варіант 2.** Використовуйте Ultimaker Cura. Це корисно, якщо ви використовуєте Cura як слайсер, оскільки вам не потрібно експортувати та імпортувати файли далі.

Алгоритм:

1. Імпортуйте зображення в програму Cura, перетягнувши його в робочу область.
2. Внесіть зміни до параметрів зображення (висота, ширина, товщина, плавність тощо), використовуючи меню налаштувань, яке з'явиться під час імпортування файла.
3. Екпортуйте змінене зображення у форматі STL або OBJ, вибравши пункт «Файл», а потім – функцію «Експортувати». На цьому етапі можна відразу підготувати його до 3D-друку, нарізавши модель на шари.

**Варіант 3.** Lithopane Converter. Рекомендуємо спробувати конвертер за посиланням <http://3dp.rocks/lithophane/>

Алгоритм:

1. Натисніть на меню «Зображення» та завантажте файл на site.
2. Виберіть форму вашого lithofan в меню «Модель».
3. Перейдіть до меню «Настройки», а потім виберіть пункт «Настройки». Змініть максимальний розмір на значення, до якого ви збільшуєте масштаб.
4. Перейдіть до меню «Настройки», а потім виберіть пункт «Настройки». Є багато варіантів, які можна змінити самостійно. Головне встановити «Positive image».
5. Поверніться до меню «Модель» і натисніть кнопку «Оновити», а потім завантажте файл у форматі STL. Якщо ви плануєте запустити його до 3D-друку, обов'язково друкуйте вертикально зі 100%-м наповненням.

### **Контрольні запитання**

1. Назвіть етапи створення виробу від задума до 3D-друку.
2. Які процеси необхідно провести при підготовці цифрової моделі для 3D-друку?
3. Назвіть правила ефективного розміщення моделі на столі принтера для забезпечення максимальної міцності матеріалу та точності розмірів виробу?
4. Які операції проводять над виробом після його друкування залежно від типу принтера та матеріалу друкування?



## 7 ОБМЕЖЕННЯ ДЛЯ ДРУКОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЇХ ДРУКУВАННЯ

У цьому розділі буде показано обмеження як АВ, так і 3D-друку в цілому, а також конкретні обмеження для кожної технології, зокрема FDM-технології.

Незважаючи на очевидні переваги цієї технології, є обмеження, які утруднюють застосування АВ у багатьох галузях.

Поточні обмеження обумовлені як самими процесами АВ, які все ще можуть бути поліпшені, так і допоміжними процесами (попередні маніпуляції з матеріалом, пост-обробка, контроль якості і т. п.). Відсутність знань про те, як розробляти продукти і як переорієнтувати компанії на успішне інтегрування цих нових технологій, також впливає на ефективність використання АВ. Ці обмеження, безсумнівно, можна подолати, створюючи завдання для досліджень, технологічного розвитку та інновацій, які нині вирішуються командами дослідників і багатьма компаніями по всьому світу. Деякі з цих обмежень наведено нижче.

*Технології в розробленні:* багато технологій знаходяться в постійному розвитку, але деякі з них все ще перебувають на ранніх стадіях розроблення. Через кілька років існуюча конструкція принтера може стати застарілою.

*Наявність і вартість сировини:* отримання матеріалів у деякому сенсі може бути складним. Крім того, вартість деяких матеріалів досить висока, якщо будуть потрібні дуже конкретні властивості виробу. Найголовнішим і дешевим матеріалом зазвичай є пластик.

*Початкові інвестиції:* настільні FDM-принтери зазвичай дешеві, але для інших технологій, особливо, якщо потрібні машини більшого розміру, початкові інвестиції можуть бути дуже високими.

*Розмір частин деталей:* при друкуванні деталей можна нарізати на багато великих частин, а потім з'єднувати разом, але такий метод потребує додаткових витрат. Розміри частин деталі вибирають залежно від площини друкарського столу.

*Некомерційне масове виробництво:* АВ і 3D-друк призначені для малих партій (близько 1 – 10 штук). Для великих серій виробництво за цими технологіями стає не вигідним.

*Поверхня і точність:* взагалі, щоб отримати хорошу поверхню і високу точність, потрібні великі витрати, тобто необхідно буде використовувати більш витратні технології і машини. Крім того, деталям може знадобитись пост-обробка, інші машини і спеціальні процеси.

*Отримання цифрових файлів:* якщо потрібні конкретні і спеціально надбудовані елементи, необхідно володіти передовими знаннями в області проектування CAD. У більшості випадків сховища файлів САПР недостатньо. Це стосується і 3D-сканерів, вони дорогі і їх використання потребує певних знань.

## **7.1 Обмеження залежно від типу технології адитивного виробництва**

Розглянемо певні обмеження, згруповані для кожного типу технології.

*Обмеження для FDM.* Погане оброблення поверхні і низька швидкість друкування порівняно з іншими технологіями 3D-друку. Типовий розмір друку для настільних FDM-принтерів становить 20x20x20 см. Потрібні підтримки для друкування деталі, що має виступи з кутами більше 45 градусів. Мінімальна товщина має бути 0,8 мм. Рельєф на деталі не може бути більше ніж 0,6 мм шириною і 2 мм висотою. Горизонтальні «містки» більше 10 мм не можуть бути виконані без підтримки. Зазвичай отвори діаметром менше 2 мм неможливо надрукувати. Для виступаючих частин при друкуванні розмір цієї частини має бути більше 2 мм. Коли необхідно друкувати сполучні штифти, рекомендований мінімальний діаметр становить 3 мм. Очікуваний допуск (точність розмірів) становить приблизно  $\pm 0,5\%$  ( $\pm 0,5$  мм).

*Обмеження на SLS.* Середній об'єм платформи становить близько 30x30x30 см. Оздоблення злегка гранульоване і матове, тому, якщо потрібно глянцеове і гладке покриття, рекомендується застосовувати пост-обробку. Стінки повинні мати товщину не менше 0,7 мм. Ширина і висота рельєфу на деталі мають бути не менше 1 мм. Загалом, неможливо надрукувати отвори діаметром менше 1,5 мм. Для видалення матеріалу підкладки (неспеченого пилу) необхідно формувати прохідні отвори в деталях. Вони повинні мати мінімальний діаметр 5 мм. Мінімальний розмір моделі, щоб відбиток не втратив форми, становить близько 0,8 мм, це стосується і з'єднання на штирі. Очікуваний допуск становить приблизно  $\pm 0,3\%$  ( $\pm 0,3$  мм).

*Обмеження для SLA.* SLA-принтери зазвичай мають набагато менший робочий простір, ніж більшість FDM-принтерів, виняток становлять промислові машини, які можуть мати розмір столу 14,5x14,5x14,5 см. Коли деталь велика, краще роздрукувати її невеликими частинами, а потім зібрати їх. Ціна смол дуже висока (від 150 євро/літр). Більшість деталей, надрукованих SLA, потребують подальшого затвердіння в УФ-печі. Мінімальна рекомендована ширина стінки становить 0,5 мм (якщо ця стінка пов'язана з іншим елементом) або 1 мм (якщо не пов'язана). Підтримки завжди потрібні для консольних деталей (це також робить друкування дорожчим). Рельєф на деталі має бути

0,4 мм (ширина і висота). Діаметр отворів у деталях, які друкуються, має бути приблизно 0,5 мм. Щоб матеріал вилучити, у пустотілих місцях мають бути залишені аварійні отвори, діаметр яких має бути приблизно 4 мм. Щоб зображення на моделі не збігалися, мінімальний розмір частин деталі має бути 0,2 мм. Для сполучних штифтів рекомендується діаметр 0,5 мм. Очікуваний допуск або точність розмірів становить близько  $\pm 0,5\%$  ( $\pm 0,15$  мм).

## **7.2 Способи підвищення якості та властивостей конструкцій, виконаних методом 3D-друку**

Для досягнення більш широкого спектру застосування АВ дослідники та розробники повинні вирішити деякі ключові технічні проблеми.

**Матеріальна сумісність.** Матеріали, які можна використовувати в технологіях АВ, нині обмежені порівняно невеликою кількістю сумісних матеріалів. Необхідні нові полімерні й металеві матеріали, щоб забезпечити затребувані властивості, такі як гнучкість, провідність, прозорість, безпека і низька енергія перетворення.

Вихідна сировина для техніки FDM дуже швидко змінюється від простого пластику – зазвичай чисті ABS і PLA, до композитів на їх основі та інших полімерних композитів. Новітня технологія FDM використовує високоефективні полімери (PEI, PEEK), а також нове покоління з безперервних волокон, які є більш перспективними, ніж попередні види сировини для досягнення більш високих механічних властивостей друкованих конструкцій. Майбутній підхід до сировини філамента може бути розширено шляхом включення цих матеріалів разом з електропровідними матеріалами для друкування конструкційних деталей з електронікою. Наявність техніки для оброблення безперервних волокон також відкриває можливість розроблення полімерних композитів, армованих натуральними волокнами, для заміщення армувального скла і вуглецевого волокна. Крім того, подальші дослідження можуть бути зосереджені на поліпшенні міжфазної взаємодії між волокнами і полімерами шляхом фізико-хімічної обробки. Необхідно зазначити, що екологічний аспект також слід враховувати у цьому технологічному розвитку. Таким чином, виробництво екологічно чистої сировини, такої, як перероблений пластик з наповнювачем або волокном, виробленої з побічних продуктів біовідведення, може бути корисним у майбутньому.

**Контроль процесу.** Системи контролю зворотного зв'язку і вимірювання необхідні для підвищення точності й надійності виробничого процесу і збільшення пропускну здатності при збереженні узгодженості якості. Контроль зворотного зв'язку особливо складний для процесів АВ зі швидкими

темпами осадження. Здатність адаптувати мікроструктуру матеріалу на місці може поліпшити експлуатаційні властивості.

**Допуски.** Для деяких потенційних застосувань потрібна точність друкування в мікронному масштабі.

**Готовність.** Поверхнєве оброблення виробів, виготовлених за адитивною технологією, потребує подальшого уточнення. З покращеною геометричній точністю поверхні можна отримати поліпшені трибологічні та естетичні властивості.

**Масштабованість.** Процеси традиційного виробництва, наприклад лиття, пресування, є перевіреними і придатними для великих обсягів виробництва. Продукція адитивного виробництва нині не працює в тих же масштабах.

**Швидкість оброблення.** У той час як виробництво малих обсягів відбувається швидше, ніж в традиційних процесах (ТП), великі обсяги виготовляються значно повільніше. Наприклад, нове покоління машин АВ необхідні для замінення лиття під тиском і ливарних машин. Виготовлення деталей у паралельному виробництві (поруч з машиною) може прискорити процес, що дозволяє АВ конкурувати з методами ТП, такими, як лиття під тиском.

**Електроенергія.** Вплив якості електроенергії на обладнання АВ не зовсім зрозуміло. Перепади потужності чи її переривання можуть впливати на якість виробу, виготовленого з використанням АП, шляхом появи дефектів, які складно виявити. Необхідні дослідження для оцінювання впливу характеристик якості електроенергії на обладнання АВ, щоб краще зрозуміти дизайн і структуру цього нового типу виробничої системи.

**Валідація та демонстрація.** Виробники, організації по стандартизації та інші підтримують високі стандарти для критичних конструкційних матеріалів, які використовуються в аерокосмічній промисловості. Забезпечення високого рівня впевненості в структурній цілісності компонентів, створених з використанням адитивної технології, може потребувати всебічного тестування, демонстрації та збору даних. Вартість визначення властивостей матеріалу для кожного типу матеріалів, для кожної добавки і меншою мірою для кожного принтера може перевищувати багато тисяч доларів (і мільйони в критично важливих додатках), що є величезним бар'єром для входу на ринок.

**Моделювання.** Моделювання і симуляція АВ дозволяє проектувати і реалізовувати процес контролю. Фізичні моделі процесів необхідні для розуміння фундаментальної фізики процесів АВ як для поточних процесів з одним матеріалом, так і особливо для багатокomпонентних добавок.

Проблеми з інтерфейсом, такі як склеювання і теплове розширення, можуть бути значними. Наприклад, числове моделювання затвердіння металевих сплавів є дуже складним завданням, оскільки загальне затвердіння металевих сплавів містить так звану «м'яку область», в якій є рідина і явища переносу відбуваються в широкому діапазоні масштабів часу і довжини.

**Параметри обробки.** Механічні властивості надрукованих деталей можуть бути додатково поліпшені з урахуванням параметрів 3D-друку процесу FDM і їх оптимального вибору. Крім того, на сьогодні більшість поточних досліджень все ще зосереджені на оптимізації параметрів для звичайних полімерних композитів, а не для безперервних волокон і високоефективних полімерів. Крім того, параметри, які зазвичай впливають на продуктивність, можуть бути визначені кількісно за допомогою відповідного математичного та обчислювального апарату. Модель гідродинаміки також може бути використана для поліпшення конструкції головки екструдера, щоб поліпшити якість друкування частин моделі і уникнути закупорки матеріалу в головці через залишки волокон або полімеру.

**Контрольована швидкість охолодження.** Оскільки більшість інженерних і високоефективних сировинних матеріалів FDM належать до типу напівкристалічного полімеру, необхідно досліджувати кінетику кристалізації цих матеріалів при охолодженні, оскільки вона також суттєво впливає на точність розмірів, естетичну якість, а також механічні властивості друкованих деталей. Контрольована швидкість охолодження потрібна, щоб мінімізувати явище усадки і викривлення під час температурних процесів АВ.

### 7.3 Помилки 3D-друку

Коли друкується модель, у деяких випадках потік матеріалу може бути перерваний через незначні, а іноді й через серйозні дефекти. Незначними дефектами можна нехтувати, якщо попередній і/або більш пізні шари компенсують відсутній або дефектний шар. Навпаки, якщо виникають серйозні дефекти, 3D-друк не може виконати бажане виробництво деталі. Деякі заходи можуть бути вжиті, щоб уникнути такого роду дефектів. В іншому випадку це втрата матеріалу, часу і коштів. Дефекти друкування можуть бути згруповані, як зазначено нижче:

- Відсутність співвісності друкованої платформи.
- Відсутність співвісності сопла.
- Засмічення форсунки.
- Порушення потоку матеріалу.
- Відсутність або втрата адгезії до платформи друкування.
- Вібрація або удар (від принтера або іншого джерела).
- Неточні налаштування параметрів принтера.

## **Відсутність співвісності друкованої платформи**

Зсув платформи друкування може призвести до серйозних проблем. Сопло або платформа друкування може навіть zdeформуватися, якщо 3D-принтер погано відкалібрований або налаштований. Платформа друкування рухається тільки в напрямку Z, і рух друкувальної платформи визначає товщину шару. У деяких випадках, якщо довжина кроку не налаштована, наступний шар не може зчіплюватися з попереднім шаром. Наприклад, перший шар не прилипає до платформи друкування, сопло знаходиться дуже близько до платформи, шар вигинається і з'являється так звана слонова нога, краї шару згинаються (з'являється викривлення) і деталь не друкується. Отже, нарізні стрижні або ходові гвинти, які використовуються для принтера, слід перевірити на наявність вигинів або будь-яких забруднень, які перешкоджають руху стола. Тому важливо протерти стрижні перед нанесенням свіжого шару масла.

## **Відсутність співвісності сопла**

Сопло переміщується за допомогою порталного робота, який містить два крокових двигуни, ремені і шківів. Проблеми, які впливають на роботу двигунів, ременів і шківів, також впливають на стан сопла, і, як наслідок, фізична модель не може бути отримана, оскільки вона моделюється за допомогою програмного забезпечення САПР. Деякими основними проблемами, пов'язаними з цими частинами принтерів, є такі: натяг ременів, ослаблення гвинтів, сміття, що перешкоджають сталому руху сопла. Ситуації, зазначені вище, можуть призвести до таких проблем: друкувальна головка не потрапляє в розрахункову точку, шари погано шикуються, деякі шари відсутні, друкування нахилляється – тобто деталь друкується зі зміщенням шарів у деяких місцях. Щоб запобігти цим проблемам, необхідно вжити такі заходи: затягнути регульовальні гвинти на шківів двигунів по осях X і Y, перевірити стрижні, чи є вони прямими чи ні. Також важливо протерти стрижні, очистити від сміття і змастити необхідні деталі, як зазначено вище. Крім того, проблеми з кінцевим вимиканням/зупинкою можуть бути пов'язані з проблемами платформи друкування. Якщо сопло спирається на один з країв, це означає, що вимикач не працює на осі X або Y.

## **Порушення потоку матеріалу для друкування**

Перед тим, як почати друкувати фізичну модель, слід перевірити катушку, чи достатньо матеріалу на ній. В іншому випадку недостатня кількість матеріалу може зіпсувати модель зупинкою екструзії в середині друкування, що може призвести до передрукування цілої деталі. Заблоковане сопло, заклинення філаменту, сплутана нитка, малий діаметр філаменту і розрізана нитка також є загальними проблемами. Для запобігання проблемам,

пов'язаним з філаментом, слід використовувати продукти високої якості і перевіряти котушку. Якщо нитка блокується головкою, то її можна почистити різними способами – підігрівання сопла і чищення дротом з меншим діаметром порівняно з соплом є найбільш поширеним методом. Проте слід дотримуватися безпеки через високу температуру сопла. Крім того, деякі інші методи можуть бути використані, наприклад, нагрівання сопла до високих температур у печі і вижарювання нитки в соплі, спроба проштовхнути нитку за допомогою іншого шматка нитки або витримка сопла в розчиннику, такому, як ацетон, також може бути способом очищення.

### **Відсутність або втрата адгезії на платформі друкування**

У деяких випадках шари не прив'язуються до платформи друкування, і через цю ситуацію може виникнути критична деформація, що призводить до руйнування фізичної моделі. Є кілька причин цієї проблеми: налагодження за рівнем платформи, відсутність калібрування, платформа з низьким нагріванням, нитка з низьким нагріванням і брудна платформа. Ці проблеми можна вирішити за допомогою таких методів: додавання текстур на платформу, настроювання відстані до платформи друкування, очищення платформи із застосуванням адгезиву і додаванням опор. Використання перфорованих платформ для друкування є хорошим рішенням. В іншому випадку можна нанести тонкий шар клею на друкувальну поверхню, який можна змити після друкування гарячою водою. Малярська стрічка також є одним з рішень при використанні PLA. Як зазначалося раніше, відстань сопла від платформи є важливою для адгезії першого шару, що потребує правильного налаштування.

### **Вібрація або удар**

Однією з найважливіших змінних, що впливають на якість друкування є вібрація. Причина вібрації або удару – це рухомі частини 3D-принтерів, особливо прискорення і ривок портального робота. Удар або вібрації можуть спричинити візуальні хвилі на поверхні друку. Щоб запобігти цьому явищу, 3D-принтер передусім має розташовуватися на міцній і рівній поверхні або спеціальному столі для установа машини. Причина вібрації може також виникати через погане технічне обслуговування і спрацювання лінійних підшипників. Отже, всі болти, шурупи, біти, шківні мають бути досить щільними, рейки – очищені від бруду, пилу і пуху, а стрижні – добре змащені, щоб запобігти зсуву портального робота. Якщо всі механічні заходи були прийняті, але все ж через вібрації на відбитку з'являються візуальні хвилі, швидкість друкування слід зменшити. Ця проблема дуже часто з'являється при експлуатації принтерів Боудена. Екструдери у принтерах Боудена набагато легші порівняно з екструдерами прямого типу. У типі Боудена екструдер

розташований ззаду принтера або близько до катушки і цей екструдер зафіксовано, він не переміщується як екструдери прямого типу. Тому це зменшує вагу рухомих частин, а також їх інерцію.

### **Неточні налаштування параметрів принтера**

Налаштування принтера дозволяють управляти багатьма змінними, такими, як товщина шару, кут опори, температура екструзії, температура платформи, швидкість друкування, коефіцієнт потоку екструдера, відстань між соплами, тип заповнення, щільність заповнення, поверхневі шари, опори, тип шва і швидкість вентилятора. Все це дуже важливі параметри для якості друкування і їх слід враховувати. Найбільш поширеною проблемою, пов'язаною з налаштуванням принтера, є проблема з філаментом. Цьому можна запобігти, очистивши сопло і збільшивши швидкість обертання вентилятора. Ці запобіжні заходи, що регулюють температуру плавлення нитки, можуть бути рішенням описаних проблем. Крім того, розмір отвору може бути занадто малим порівняно з відступом, у цьому випадку необхідно збільшити діаметр отвору на 0,3 мм. Вісячі пасма – також проблема з налаштування принтера, яку можна запобігти, збільшивши кут опори, швидкість обертання вентилятора і зменшивши товщину шару.

На додаток до технологічних проблем процеси АВ стикаються з безліччю викликів бізнес- і ринкового рівней. Наприклад, галузеві дизайнери ознайомлені з методами ТП, а деталі часто розробляються на основі цих процесів. Широке впровадження АВ потребує знань, навчання і підходів для пом'якшення бізнес-ризиків, пов'язаних з переходом до технологій, що швидко розвиваються.

### **Контрольні запитання**

1. Які обмеження є на геометрію виробів, що друкуються методом FDM, SLS або SLA?
2. Які технічні проблеми стоять нині перед розробниками адитивних технологій?
3. Назвіть проблеми, які з'являються при 3D-друку, та засоби боротьби з ними.



## 8 ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Розвиток інноваційних, передових методів АВ швидко прогресував в останні роки і розширився в широкому діапазоні промислових застосувань. У порівнянні зі звичайним виробництвом, АВ особливо підходить для виробництва невеликих обсягів продукції, особливо для деталей зі складною геометрією. Згідно зі звітом Wohlers за 2014 рік ринок АВ, що складався з усіх продуктів і послуг по всьому світу, зріс на 34,9 % порівняно з 2013 роком. На рисунку показано результати застосування АВ в широкому спектрі галузей, таких, як нафта і газ, спортивні товари, комерційні морські продукти, та інших галузях, які наведено в названих категоріях (рисунок 21).

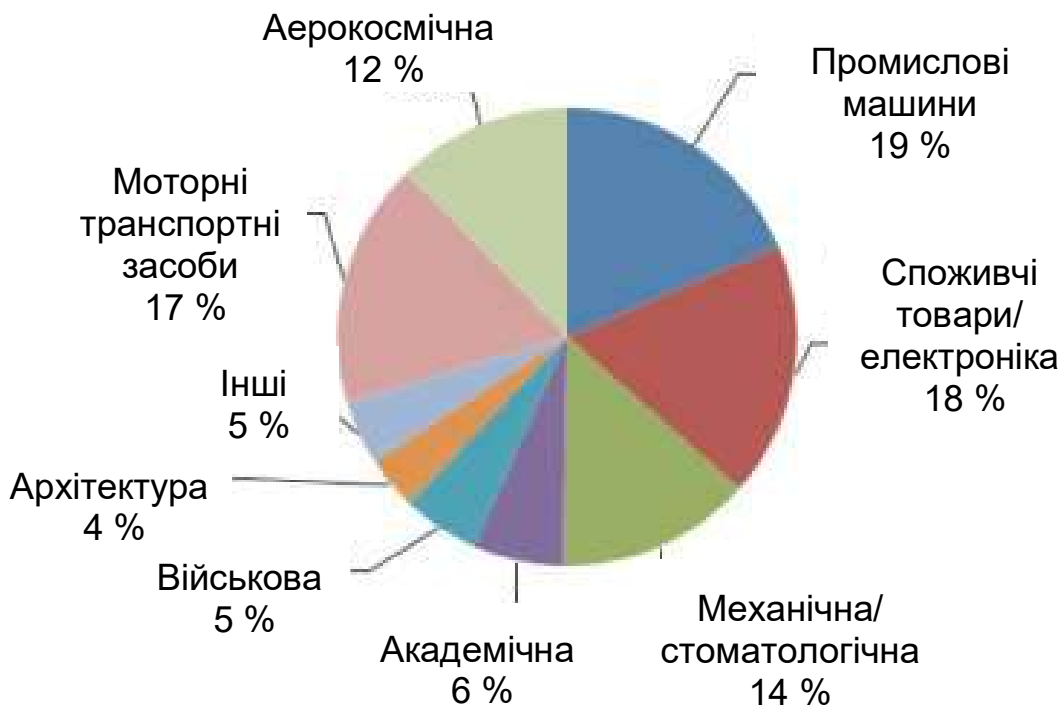


Рисунок 21 – Обсяги застосування АВ у різних галузях

### 8.1 Застосування в аерокосмічній та оборонній промисловості

Сьогодні близько 12 % всього ринку АВ (продукти і послуги АВ) припадає на аерокосмічну промисловість, як показано на рисунку 21, що відповідає приблизно 380 млн дол. США порівняно зі світовим обсягом ринку промисловості АВ (у 2013 році становив 706 млрд дол. США). Дослідження і розробки у сфері АВ спрямовані на постійне підвищення ефективності літальних апаратів (включаючи зниження ваги) і зниження забруднення

повітря і шуму. Для цих цілей потрібні легкі, міцні й електропровідні деталі. Крім того, більшість виробів геометрично складні і виробляються в невеликих кількостях з високими питомими витратами. Завдяки цим особливим характеристикам індустрія АВ особливо підходить для раннього прийняття зазначеної технології, і АВ вже почало проникнення на цей ринок. Наприклад, Boeing і Airbus вже використовують технології АВ, щоб зменшити час виробництва, для виготовлення більш легких деталей і зниження експлуатаційних витрат. Крім того, ряд менших компанії в ланцюжку поставок в аерокосмічній галузі почали розгортання АВ, що сприяє зниженню або навіть усуненню деяких інструментів, зварюванню, великої кількості інвентарю і цілих складальних ліній (рисунок 17).



Рисунок 22 – Користувачі АВ

Спеціаліст з ремонту поворотних і нерухомих крил Advanced Composite Structures (ACS) виробляє компоненти малого об'єму з використанням складових частини. Для цієї роботи потрібні інструменти для укладання, опрацювання, стрижні і напрямні. Коли вони обробляються на ЧПК, тоді ACS інвестує багато тисяч доларів і витрачає на це кілька місяців. І коли відбуваються змінення, зростають витрати і виникає затримка монтажу. ACS прийняв АВ як альтернативу більшості інструментів. У середньому

інструменти коштують лише 400 доларів і готові до використання через 24 години, а це означає, що змінення більше не є серйозною проблемою для фірми.

АВ підходить для пустотілих складових частин, таких, як капсула для віддалено пілотованого транспортного засобу. Укладання композитів навколо розчинного оснащення, отриманого за допомогою АВ, усуває проблему вилучення оснащення і скорочує час виробництва. Невеликі обсяги, структурна складність, абсолютна вимога до економії ваги і відсутність необхідності дотримання правил безпеки пасажирів сприяє розгортанню АВ для виготовлення безпілотних літальних апаратів. Такий виробничий підхід зменшує конструктивні обмеження, з якими стикаються інженери при використанні ТП виготовлення конструкцій. Конструкція крила може бути оптимізована для зменшення ваги при збереженні міцності. До крила включають «розумні частини», які є гібридами 3D-друкованих структур і 3D-друкованої електроніки. «Успіх цього крила показав, що 3D-друк можна використовувати для швидкого виготовлення структури невеликого літака», сказав Ден Кемпбелл, інженер – дослідник в «Аврорі», фірмі, що виготовляє безпілотники. «Якщо заміна крила необхідна, тоді ми просто натискаємо на друк, і протягом кількох днів у нас є нове крило, готове до польоту».

Boeing, наприклад, використовує 3D-друк при виробництві літаків для кількох авіакомпаній. Хоча основна конструкція літака залишається незмінною від одного замовлення до іншого, однак видозмінюються інтер'єри; і як результат, конкретний повітропровід може згинатися вправо, а не вгору. Таким чином, замовивши спеціальний пристрій за 40 000 доларів США, створений за рубежом для виготовлення тільки 25 таких частин, компанія має великі матеріальні та часові втрати. Boeing долає ці проблеми за допомогою 3D-друку цих запчастин і установленням їх безпосередньо на літак.

GE Aviation – ще одна компанія, яка використовує 3D-друк у своєму виробничому процесі. 3D-друк дозволив реалізувати зниження ваги (у зовнішній арматурі і виливках) більш ніж на 500 фунтів на двигун, що приводить до значного зменшення витрат палива для його клієнтів компанії. «Сучасні машини швидко знайдуть застосування в інструментах і пристроях, замінять деталі з довгим циклом виготовлення в найближчому майбутньому», – говорить Доктор Тодд Рокстро, інженер-консультант GE Aviation.

Для аерокосмічної галузі наявність легких, вогнестійких і хімічно стійких матеріалів для 3D-друку є ключем до розширення застосування АВ. Зносостійкі матеріали, що витримують екстремальні температури і гравітаційні сили, також збільшують діапазон застосування АВ.

3D-друк став інструментом для проектування, випробувань, виробництва оснастки і виготовлення наземних систем підтримки та ремонту авіаційно-космічної техніки. 3D-друк дозволяє маленьким компаніям конкурувати з промисловими гігантами за рахунок гнучкості виробництва. Це дає можливість компаніям прискорити час виходу на ринок, поліпшити якість їх конструкцій і зробити виробництво економічно вигідним. 3D-друк необхідний для того, щоб залишатися конкурентоспроможними в цьому мінливому світі.

Поточні та потенційні застосування 3D-друку в аерокосмічній галузі подано в таблиці 9.

Таблиця 9 – Поточне та потенційне застосування 3D-друку в аерокосмічній галузі

| Галузі                        | Поточне застосування  | Потенційне застосування  |
|-------------------------------|---|--|
| Комерційні і військові літаки | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Моделювання концепцій та створення прототипів;</li> <li>– друкування малооб'ємних складних частин;</li> <li>– друкування деталей для замінення при ремонті</li> </ul>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Впровадження електроніки прямо в конструкцію;</li> <li>– друкування крила літака;</li> <li>– друкування складних частин двигуна;</li> <li>– друкування деталей для ремонту на полі бою</li> </ul> |
| Космос                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Друкування спеціальних частин для космічного застосування;</li> <li>– друкування конструкцій з легких і міцних матеріалів;</li> <li>– друкування деталей з мінімальними відходами матеріалу</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Друкування деталей на вимогу або ремонт у космосі;</li> <li>– друкування великих конструкцій у космосі (таким чином не враховуючи обмеження розмірів ракет-носіїв)</li> </ul>                     |

3D-друк використовують в аерокосмічній галузі протягом 20 років, він добре зарекомендував себе для прототипування і на етапі тестування. Крім дизайну і прототипів існує багато можливостей використання АВ для виготовлення оснащення і пристроїв.

Наприклад, такі деталі вже виготовлено з використанням адитивних технологій:

- конструктивні елементи для безпілотних літальних апаратів Saab Avitronics;
- спеціалізовані монтажні інструменти для збирання;
- індивідуальні інтер'єри бізнес-джетів і вертольотів;
- фізичні 3D-макети від Boeing;
- турбінні лопатки – наприклад, інженери General Electric (GE) починають освоювати виробництво мультифункціональних лопаток, щоб один кінець був оптимізований за міцністю, а інший – за термостійкістю;
- обігрівачі лобового скла від AdvaTech Manufacturing;
- паливні форсунки для газових турбін GE;
- спроектовані термопластичні повітроводи від Structural Integrity Engineering, Inc.

Крім того, технології АВ використовують для ремонту і відновлення зношених деталей, таких, як турбіна, наконечники лопатей і секції ущільнення двигуна (наприклад, Rolls Royce). GE виробляє від 40000 до 80000 нових високопродуктивних турбінних наконечників високого тиску на рік з використанням адитивних технологій з 1990 р.

Інші тенденції, що мають відношення до індустрії АВ, такі:

- збільшення використання легких конструкцій;
- впровадження інноваційних та ергономічних функцій в конструкції для підвищення міцності компонентів;
- друкована безпосередньо на деталь електроніка;
- підвищення індивідуальності дизайну й індивідуалізація інтер'єру літака;
- інтенсивні дослідження з погляду розроблення нових матеріалів і особливостей диференціації (наприклад, індивідуальне планування салона);
- застосування АВ технологій для оснащення і кріплення;
- адаптивні форми, особливо адаптивне крило.

Зниження ваги є особливо актуальним для аерокосмічних компонентів, які мають тривалий термін служби і де зниження маси може привести до ефективної економії енергії. АВ дозволяє створювати структури з розумною вагою за допомогою топологічної оптимізації. Так, наприклад, замінення традиційного замка (рисунок 23) на ремені безпеки у літаку на оптимізований зменшить його масу на 55 % при використанні титану.



Рисунок 23 – Різні форми замка: а – традиційна форма замка; б – оптимізована форма замка

Для літака Airbus 380 з кількістю 853 міст це дасть загальне зменшення маси обладнання літака на 72,5 кг, тоді за час свого життя (30 років) літак, що літає на короткі дистанції, зможе заощадити 4 мільйони літрів палива або приблизно 2,3 мільйона доларів з умови витрати 19,2 літра за 1 кг на 1 км.

Інший приклад, який також показує, як аерокосмічні компоненти, виготовлені за допомогою процесів АВ, енергетично впливають на затрати експлуатації протягом багатьох років. Елемент, показаний на рисунку 24, являє собою аерокосмічний кронштейн, який використовується в літаках для кріплення конструкцій в кухнях, туалетах і камбузах.

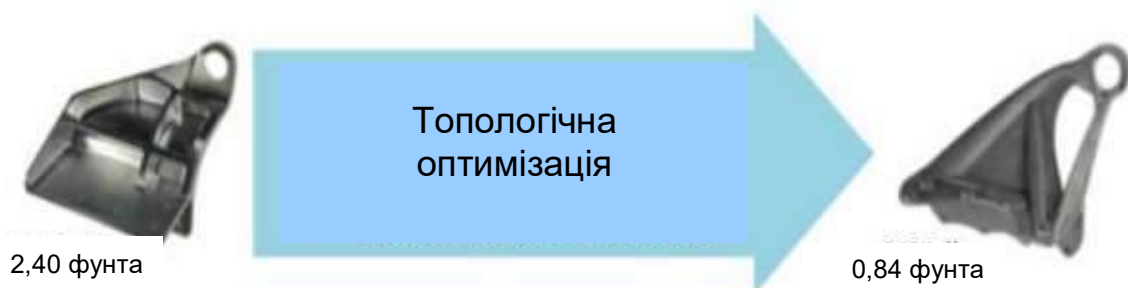


Рисунок 24 – Кронштейн, що використовується в літаках

Цей кронштейн зазвичай виготовляють за допомогою звичайної фрезерної обробки. Процес з дуже високим відношенням «від купівлі до польоту» (8:1). Аналогічний кронштейн (кронштейн з тією ж функціональністю, але з топологічно оптимізованою геометрією) можна отримати за допомогою процесу електронно-променевого плавлення зі значно нижчим співвідношенням «від купівлі до польоту» (1,5:1). Оптимізована конструкція дозволяє отримати кронштейн на 65 % легше, при цьому відбуваються економія матеріалів і, як наслідок, економія енергії на етапі використання. АВ може також зменшити енергію споживання на 66 % на етапі експлуатації. Витрати на перевезення і використання є функцією від того, які етапи

продукція пройшла в ланцюжку поставок, які види транспорту, використовуються для її переміщення.

## 8.2 Автомобільна промисловість

Автомобільна промисловість є великим користувачем обладнання для швидкого створення прототипів. Технології АВ знаходяться на стадії розроблення і застосовуються для функціональних прототипів дрібних і складних деталей для розкішних і антикварних автомобілів. Індустрія використовує технологію АВ як важливий інструмент при проектуванні і розробленні автомобільних компонентів, оскільки це може скоротити цикл проектування і знизити витрати на виробництво і продукцію. АВ використовують в автомобільній промисловості для самих різних застосувань. Наприклад, концептуальне моделювання, функціональне тестування, швидке виробництво та планування виробництва.

Сектор автомобільного спорту є важливою областю для застосування технологій АВ, оскільки у цьому секторі висока продуктивність і мала вага відіграють центральну роль. В автомобільній промисловості зростає конкуренція, що підсилює тиск для скорочення часу виходу на ринок. Це кидає виклик автомобільній промисловості, щоб забезпечити і надалі розширювати ринок передових виробничих технологій, у тому числі технологій АВ.

У 2013 році частка автомобільної промисловості в загальному обсязі ринку АВ становила 17,3 %, що відповідає приблизно 530 мільйонам доларів США. Таким чином, автомобільна промисловість є одним з основних користувачів АВ. У той же час АВ використовується тільки для створення прототипів і безпосереднього виготовлення невеликих, складних і таких, що не належать до безпеки, компонентів і в невеликих серіях, оскільки надійність процесу і узгодженість продуктів, як і раніше, обмежені. Окрім того, багато частин занадто великі, щоб їх можна було виготовити в більшості доступних на даний момент принтерах АВ.

Деякі приклади застосування АВ:

- друкування конструкцій для перевірки правильності і комплектності деталей компаніями BMW, Caterpillar, Mitsubishi;
- деталі для гоночних транспортних засобів (наприклад, аеродинамічні кожухи, повітроводи охолодження, електричні коробки);
- прототипування або передсерійні компоненти для розкішних спортивних автомобілів (наприклад, впускні колектори та головки циліндрів від Lamborghini);

- замінення серійних деталей, які несправні і/або недоступні (наприклад, закрилки від Lamborghini);
- складальні пристрої для серійного виробництва BMW і Jaguar19;
- концептуальні моделі та функціональні прототипи двигунів Ducati від Stratasys, Ltd;

Подальші тенденції в автомобільній промисловості такі:

- більш високий попит на легкі конструкції;
- зростання попиту на запасні частини для старовинних автомобілів;
- зростаюче в усьому світі прагнення до індивідуальної мобільності;
- електрифікація силової передачі;
- підвищена увага до стійкої мобільності;
- підвищення важливості індивідуальних потреб клієнтів;
- більш висока щільність трафіку виробництва.

Автомобілі є хорошою платформою для тестування нових процесів АВ. На рисунку 25 показано тривимірну друквану копію Shelby Cobra, випробувальний стенд наступного покоління автомобіля, оснований на класичному американському дизайні.



Рисунок 25 – Етапи процесу створення автомобіля Shelby Cobra за допомогою АВ



Дослідники надрукували Shelby Cobra у виробничому демонстраційному центрі (MDF) Міністерства енергетики США в ORNL з використанням принтерів ВААМ, виробництва компанії Cincinnati Incorporated, які виготовляють міцні, легкі композитні деталі без використання інструментів. Ці велетні друкують вироби розміром до 6х2,3х1,9 метра, зазвичай використовуючи ABS-пластик, армований вуглецевим волокном (80 % ABS і 20 % вуглецевого волокна). Про філамент тут не може бути й мови, оскільки у цьому випадку друкування відбувалось би занадто довго, а вартість виробів була б вкрай високою. Саме тому розробники вирішили перейти з прутка на гранулят, видавлюючи розплавлений полімер через сопло шнековим екструдером. Додатковий плюс такої схеми полягає в зниженні собівартості, адже гранулят – це сировина для виготовлення філаментів, тобто в кілька разів дешевше самого доступного філамента. Цей проект також показав, що АВ дозволяє інтегрувати передові технології завдяки гнучкому і модульному дизайну, забезпечуючи платформу для швидкого розроблення та оцінювання виготовленої конструкції. Друкарська машина містить компоненти «увімкни і працюй», такі, як новий двигун, акумуляторні батареї і технології паливних елементів; конструкції гібридних систем; силова електроніка і системи бездротової зарядки, дозволяючи дослідникам легко і швидко перевірити інноваційні ідеї.

На рисунку 26 показано приклад корпусу дизельного насоса Delphi, виготовленого з використанням селективного лазерного плавлення (SLM).



Рисунок 26 – Надрукований дизельний насос Delphi

Delphi є постачальником автомобілів першого рівня і нині використовує SLM деталі замість традиційних алюмінієвих ливарних форм для

виготовлення дизельних насосів. Процес SLM дозволив Delphi зробити насос як єдине ціле, одночасно уникаючи ряду операцій, таких, як свердління, механічна обробка і хімічне видалення задирок, які знизили загальні виробничі витрати і створили кінцевий продукт, який менш схильний до витоків палива. Економія витрат у першу чергу є результатом зменшення матеріалу і кінцевої ваги деталі при використанні адитивного процесу.

### **8.3 Додатки для електронної індустрії**

Додатки електронної промисловості варіюються від мобільних телефонів і комп'ютерів для автомобілів.

На цьому тлі інтеграція функцій у структуру набуває все більшого значення. Адитивні технології підходять для задоволення цих вимог шляхом вбудовування електронних схем у різні геометрії. Потенціал застосування технологій АВ зростає у виробництві електроніки, оскільки поєднання полімерів, металевих матеріалів і чорнил вже досягли ринку. АВ використовують для таких продуктів, як:

- вбудовування пристроїв радіочастотної ідентифікації (RFID) у тверді металеві предмети;
- тривимірні мікроелектромеханічні системи на основі полімерів (MEMS);
- мікрохвильові схеми на паперових підкладках;
- всі види захоплень в автоматизованих виробничих системах.

Загальний обсяг світового ринку електроніки в 2013 році становив 5 трильйонів доларів США. У 2013 році частка електронної промисловості в загальному обсязі ринку АВ становила 18 %. Це відповідає приблизно 553 мільйонам доларів США.

Тенденції електронної промисловості такі:

- зростання попиту на прискорене розроблення продукту, що потребує більш коротких термінів для інструментів;
- зростання попиту на вбудовану електроніку;
- мініатюризація і функціональна інтеграція пристроїв;
- зростання попиту на інтелектуальні мікросистеми;
- розвиток ринку полімерної електроніки.

### **8.4 Інструментальна та прес-індустрія**

Інструменти містять прес-форми, штампи та пристрої. Інструменти від ранніх стадій до повномасштабного виробництва є капіталомісткою і

наукоємною галуззю. Аеронавтика, автомобільна техніка, електроніка та товари для домашнього вжитку є деякими продуктами, де оснащення є важливою частиною дизайну і виробничого процесу. Оснащення має вирішальне значення для конкурентоспроможності, ефективності та надійності системи виробництва, оскільки вона пов'язує кінцеві деталі (продукти і компоненти) і виробниче обладнання (верстати).

На сьогодні розроблення і виготовлення оснащення можуть бути одними з найдорожчих і трудомістких кроків у багатьох виробничих процесах. В основному це пов'язано зі складною геометрією кінцевих деталей, які потребують високої точності і надійності, низької шорсткості поверхні і зазнають сильних механічних навантажень. Крім того, пристрої значно залежать від їх передбачуваного застосування, оскільки різні додатки потребують різних матеріалів, обсягу, розмірів і т. п.

АВ може зробити свій вклад різними способами в інструментальну промисловість: з одного боку, АВ може застосовуватися для виробництва оснащення, з іншого – використання АВ у виробництві може функціонувати як замітник інструменту. Обидві можливості можуть дати численні переваги порівняно з традиційними технологіями.

АВ може оптимізувати і поліпшити виробничі процеси, наприклад у виробництві каналів охолодження в інструменті. Використовуючи традиційні методи, канали необхідно просвердлити в інструменті, цей процес створює концентрації напружень. Цьому негативному ефекту може протистояти АВ. Тому за технологіями АВ можна виробляти оснащення з інтегрованими каналами охолодження за один етап і в більш короткі строки. Таким чином, час виходу на ринок і цикл розроблення продукту може бути скорочено.

Американська промисловість з виробництва інструментів, штампів і промислових форм включає близько 6300 малих і середніх підприємств, які виробляють продукцію за індивідуальним замовленням для верстатів та іншого виробничого обладнання. У 2013 році загальний обсяг становив близько 798 мільйонів доларів США (близько 26 % всього ринку АВ). Незважаючи на серйозну конкуренцію в інструментальній промисловості щодо традиційних технологій, АВ вже набув значного поширення в інструментальній промисловості, що відбивається у позитивному розвитку ринку. Завдяки поліпшеному різноманіттю і довговічності матеріалу FDM-технологія може застосовуватися для виробництва деталей, які потребують міцності й довговічності. Наведемо список додаткового використання АВ:

- універсальні тримачі інструментів зі стандартними розмірами карманів для литих вставок;
- форми для лиття під тиском;

- інструмент для лиття під тиском;
- шаблони для лиття за виплавлюваними моделями;
- пристрої для оснащення;
- інструменти для прототипування хірургічних пристроїв.

### 8.5 Чотиривимірний (4D) друк за допомогою полімерного композиційного філамента

Додавання волокна в 3D-друковані полімери не тільки покращують механічні властивості конструкції. Волокна, а також інші добавки можна використовувати у виробництві інтелектуальних композитів для контролю трансформації форми. Ця можливість 3D-друку називається 4D-друком (рисунок 27).

4D-друк належить до багатокомпонентного друкування з можливістю трансформації з плином часу або зміненням його форми після друкування. Ці структури можуть бути програмованими і трансформуватися з одно- або двомірних структур у тривимірні об'єкти. Останні досягнення в АВ дозволяють розміщувати матеріал в мікромасштабі при 3D-друку складних конструкцій. Така трансформація форми надрукованого матеріалу можлива завдяки реалізації попередньо розрахованого і спроектованого матеріалу в АВ для того, щоб контролювати форму матеріалу після друкування. Ці матеріали можуть змінювати свою форму при освітленні, охолодженні чи нагріванні або зануренні у розчинник.

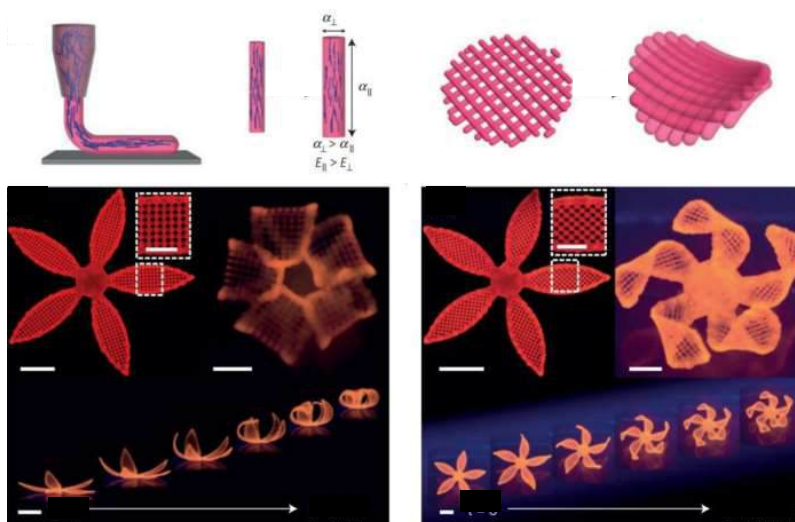


Рисунок 27 – Етапи створення полімерного композиційного 4D-виробу

### **Контрольні запитання**

1. Назвіть на теперішній час основні галузі застосування 3D-друку для виготовлення конструкцій.
2. За яких умов виготовлення виробу за допомогою 3D-друку стає економічно вигідніше, ніж традиційними методами?
3. Назвіть перспективи застосування 3D-друку для авіаційної та космічної індустрії.
4. Назвіть перспективи застосування 3D-друку для автомобільної індустрії.
5. Що таке 4D-друк? Яким чином він забезпечується?

## 9 ТЕОРІЯ АРМУВАННЯ ПОЛІМЕРУ КОРОТКИМ ВОЛОКНОМ

У зв'язку з поширенням уведення домішок у полімер для поліпшення його властивостей необхідно уміти визначати кількість додавання матеріалу у полімер для отримання необхідних характеристик матеріалу 3D-друкованого виробу. Існує кілька теорій прогнозування властивостей композитів, армованих короткими волокнами або добавками. Правило модифікованого змішування (MROM) є найпростішим методом для прогнозування властивостей при розтягуванні композитів, армованих короткими волокнами або частинками, і припускає ідеальне міжфазне з'єднання волокна/частинок та полімеру/матриці.

Границю міцності на розтягування визначають як

$$\sigma_{cu} = \chi_1 \chi_2 V_f \sigma_{fu} + V_m \sigma_m,$$

де  $\chi_1, \chi_2$  – фактори ефективності волокна для композитної міцності, які враховують орієнтацію і довжину волокна;

$\sigma_{cu}$  і  $\sigma_{fu}$  – границя міцності композита і волокна;

$V_f$  і  $V_m$  – об'ємна частка волокна і матриці;

$\sigma_m$  – границя міцності матриці в композиті.

Якщо довжина волокна дорівнює  $L$  і орієнтація волокна постійна, то коефіцієнт орієнтації волокна дорівнює одиниці, а коефіцієнт довжини волокна визначається як

$$\chi_2 = \frac{L}{2L_c}, L < L_c,$$

або

$$\chi_2 = 1 - L/2L_c, L \geq L_c,$$

де  $L_c$  – критична довжина волокна, що визначається формулою

$$L_c = r_f \sigma_{cu} / \tau_i;$$

$r_f$  – радіус волокна/частинки;

$\tau_i$  – клейова міцність на зсув між матрицею і волокном.

Для того щоб розглянути вплив орієнтації волокна і неоднорідність довжини волокна в моделі, коефіцієнти  $\chi_1$  і  $\chi_2$  мають бути змінені. Модифікована модель Келлі і Тайсона запропонована для волокон коротше або довше критичної довжини волокна з урахуванням орієнтації волокна, у такому випадку міцність на розтягування полімеру, армованого домішками, визначають так:

$$\sigma_{cu} = \chi_1 \left[ \sum_{L_i=L_{min}}^{L_c} \frac{V_i \sigma_{fu} L_i}{2L_c} + \sum_{L_i=L_c}^{L_{max}} V_i \sigma_{fu} \left(1 - \frac{L_c}{2L_i}\right) \right] + V_m \sigma_m.$$

Проте, коефіцієнт орієнтації волокна  $\chi_1$  у цій моделі встановлюють емпірично через функції щільності ймовірності для моделювання розподілу довжини волокна і орієнтацію волокна або береться таким, що дорівнює одиниці, якщо орієнтація волокна постійна.

Існують різні теорії для прогнозування властивостей жорсткості коротко волокнистих композитів. Хелпін і Цай розробили відому теорію односпрямованих композитів з короткими волокнами, в якій модуль пружності композита  $E$  у загальному вигляді визначається за допомогою формули

$$\frac{E}{E_m} = \frac{1 + \zeta \eta V_f}{1 - \eta V_f},$$

де  $E$  і  $E_m$  – модуль Юнга композита і матриці відповідно;

$\zeta$  – параметр форми, що залежать від геометрії волокна і напрямку прикладання навантаження;

$\eta$  – коефіцієнт, що визначається як

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} - \zeta},$$

де  $E_f$  – модуль пружності волокна або матеріалу домішки.

Теоретично вищезазначені рівняння для композитів з короткими волокнами або частинками можна використовувати для моделювання тривимірних друкованих деталей, однак довжина і орієнтація волокон/частинок, які використовуються під час виготовлення матеріалу для 3D-друку, має відповідати припущенням. За допомогою цих аналітичних методів можна змоделювати FDM, SLS і екструзію з армуванням короткими волокнами або частинками. Проте 3D-друковані вироби часто містять значну частку порожнеч і це необхідно враховувати при застосуванні цих методів у АВ. Для однорідного полімеру, витиснутому при 3D-друці, порожнечі можуть враховуватися як

$$E_1 = (1 - \rho_1)E ; \quad E_2 = (1 - \rho_1^{0.5})E;$$

$$G_{12} = G \frac{(1 - \rho_1)(1 - \rho_1^{0.5})}{(1 - \rho_1) + (1 - \rho_1^{0.5})};$$

$$\nu_{12} = (1 - \rho_1)\nu ; \quad \nu_{21} = (1 - \rho_1^{0.5})\nu,$$

де  $E$ ,  $G$  і  $\nu$  – модуль пружності, модуль зсуву і коефіцієнт Пуассона армованого філамента, який використовується в процесі FDM відповідно;

$\rho_1$  – площа пустот у площині, нормальній до напрямку укладання філаментів.

Детальніше про порожнини у композитних конструкціях можна ознайомитися в [Barbero E.J. Introduction to composite materials design. CRC Press; 2010].

Друковані конструкції мають неоднорідні властивості, але є ортотропним матеріалом по товщині, що дозволяє застосувати класичну теорію шаруватих композитних конструкцій для визначення властивостей друкованої конструкції в цілому. При цьому матриця жорсткості кожного шару буде визначатися як

$$Q_{ij} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix},$$

де

$$Q_{11} = \frac{E_{11}^2}{E_{11} - \nu_{12}^2 E_{22}}; \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12} E_{11} E_{22}}{E_{11} - \nu_{12}^2 E_{22}}.$$

$$Q_{22} = \frac{E_{11} E_{22}}{E_{11} - \nu_{12}^2 E_{22}}; \quad Q_{66} = G_{12}.$$

Перетворена матриця жорсткості для різної орієнтації волокна може бути обчислена з використанням матриці повороту в такий спосіб

$$\bar{Q}_{ij} = T^{-1} Q_{ij} T,$$

де

$$T = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}.$$

Тут  $m, n$  – коефіцієнти, що обчислюють за такими формулами:

$$m = \cos \phi, \quad n = \sin \phi,$$

де  $\phi$  – кут армування волокна.

Тоді матриці жорсткості площини, сполучення і вигину можуть бути отримані відповідним чином:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n \bar{Q}_k (z_k - z_{k-1});$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \bar{Q}_k (z_k^2 - z_{k-1}^2);$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \bar{Q}_k (z_k^3 - z_{k-1}^3),$$



де  $z$  – вертикальне положення шару від середньої площини по товщині зразка.

Нарешті, можна написати зв'язок між прикладеними навантаженнями і пов'язаними деформаціями у шаруватому композиційному матеріалі, таким чином,

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{Bmatrix};$$
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}.$$

Більше інформації про визначення пружних характеристик для шаруватого композиційного матеріалу можна знайти в методичних роботах кафедри композиційних конструкцій Національного аерокосмічного університету «ХАІ».

### Контрольні запитання

1. Який метод застосовують для визначення властивостей композитів, армованих короткими волокнами або добавками?
2. Як теоретично можна визначати пружні властивості друкованої конструкції?
3. Як при розрахунку властивостей філамента можна врахувати дефекти його структури?

## 10 ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБУ

Як уже зазначалося, значного поширення на сьогодні набувають такі методи оптимізації, як топологічна оптимізація і біонічний дизайн. Ці методи є досить перспективними, хоч і далекими від досконалості.

Як впливає з проведеного аналізу літературних джерел, застосування алгоритмів топологічної оптимізації спільно з методом скінченних елементів дозволяє отримувати більш раціональні конструкції (щодо цільової функції) порівняно з традиційними підходами до проектування за наявних обмежень.

Дуже часто в результаті використання зазначених вище методів можна отримати складні геометричні обриси деталей з великою кількістю внутрішніх стрижнів, розкосів, порожнин і т. п. (рисунок 28).



Рисунок 28 – Деталь, отримана шляхом топологічної оптимізації

Такий виріб найпростіше виготовити шляхом тривимірного друкування плавкими матеріалами, але з погляду друкування безперервно армованих композитів, то навряд чи вдасться реалізувати переваги односпрямованих композитів для наведеної деталі. Що стосується авіаційних балкових конструкцій (балки підлоги, шпангоути, нервюри), то в результаті їх оптимізації можна отримувати аналоги плоских фермових конструкцій, які можна виготовити пропонуваним способом (рисунок 29).



Рисунок 29 – Приклади нервюри, які реалізовано у вигляді плоских фермових конструкцій

Розглянемо приклад топологічної оптимізації нервюри. Процес реалізовано за допомогою програмного продукту SimuliaAbaqus.

Для початку розрахунку необхідно завантажити модель. Ця модель являє собою область, в якій буде відбуватися видалення матеріалу. Потім задають умови закріплення та навантаження (рисунок 30).

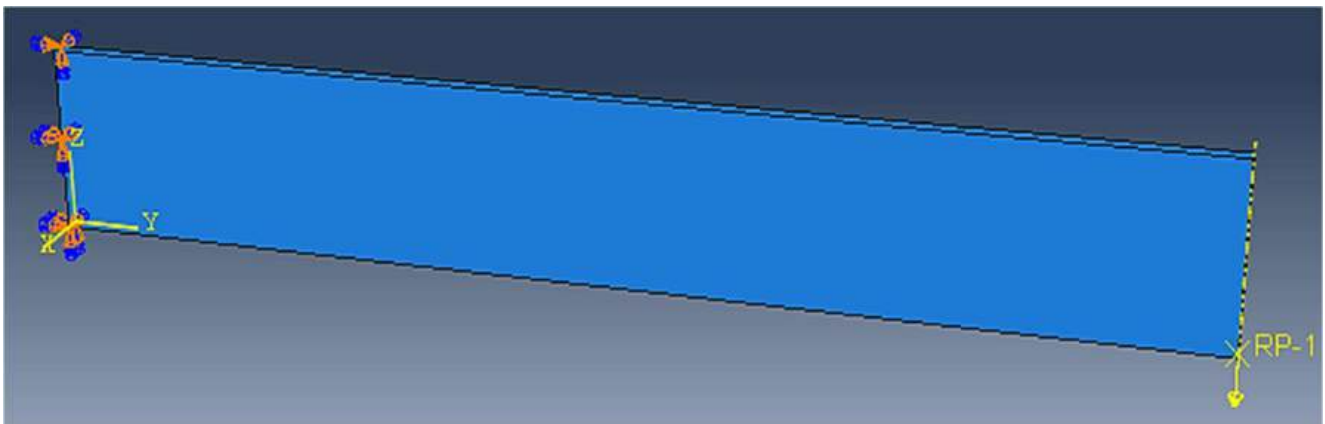


Рисунок 30 – Базова модель, її закріплення та навантаження

Після цього модель поділяють на сітку скінченних елементів. Для початку, щоб скоротити час розрахунку, візьмемо розмір елемента, який дорівнює ширині моделі. Потім проводимо статичний розрахунок (рисунок 31), на підставі якого буде відбуватися оптимізація. Таким чином, можна

переконатись у коректності задання граничних умов, перерізів і характеристик матеріалу.

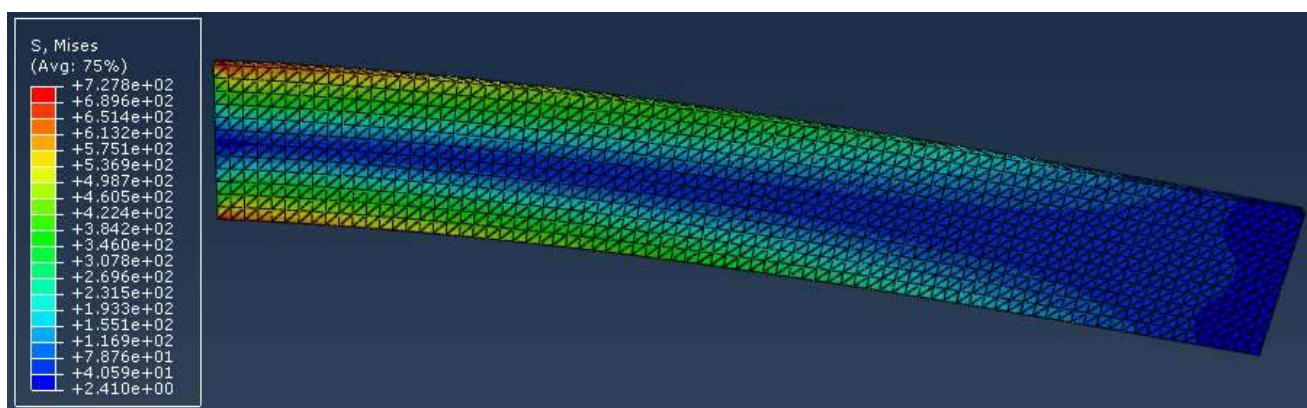
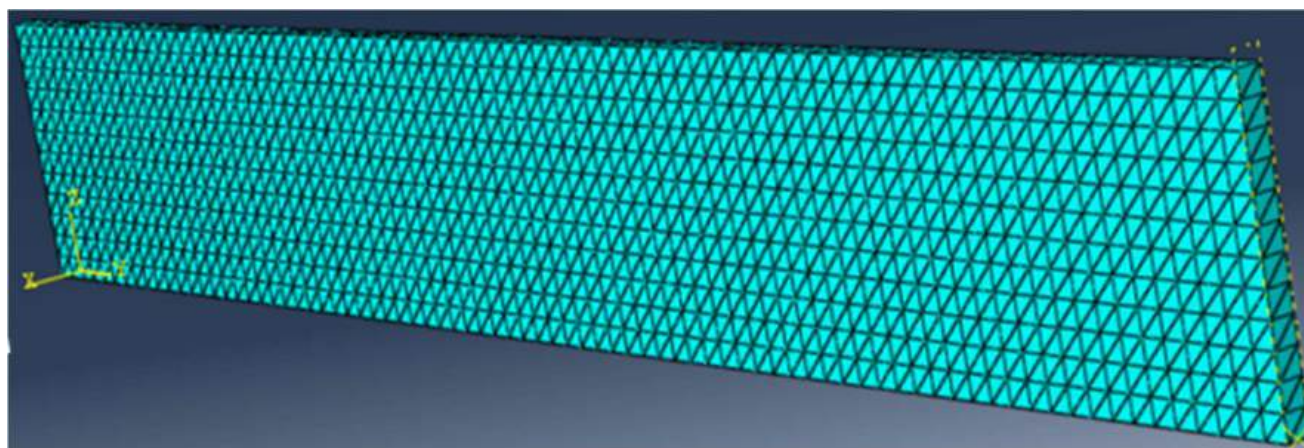


Рисунок 31 – Результат поділу моделі на скінченні елементи і проведення статичного розрахунку

Далі необхідно створити кейс для оптимізації (рисунок 32):

1. Визначення типу оптимізації.
  2. Задання проектних параметрів (наприклад, енергія деформації або обсяг матеріалу).
  3. Визначення цільової функції (в прикладі це мінімізація енергії деформації, тобто максимальна жорсткість конструкції).
  4. Накладення обмежень (у прикладі прийнято обмеження за обсягом матеріалу, що залишився, – до 20 % включно від початкового).
- Команди показано на рисунку 32. Вони розташовані у розділі «Optimization».

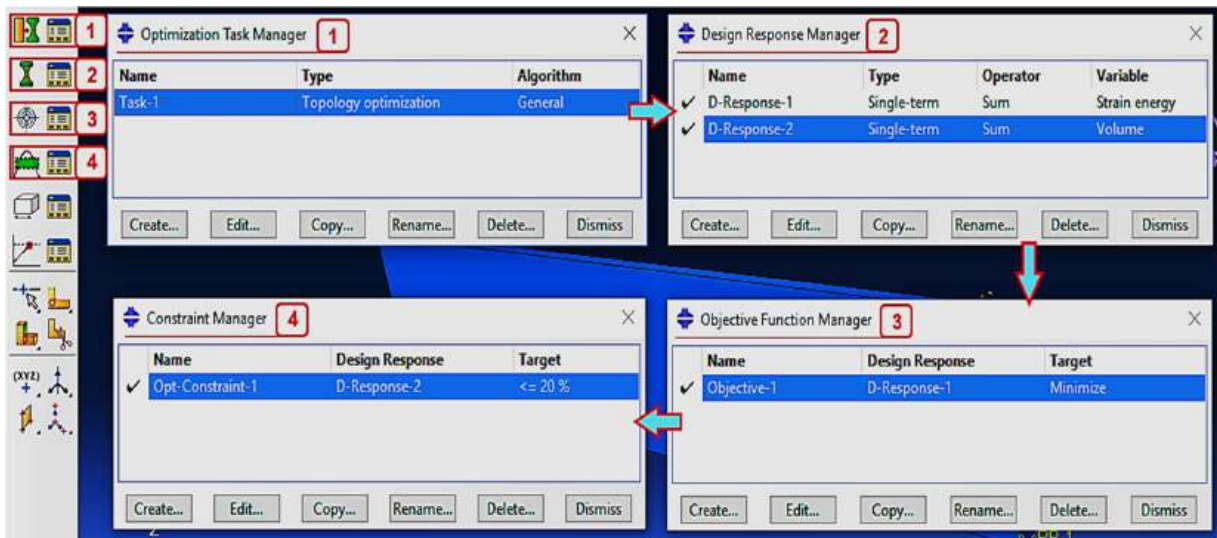


Рисунок 32 – Налаштування умов оптимізації

Далі створюється безпосередньо завдання оптимізації з обмеженням числа ітерацій (рядок «Cycles»), при досягненні якого ітераційний розрахунок буде зупинений незалежно від отриманого результату. цей параметр дозволяє обмежити час на проведення розрахунку (рисунок 33). Після цього необхідно запустити обчислювальний процес.

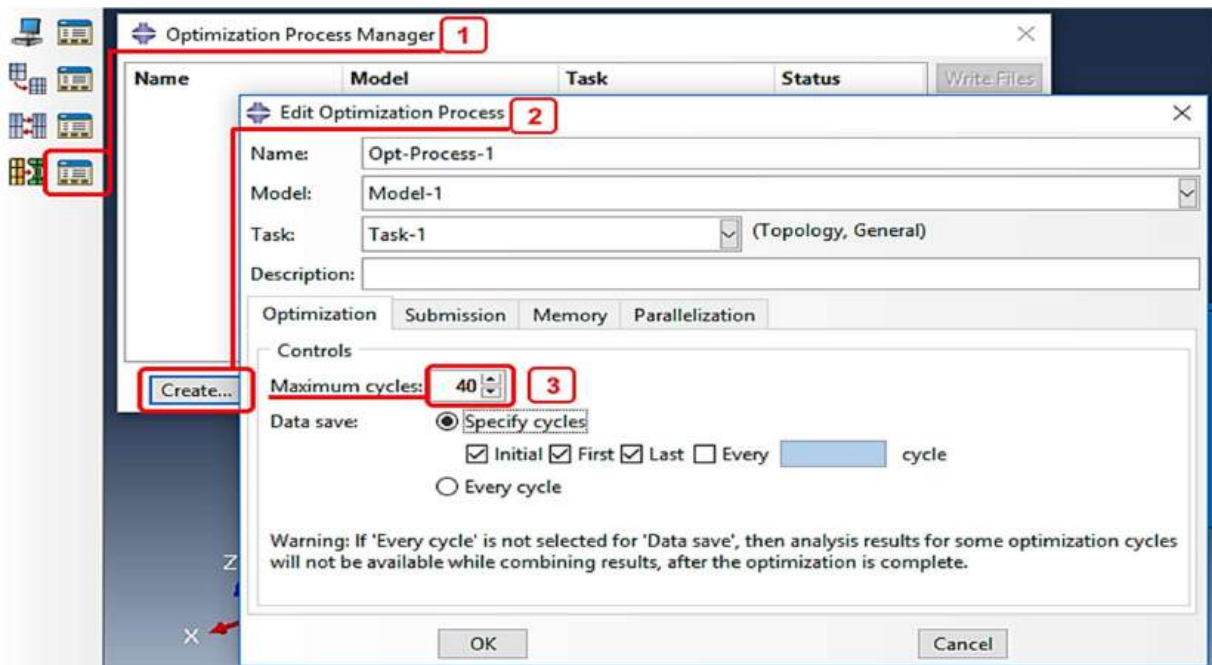


Рисунок 33 – Створення завдання для оптимізації та обмеження кількості ітерацій

Час розрахунку залежить від багатьох факторів. Зокрема, це габарити деталі, спосіб прикладання навантаження і задання умов закріплення, кількості циклів оптимізації, наявність однієї або декількох деталей і спосіб задання зв'язку між ними тощо, але найбільший вплив на тривалість обчислень має розмір сітки скінченних елементів, а також безпосередньо потужність обчислювальної техніки, за допомогою якої і ведеться проектування. При зазначених вище параметрах на наявному комп'ютері час обчислення становив 2,5 години. По закінченню обчислень було отримано результат, поданий на рисунку 34.

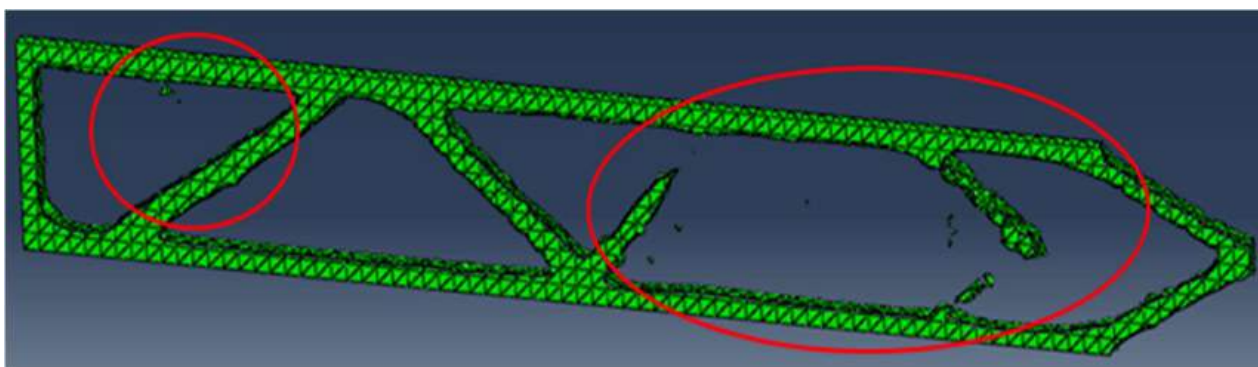


Рисунок 34 – Результат розрахунку при ліміті у 20 % залишку матеріалу

На рисунку 35 подано графік процесу обчислень (позначено червоним кольором), які були вилучені з огляду на обмеження. Верхня крива (синій колір) описує змінення обсягу матеріалу в кожному циклі (номер ітерації по осі абсцис), а нижня (червоний колір) – енергію деформації від того ж параметра.

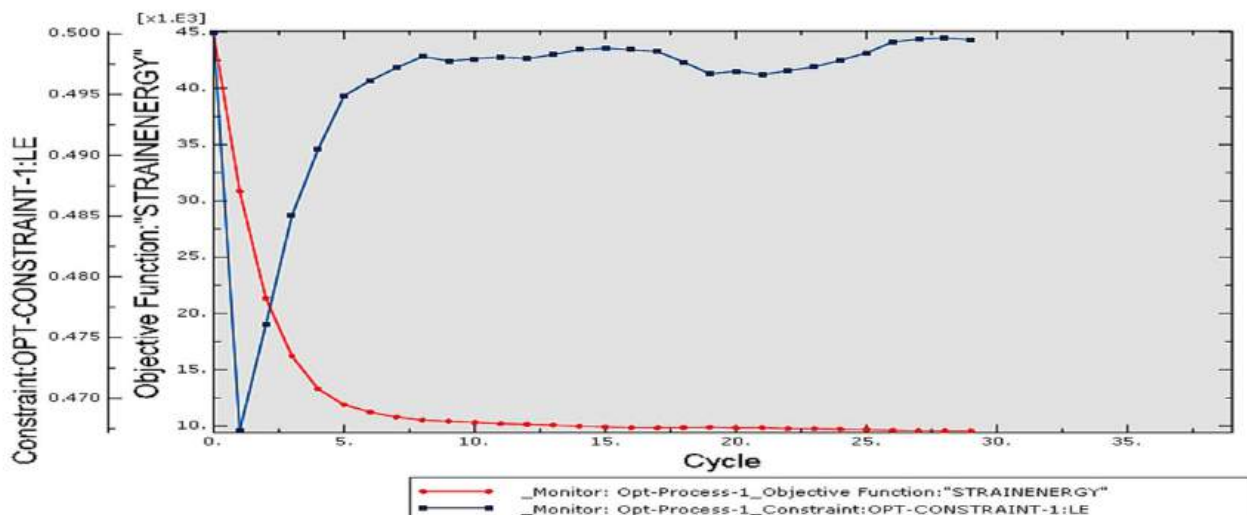


Рисунок 35 – Графік процесу розрахунку для твердотільної моделі

З урахуванням наведеного результату можна зробити висновок про те, що обмеження у 20 % за обсягом залишкового матеріалу було надто «жорстким», оскільки на моделі виявилися відсутні області (на рисунку 34 позначено червоною лінією), які були вилучені з огляду на обмеження.

Це означає, що необхідно скоригувати обмеження, збільшивши допустимий обсяг матеріалу. Для обмеження в 50 % всього матеріалу отримаємо деталь, показану на рисунку 36.

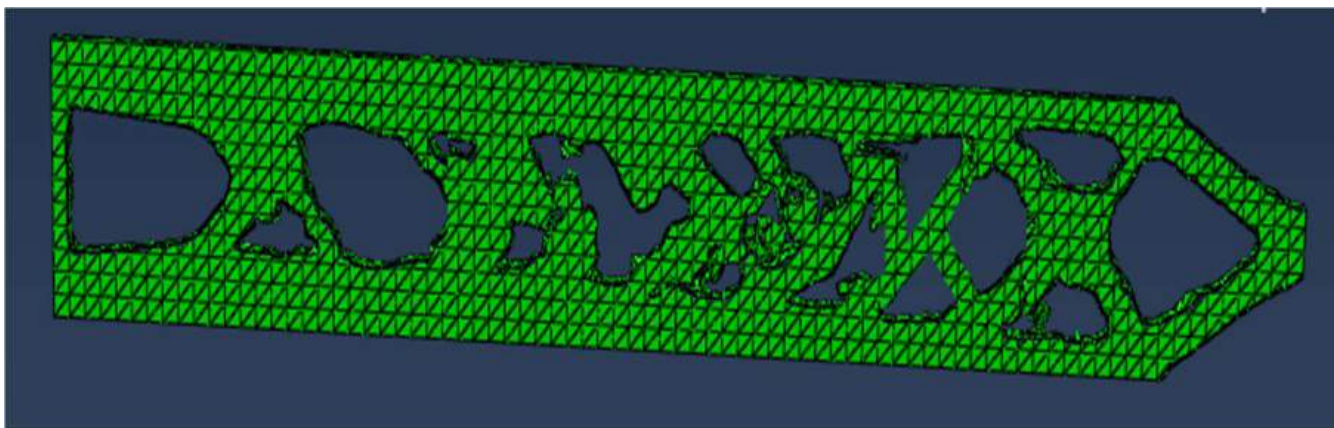


Рисунок 36 – Результат розрахунку моделі при ліміті матеріалу 50 %

З отриманого результату видно, що є переобтяження конструкції. Це означає, що слід знову змінити допустиму кількість матеріалу і повторити обчислення.

Цей розрахунок був виконаний за таку ж кількість часу, що й попередній. Такий підхід ускладнює процює, оскільки потребує великої кількості часу. При цьому для того, щоб з більшою впевненістю гарантувати збіжність результатів, необхідно зменшувати розмір скінченного елемента кілька разів, що подовжує процес проектування на кілька днів.

Для умовно плоских деталей, таких як нервюри, балки підлоги тощо, можна прискорити процес шляхом використання плоскої моделі замість твердотільної, що значно зменшує кількість скінченних елементів. Процес розрахунку аналогічний розрахунку твердотільної моделі і не відрізняється при заданні матеріалу, граничних умов і оптимізації. Відмінність полягає лише в розмірі сітки скінченних елементів, який був прийнятий у два рази меншим, ніж для попередньої моделі.

Результат статичного розрахунку наведено на рисунку 37.

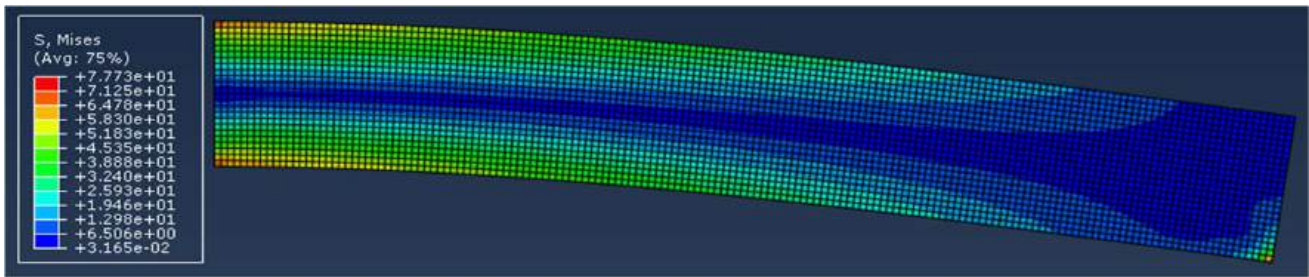


Рисунок 37 – Результат статичного розрахунку для плоскої моделі

Як впливає з отриманого результату, поле напружень і їх максимальні значення такі ж, як при моделюванні деталі твердим тілом, що дозволяє проконтролювати правильність програмування параметрів нового розрахунку.

Таким чином, при сітці, яка у два рази менше, ніж у попередньому випадку, час на одну ітерацію становить трохи більше однієї хвилини. Так, при 30 ітераціях (кількість взято з графіка рисунка 35) час проведення обчислень становив би 32 хвилини, але з огляду на те, що при зменшенні розміру скінченного елемента збільшується кількість можливих варіантів виключення кодів, при новому розрахунку знадобилося б 52 цикли для отримання результату (рисунок 38). Відповідно, витрачений час становив 56 хвилин.

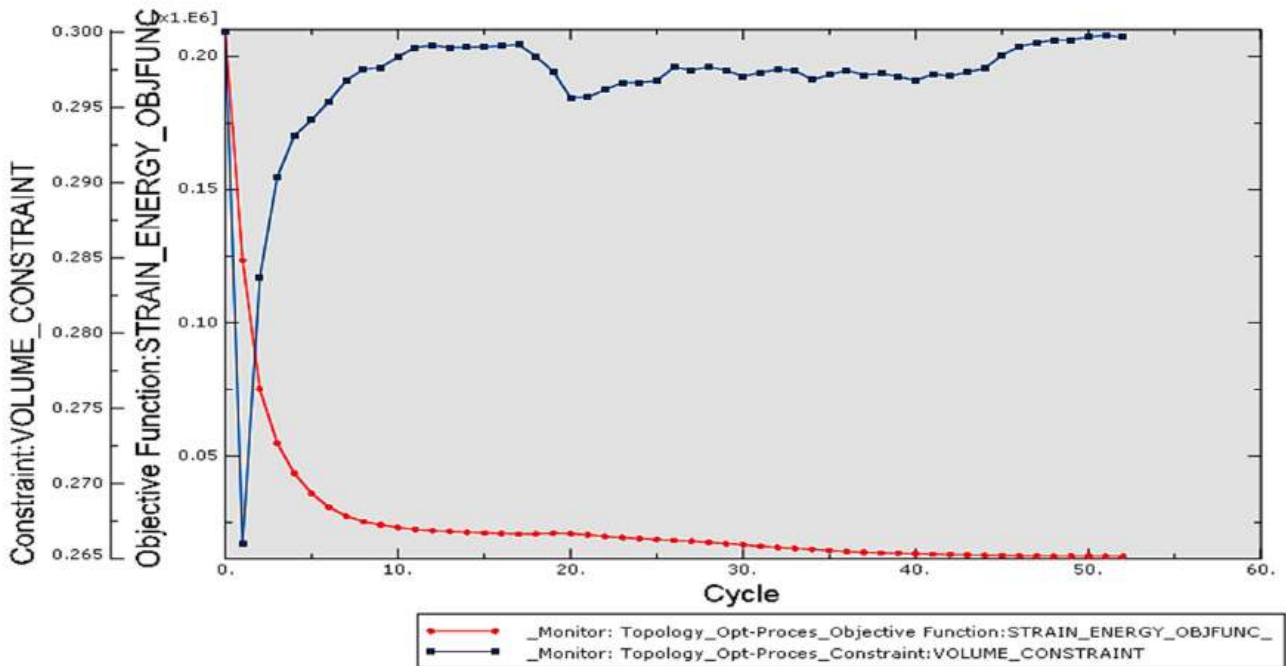


Рисунок 38 – Графік процесу розрахунку для плоскої моделі

Для нового розрахунку за плоскою моделлю було взято ліміт у 30 % на максимально допустимий обсяг матеріалу. Результат розрахунку подано на рисунку 39.



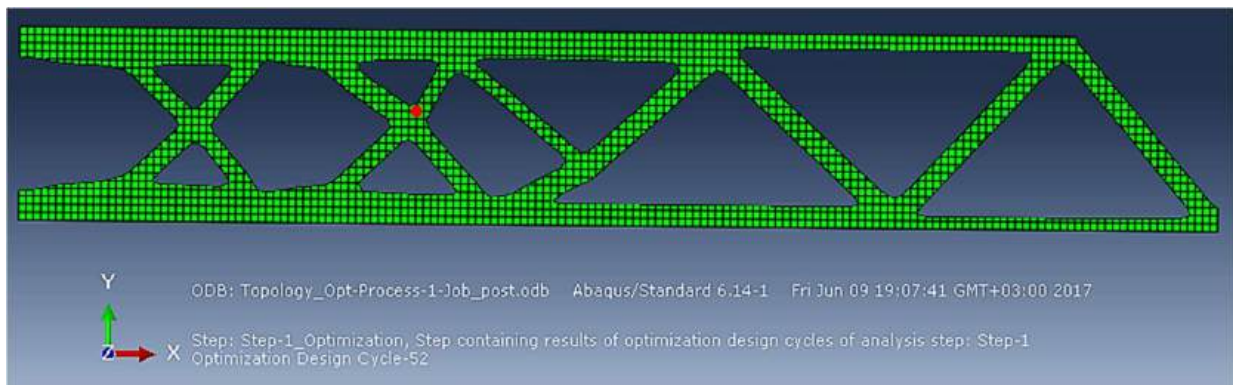


Рисунок 39 – Результат розрахунку плоскої моделі

Розподіл напружень, а також результуючих переміщень подано на рисунку 40.

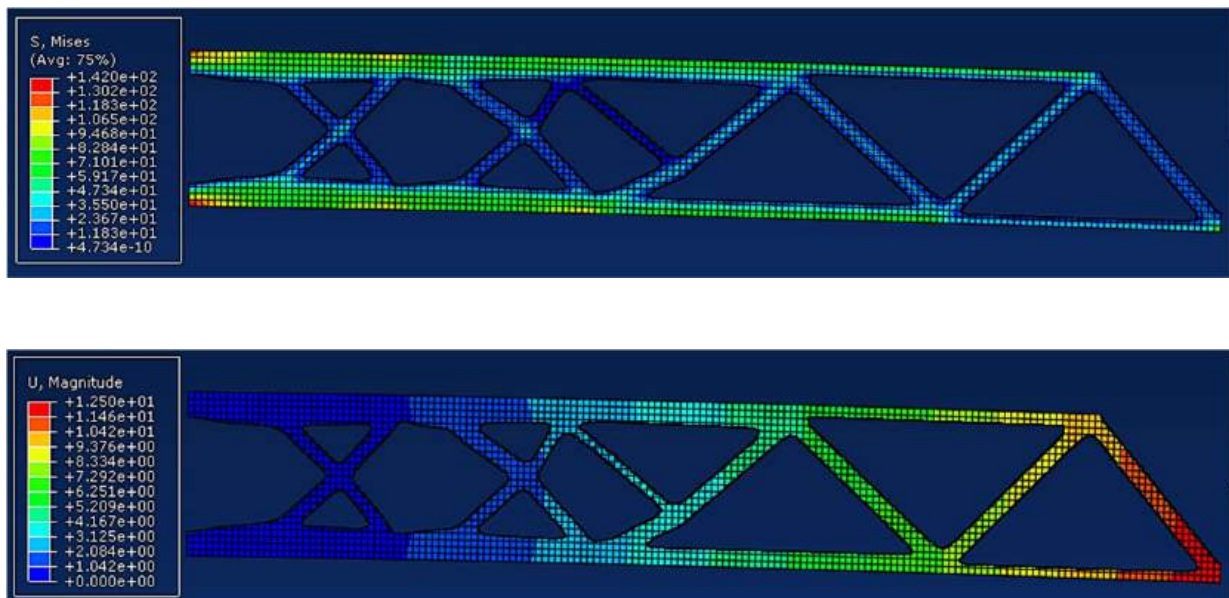


Рисунок 40 – Розподіл напружень і результуючих переміщень для плоскої моделі

Отримана в результаті оптимізації деталь нагадує фермову конструкцію і виходячи з розподілу матеріалу в деталі елементи конструкції переважно сприймають нормальні напруження. Цей результат є дуже важливим, оскільки підтверджує можливість прийняття припущення про умовну ізотропність матеріалу вихідної заготовки для оптимізації. Все це дозволяє застосовувати наведений підхід для проектування і виготовлення деталей з односпрямованих термопластичних композитних матеріалів. Крім того, для отриманої геометрії не буде труднощів розробити траєкторію укладання філаменту (рисунок 41).

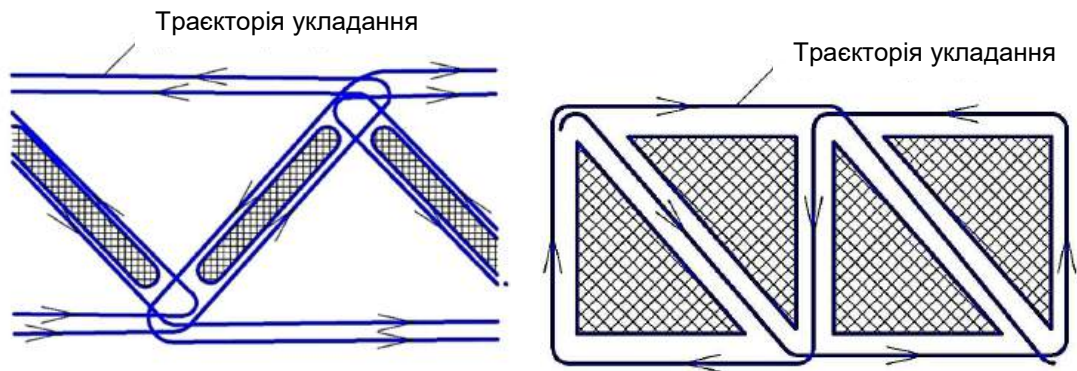


Рисунок 41 – Траєкторія укладання філаменту для фермової конструкції

### Контрольні запитання

1. Яке правило застосується для визначення фізико-механічних характеристик філаменту, що має домішки у своєму складі?
2. Як визначаються фактори ефективності домішок у композитному філаменті, що впливають на його міцність?
3. Назвіть етапи топологічної оптимізації виробу на прикладі програмного продукту SimuliaAbaqus.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. 25 самых популярных материалов для 3Д-печати [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://3dprintstory.org/25-samih-populyarnih-materialov-dlya-3d-pechati>
2. Материалы для 3Д-печати [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://3dsmart.com.ua/blog/materialy-dlya-3d-pechati>
3. Аббревиатуры для полимеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.polybum.com/material/sokra/>
4. Учебник по CURA – как пользоваться программой слайсером [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://3dpt.ru/blogs/support/cura>.
5. Cura для 3Д-печати [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://3dprinter.ua/cura-dlja-3d-pechati-skachat/>
6. 20 наиболее распространенных проблем 3Д-печати [Электронный ресурс]. Ч. 1. – Режим доступа : <https://3dtoday.ru/blogs/garremmash/the-20-most-common-problems-of-3d-printing-part-1/>
7. 20 наиболее распространенных проблем 3Д-печати [Электронный ресурс]. Ч. 2. – Режим доступа : <https://3dtoday.ru/blogs/garremmash/the-20-most-common-problems-of-3d-printing-part-2/>
8. 10 правил подготовки модели к 3Д-печати [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://habr.com/ru/post/196182/>
9. Критическая длина волокна [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://studopedia.su/6\\_25570\\_kriticheskaya-dlina-volon.html](https://studopedia.su/6_25570_kriticheskaya-dlina-volon.html).

Навчальне видання

**Шевцова Марина Анатоліївна  
Пургіна Світлана Михайлівна**

**СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА АВІАЦІЙНОЇ  
ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ.  
АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО АРКТ**

Редактор Н. М. Сікульська

Зв. план, 2021

Підписано до видання 18.02.2021

Ум. друк. арк. 4,6. Обл.-вид. арк. 5,13. Електронний ресурс

---

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

[http:// www.khai.edu](http://www.khai.edu)

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001