



УКРАЇНА  
 МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
 ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
 (ЗНТУ)

## РЕЦЕНЗІЯ

на магістерську роботу Дослідження і оцінка продуктивності  
 (вказати тему дипломного проекту (роботи))

3D FDM принтерів  
 Студент Биховський Євгеній Юрійович

Спеціальність «Тришвидна механіка» , група МЗ-13.4

Обсяг проекту повний

Кількість аркушів креслень (проектарія)

Кількість сторінок пояснювальної записки 90

а) короткий зміст проекту та прийнятих рішень

Огляд технології адитивного виробництва, матеріальної адитивних технологій, дослідження і оцінка продуктивності двох 3D FDM принтерів, аналіз графік та діаграма у подвійній шкалі.

б) висновок про відповідність проекту завданню

Виконана робота повністю відповідає постановленню завданню

в) характеристика виконання кожного розділу дипломного проекту, рівень відповідності останнім досягненням науки та техніки і передовим методам роботи

робота виконана на достатньому рівні і відповідає останнім досягненням науки та техніки

г) негативні особливості виконання проекту Немає негативних особливостей

виконаної роботи негативних особливостей не виявлено

д) позитивні особливості Розроблено методичку і орієнтовну

оспастичу. Отримані рецензії мають бути висвітлені  
на підприємстві згідно з загальною політикою підприємства

е) оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки до проекту

Підприємство з записки і графічний матеріал (презентація)  
використати у відповідності до діючих стандартів

є) відгук про роботу загалом В цілому маючі робота

Бата студентка групи МЗ - 113 м. Глибоченського Євгенія  
Кривоніжко відзначає високим рівнем знань

ж) інші зауваження невизначені критерії за якими оцінюється

продуктивність 3D прикладу.

з) оцінка проекту В цілому маючі робота студентка

групи МЗ-113 м. Глибоченського Євгенія Кривоніжко знову  
радіше оцінку "відмінно"

Рецензію склав

доц. каф. ТМБ Кошолов В.В.  
(посада, місце роботи, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

« 19 » 12 20 18 р.

[10:33:45] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №692 [2] (200020 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:34:03] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №677 [2] (200021 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:34:17] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №697 [2] (200041 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:34:28] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №702 [2] (200036 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:34:46] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №707 [2] (200038 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:36:12] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №712 [2] (200013 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:38:23] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №717 [2] (200024 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:38:42] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №722 [2] (200036 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:38:59] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №727 [2] (200030 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:39:16] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №732 [2] (200040 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:39:31] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №737 [2] (200020 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:39:51] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №742 [2] (200042 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:40:02] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №747 [2] (200046 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:40:21] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №752 [2] (200039 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:40:40] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №762 [2] (200045 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:40:59] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №767 [2] (200023 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:41:11] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №772 [2] (200027 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:41:29] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №777 [2] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:41:47] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №757 [2] (200031 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[10:41:51] Тип проверки: *Стандартная*

[10:41:52] **ВНИМАНИЕ! Уникальность может быть определена некорректно! (Обнаружено ошибок: 28%)**

[10:41:52] **Уникальность текста 79%** © (Проигнорировано подстановок: 0%)

---

Перевірку на плагіат програмою AntiPlagiarism.NET, магістерської роботи Биховський Є.Ю., провів

зав. лаб. каф. ТМБ Паміров В.М.

17.12.2018р.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Машинобудівний  
(повне найменування інституту, назва факультету)

Технології машинобудування  
(повна назва кафедри)

**Пояснювальна записка**

до дипломного проекту (роботи)

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему Дослідження і оцінка продуктивності 3D  
FDM принтерів

Виконав: студент VI курсу, групи МЗ-113-ч  
спеціальності (напряму підготовки)

131 Прикладна механіка  
(код і назва напряму підготовки, спеціальності)

Григоренко С. І.  
(прізвище та ініціали)

Керівник Логаніндов В. О.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент Ковалев В. В.  
(прізвище та ініціали)

м.Запоріжжя  
20 18 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Запорізький національний технічний університет**  
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет Машинобудівний  
 Кафедра Технології машинобудування  
 Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) Другий (магістерський)  
 Спеціальність 131 Прикладна механіка  
 (код і назва)  
 Напрямок підготовки \_\_\_\_\_  
 (код і назва)

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри П. М. Б.  
доц. Діяч С. І.  
 "19" \_\_\_\_\_ 12 2018 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Биховському Євгенію Юрійовичу  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження і оцінка продуктивності 3D FDM принтерів

керівник роботи Логашков Віктор Олександрович к.т.н.  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "26" 11 2018 року № 372

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2018

3. Вихідні дані до роботи технології 3D-друку

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз технології адитивного виробництва, можливості адитивних технологій, дослідження і оцінка продуктивності для 3D FDM принтерів, охарактеризувати та оцінити у подальшій ситуації.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація



## РЕФЕРАТ

ПЗ: 90 сторінок, 47 рисунків, 11 таблиць, 20 джерел.

Об'єкт дослідження – декартові 3D принтер і його програмне забезпечення.

Метод дослідження – створення свого прототипу 3D принтера.

Мета дослідження – дослідження конструкційних особливостей 3D принтера, логіки роботи, настройка керуючої програми, алгоритм створення G-коду.

В ході виконання магістерської роботи був проведений огляд літературних джерел, в яких описуються всі існуючі на сьогоднішній день технології 3D друку. Проаналізувавши всі складності створення, плюси і мінуси кожної технології, ми вибрали оптимальну, на основі якої буде працювати наш 3D принтер. Нами проведено аналіз ключових компонентів, з яких буде складатися принтер. На симуляторі 3D принтера за допомогою програми-слайсер Simplify3D ми ознайомилися з G-кодом, його особливостями, проблемами, які виникають при підготовці керуючої програми, і також дефектами, що виникають в процесі друку. Було проведено аналіз потенційних небезпек при роботі у лабораторії, яку обладнано персональним комп'ютером з візуальними дисплейними терміналами, запропоновано заходи з хорони праці, які направлені на зменшення та мінімілізацію дії шкідливих факторів.

3D ПРИНТЕР, FDM, SLA, SLM, DMLS, АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, PLA, ABS, UP 3D PRINTER MINI, ROLAND ARM-10, 3DSYSTEMS PROJET 360, EOS P 800, CONCEPT LASER MLAB R, CONCEPT LASER XLINE, SLM 500HL, БЕНЧМАРКІНГ.

## Зміст

Вступ .....	7
1 Огляд технологій адитивного виробництва .....	10
1.1 Огляд існуючих технологій 3D-друку .....	11
1.1.1 FDM .....	11
1.1.2 SLA .....	14
1.1.3 SLM .....	16
1.1.4 DMLS .....	18
1.2 Матеріали для 3D-друку .....	21
1.2.1 Полімерні матеріали .....	21
1.2.2 Металовмісні матеріали .....	25
1.3 Огляд 3D-принтерів для полімерів .....	26
1.3.1 UP 3D Printer Mini .....	26
1.3.2 Roland ARM-10 .....	29
1.3.3 3DSystems ProJet 360 .....	31
1.3.4 EOS P 800 .....	34
1.4 Огляд 3D-принтерів для металів .....	35
1.4.1 Concept Laser Mlab R .....	35
1.4.2 Concept Laser Xline .....	38
1.4.3 SLM 500HL .....	40
Висновки .....	42
2 Можливості адитивних технологій .....	43
2.1 Можливості 3D-друку в макетування об'єктів .....	43
2.2 Можливості 3D-друку реальних об'єктів .....	45
2.2.1 Підвищення надійності обладнання .....	45
2.2.2 Підвищення ремонтпридатності обладнання .....	58
2.2.3 Виготовлення принципово нового обладнання .....	60
Висновки .....	62
3 Дослідження і оцінка продуктивності двох 3D FDM принтерів .....	63



3.1 Аналіз .....	63
------------------	----

3.2	Виготовлення та перевірка .....	65
	Висновки .....	70
4	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях .....	71
4.1	Аналіз потенційних небезпек .....	71
4.2	Заходи по забезпеченню техніки безпеки .....	72
4.3	Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці ....	73
4.4	Заходи з пожежної безпеки .....	78
4.5	Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях .....	79
4.6	Організація цивільного захисту на промисловому об'єкті .....	83
	Висновок .....	88
	Список використаних джерел .....	89

## ВСТУП

Адитивні технології впевнено виходять на промислову арену, яскравим прикладом цього є 3D-друк. Сутність адитивних технологій полягає в пошаровому з'єднанні матеріалів для створення об'єктів з даних цифрової 3D-моделі. Цим вони відрізняються від традиційних технологій виробництва, що мають на увазі механічну обробку – видалення зайвого матеріалу з заготовки [20].

Класифікація адитивних технологій: з використаних матеріалів (рідким, сипучим, полімерним, порошковим металом); за наявністю лазера; за способом фіксації шару побудови (тепловий вплив, опромінення ультрафіолетом або видимим світлом, зв'язуючим складом); за способом утворення шару.

Технології тривимірного друку зародилися три десятиліття тому, і починалися вони з пошарового затвердіння фотополімеру світловим променем, але ще довгий час технологія тривимірного друку була доступна тільки вузькому колу людей. Перші апарати для 3D-друку були вкрай дорогими, також вибір матеріалу для створення моделей був досить обмежений [7].

Все змінилося в 2006 році, коли був запущений проект RepRap, націлений на виробництво принтерів, які здатні репліціувати себе, тобто відтворювати деталі власної конструкції. Тестовий екземпляр такого пристрою був виготовлений в 2008 році англійськими конструкторами університету Бата. Він в змозі відтворити близько 50% своїх власних конструктивних пластмасових частин і деталей.

Матеріалом для тривимірного друку можуть бути не тільки полімери, а й метали. Ще 10 років тому виготовлення деталей з металу методом 3D-друку не поступалося за експлуатаційними характеристиками і властивостями деталям, виготовленим традиційними методами обробки металів, було на межі фантастики, та сьогодні це вже реальність [17].

Оцінити темп розвитку тривимірного друку, з початку її заснування можна в звіті Wohlers Report 2015. З 1988 по 2014 р в світі було встановлено 79 602 промислових 3D-принтера. При цьому 38,1% пристроїв, вартістю понад 5 тис. Доларів США припадає на США, 9,3% - на Японію, 9,2% - на Китай, і 8,7% - на

Німеччину. Решта країн світу знаходяться в значному відриві від лідерів. З 2007 по 2014 річний обсяг продажу настільних принтерів виріс з 66 до 139 584 пристроїв. У 2014 р 91,6% продажів припадав на настільні 3D-принтери і 8,4% - на промислові установки адитивного виробництва, прибуток від яких, однак, склав 86,6% від загального обсягу, або 1,12 млрд. доларів США в абсолютному вираженні. Настільні машини задовольнялися 173,2 млн. доларів США і 13,4%. З 2016 року очікується зростання продажів до 7,3 млрд. доларів США, у 2018 р - 12,7 млрд, у 2020 році ринок досягне 21,2 млрд. доларів [1].

Даний звіт показує, що ринок тривимірного друку неухильно розвивається, з кожним роком можливості друку тільки збільшуються.

Згідно Wohlers, FDM-технологія превалує, нараховуючи близько 300 брендів по всьому світу, що не дивно, адже вартість технології, на порядок нижче конкуруючих, щодня поповнюючись новими модифікаціями. Деякі з них продаються тільки локально, тому дуже складно, якщо взагалі можливо, знайти інформацію про кількість брендів, що випускають 3D-принтери. Так само 3D-принтери для цієї технології можливо виготовити самостійно, Адже їх комплектуючі у вільному доступі, що ще більше ускладнює підрахунок. З упевненістю можна сказати, що їх кількість на ринку збільшується з кожним днем. Спостерігається велика різноманітність в розмірах і застосовуваних технологіях. Наприклад, німецька компанія BigRep виробляє величезний FDM-принтер під назвою BigRep ONE.2 за ціною 36 тис. євро, здатний друкувати об'єкти розміром до 900x1055x1100 мм з дозволом 100-1000 мікрон, двома екструдерами і можливістю використовувати різні матеріали.

У сучасному виробництві традиційні методи обробки металів досягли піку свого розвитку, і подальше поліпшення характеристик і властивостей деталей можливо лише із застосуванням нових матеріалів. Однак не всі матеріали добре піддаються обробці традиційними методами, тому використання матеріалів дуже обмежено, і обумовлюється в основному формою деталі, що виготовляється. До таких матеріалів можна віднести тверді сплави і металокераміку. Їх застосування обмежене у зв'язку зі складністю обробки. Цю проблему можна спробувати

вирішити за допомогою 3D-друку, адже під час друку відбувається «виращування» деталі, а не видалення зайвого матеріалу з заготовки. Обмеження за формою деталі, що виготовляється, так само не актуально для 3D-принтера [5].

Метою даного звіту є оцінка можливості застосування тривимірного друку для виготовлення деталей машин і устаткування, здатних конкурувати з деталями, виготовленими традиційними методами.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

- 1) Проаналізувати існуючі методи 3D-друку, використані матеріали;
- 2) 3D-принтер, що задовольняє умовам виготовлення деталей;
- 3) Проаналізувати існуючі області застосування тривимірного друку на виробництві;
- 4) Проаналізувати та запропонувати нові можливості тривимірного друку на виробництві;
- 5) Провести порівняння деталі, отриманої адитивним методом, з деталлю, отриманою традиційним методом;
- 6) Зробити висновок про можливості використання 3D-друку.

Об'єктом дослідження є надійність технологічних машин і обладнання. Предмет дослідження – оцінка ефекту від застосування деталей, отриманих методом тривимірного друку.

Складно знайти галузь виробництва, де б не застосовувалися 3D - принтери: з їх допомогою виготовляються деталі літаків, космічних апаратів, підводних човнів, інструменти, протези, ювелірні вироби та ін. Перспектива очевидна – адитивна технологія найближчим часом стане пріоритетною технологією виготовлення обладнання і технологічних машин.

## 1 Огляд технологій адитивного виробництва

Організація ASTM, що займається розробкою галузевих стандартів, розділяє 3D-адитивні технології на 7 категорій [15].

1) Витискання матеріалу. В точку побудови по підігрітому екструдеру подається пастоподібний матеріал, що представляє собою суміш сполучного і металевого порошку. Побудована сира модель поміщається в піч для того, щоб видалити сполуку і спекти порошок – так само, як це відбувається в традиційних технологіях. Ця адитивна технологія реалізована під марками MJS (Multiphase Jet Solidification, багатофазні затвердіння струменя), FDM (Fused Deposition Modeling, моделювання методом пошарового напрямку), FFF (Fused Filament Fabrication, виробництво способом наплавлення ниток).

2) Розбризування матеріалу. Наприклад, в технології Polyjet віск або фотополімер по багатоструменевій голівці подається в точку побудови. Ця адитивна технологія також називається Multi jetting Material.

3) Розбризування сполучного. До них відносяться струменеві Ink-Jet-технології вприскування в зону побудови не модельного матеріалу, а сполучного реагента (технологія адитивного виробництва ExOne).

4) З'єднання листових матеріалів. Будівельний матеріал являє собою полімерну плівку, металеву фольгу, аркуші паперу та ін. Використовується, наприклад, в технології ультразвукового адитивного виробництва Fabrisonic. Тонкі пластини з металу зварюються ультразвуком, після чого надлишки металу видаляються фрезеруванням. Адитивна технологія тут застосовується в поєднанні з субстрактивною.

5) Фотополімеризація у ванні. Технологія використовує рідкі модельні матеріали - фотополімерні смоли. Прикладом можуть служити SLA-технологія компанії 3D Systems і DLP-технологія компаній Envisiontec, Digital Light Procession.

6) Плавка матеріалу в заздалегідь сформованому шарі. Використовується в SLS-технологіях, що використовують як джерело енергії лазер або термоголовку

(SHS компанії Blueprinter).

7) Пряме підведення енергії в місце побудови. Матеріал і енергія для його плавлення надходять в точку побудови одночасно. В якості робочого органу використовується головка, обладнана системою підведення енергії і матеріалу. Енергія надходить у вигляді сконцентрованого пучка електронів (Sciaky) або променя лазера (POM, Optomes,). Іноді головка встановлюється на робот-маніпулятор.

### 1.1 Огляд існуючих технологій 3D-друку

В даний час в світі налічується більше 100 офіційно зареєстрованих методів тривимірного друку, як полімерами, так і металами. Така велика кількість методів пов'язана із захистом інтелектуальної власності, де кожна компанія, що займається виробництвом 3D-принтерів, намагається зареєструвати свій власний метод друку. Найчастіше, методи відрізняються лише назвою, а не технологією. Тому, методів, що відрізняються технологією всього не більше 15. Далі розглянемо чотири найбільш поширених, перспективних і доступних на сьогоднішній день методів: FDM, SLA, SLM, DMLS.

#### 1.1.1 FDM

FDM (Fused deposition modeling) - моделювання методом пошарового наплавлення, популярна технологія адитивного виробництва. Застосовується для створення тривимірних моделей, макетів, виробів до яких не пред'являються особливі вимоги до якості поверхні і точності виготовлення [20].

Технологія FDM має на увазі створення тривимірних об'єктів за рахунок нанесення послідовних шарів матеріалу, які повторюють контури цифрової моделі. Матеріалом для друку виступають термопластики, що поставляються у вигляді катушки ниток різних кольорів.

Виробничий цикл починається з обробки тривимірної цифрової моделі.

Модель у форматі STL ділиться на шари і орієнтується відповідним чином для друку. При необхідності створюються підтримуючі структури, необхідні для друку нависаючих елементів. Деякі пристрої дозволяють використовувати різні матеріали під час одного виробничого циклу. Можливим є друк моделі з одного матеріалу з печаткою опор з іншого, легкорозчинного матеріалу, що дозволяє з легкістю видаляти підтримуючі структури після завершення процесу друку. Альтернативно можливим є друк різними кольорами одного і того ж виду пластику при створенні єдиної моделі.

Деталь формується пошарово. Розплавлений пластик укладається по контурах, які утворено цифровою моделлю. Після укладання пластик миттєво охолоджується і твердне. По завершенню одного шару, екструдер переміщається вертикально вгору на величину товщини нитки розплавленого пластику. Формується другий шар. На рисунку 1.1 схематично показано формування шарів при 3D-друку методом FDM.

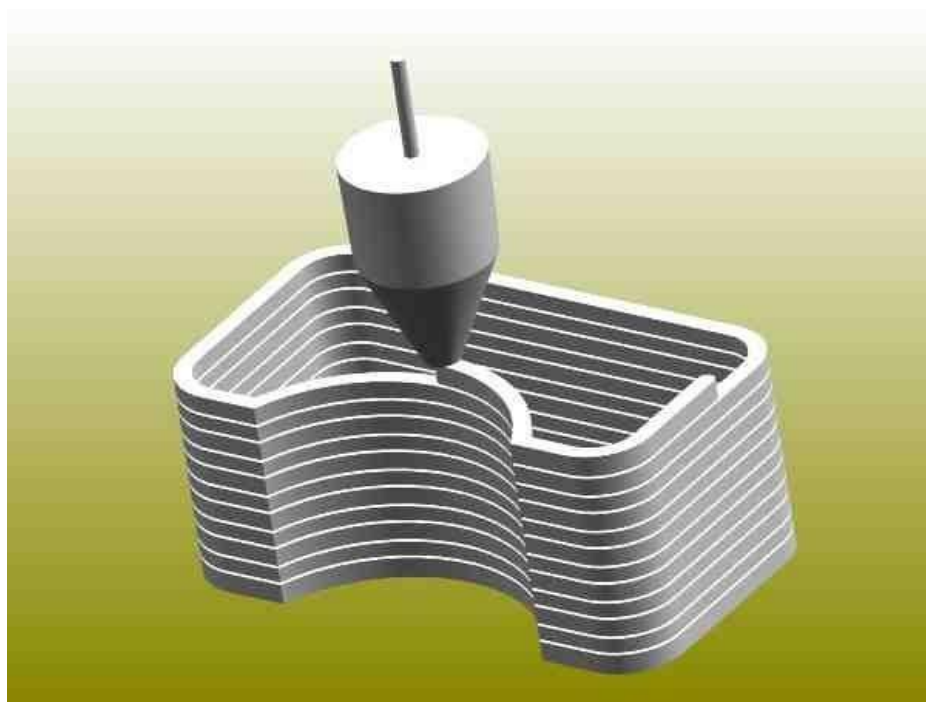


Рисунок 1.1 - Схема формування шарів деталі

Пластикова нитка подається з котушки в екструдер. Екструдер (друкована головка) – це пристрій, обладнаний механічним приводом для подачі нитки, нагрівальним елементом для плавки матеріалу і соплом, через яке здійснюється



безпосередньо екструзія. Нагрівальний елемент передає тепло на сопло, яке, в свою чергу, плавить пластикову нитку і подає розплавлений матеріал на той шар, що формується. Температура сопла може регулюватися від 150°C до 310°C для використання різних матеріалів. Як правило, верхня частина сопла навпаки охолоджується за допомогою конвективного кожуха і вентилятора для запобігання передчасного розплавлення пластикової нитки з наступним засміченням друкуючої головки, що в свою чергу призведе до втрати плавності подачі матеріалу, а також до втрати якості друку.

Екструдер переміщується в горизонтальній і вертикальній площинах під контролем алгоритмів, аналогічних використуванню в верстатах з ЧПУ. Сопло переміщується по траєкторії, заданої системою автоматизованого проектування. Модель будується шар за шаром, від низу до верху. Як правило, екструдер приводиться в рух покроковими моторами або сервоприводами. Найбільш популярною системою координат, яка застосовується в FDM, є декартова система, побудована на прямокутному тривимірному просторі з осями X, Y і Z [18].

Технологія FDM відрізняється високою гнучкістю, але має певні обмеження. Хоча створення нависаючих структур можливо при невеликих кутах нахилу, у випадку з великими кутами необхідне використання штучних опор, які, створюються в процесі друку, і відокремлюються від моделі по завершенню процесу.

В якості витратних матеріалів доступні всілякі термопластики і композити, включаючи ABS, PLA, полікарбонати, поліаміди, полістирол, лігнін та багато інших. Як правило, різні матеріали надають вибір балансу між певними характеристиками міцності і температурними характеристиками [14].

Моделювання методом FDM застосовується для швидкого прототипування і швидкого виробництва. Швидке прототипування полегшує повторне випробування з послідовною, покроковою модернізацією предмета. Швидке виробництво слугує недорогою альтернативою стандартним способам при створенні дрібносерійних партій.

FDM є одним з найменш дорогих способів друку, що забезпечує зростаючу

популярність побутових принтерів, заснованих на цій технології. У побуті 3D-принтери, що працюють за технологією FDM, можуть застосовуватися для створення самих різних об'єктів цільового призначення, а також іграшок, прикрас і сувенірів.

### 1.1.2 SLA

SLA (Stereolithography) – технологія тривимірного друку, при якій рідкий фотополімер під дією світлового випромінювання лазера змінює свої фізичні властивості і твердне, утворюючи тверду поверхню в точці проекції лазера.

У ємність з рідким фотополімером поміщається сітчаста платформа, на ній буде відбуватися вирощування прототипу. Спочатку платформа знаходиться на такій глибині, щоб її покривав найтонший шар полімеру товщиною від 0,05 до 0,15 мм – це і є приблизна товщина шару в стереолітографії. Далі включається лазер, який впливає на ті ділянки полімеру, які відповідають стінкам цільового об'єкта, викликаючи їх затвердіння. Після цього вся платформа занурюється глибше, на глибину, рівну товщині шару. Також в цей момент спеціальна щітка зрошує ділянки, які могли залишитися сухими внаслідок деякого поверхневого натягу рідини. Схема установки представлена на рисунку 1.2

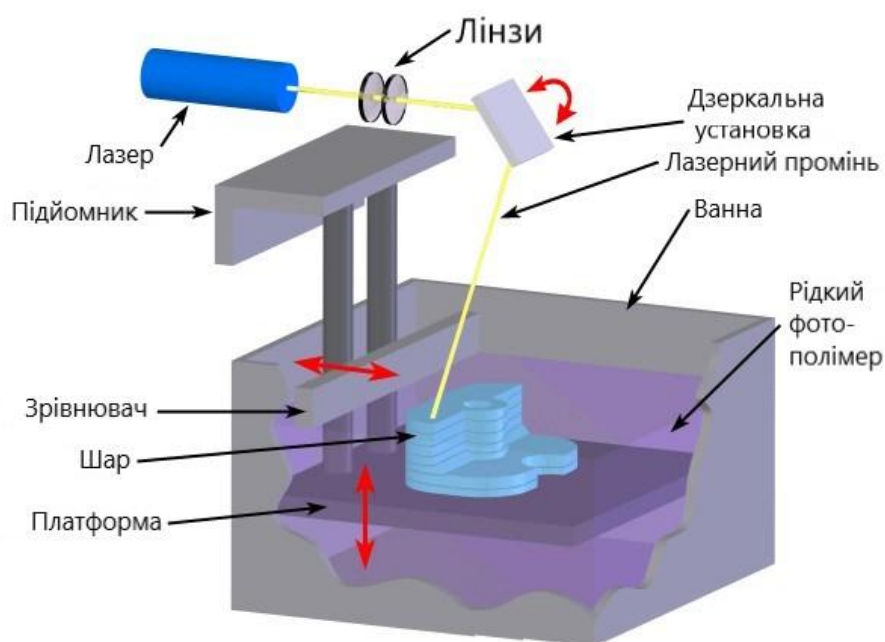


Рисунок 1.2 - Схема установки для стереолітографії

По завершенню побудови об'єкт занурюють у ванну зі спеціальними складами для видалення надлишків і очищення. І, нарешті, фінальне опромінення світлом для остаточного затвердіння. Як і багато інших методів 3D-прототипування, SLA вимагає зведення підтримуючих структур, які вручну видаляються після закінчення будівництва [12].

Не обходиться і без істотних складнощів.

По-перше, вимоги до самого фотополімера досить суперечливі: якщо він буде густим, то його легше полімеризувати, але складніше забезпечити рівну поверхню після кожного кроку занурення; доводиться використовувати спеціальну лінійку, яка на кожному кроці проходить по поверхні рідини і вирівнює її. Велика кількість затверджувача при фіксованій потужності лазера дозволить зменшити необхідний час впливу, проте неминуче фонове засвічення «псує» навколишній обсяг полімеру і скорочує можливий термін його використання.

По-друге, повна полімеризація кожного шару зайняла б чимало часу, тому засвічення проводиться до рівня, при якому шар набуває лише мінімально необхідну міцність, а згодом готову модель, попередньо промивши від залишків рідкого полімеру, доводиться опромінювати потужним джерелом ультрафіолетового світла в спеціальній камері, щоб полімеризація досягла 100%.

Плюси технології:

- Отримання дуже високої роздільної здатності і високої точності друку;
- Отримання дуже великих моделей, розміром до 150×75×55 см і вагою до 150 кг;
- Механічна міцність одержуваних зразків досить висока, вони можуть витримувати температуру до 100°C;
- Відсутність обмежень на складність моделі і наявність у неї дрібних елементів;
- Мала кількість відходів після друку;
- Легкість фінішної обробки, якщо така буде потрібною.

Мінуси:

- Обмежений вибір матеріалів для виготовлення моделей;

- Неможливість кольорового друку і поєднання різних матеріалів в одному циклі;

- Мала швидкість друку, максимум 10-20 мм. на годину по вертикалі;

- Дуже великі масогабаритні характеристики 3D-принтерів.

Незважаючи на обмеженість спектра видаткових матеріалів, вибір є, і можна отримувати моделі з різними властивостями: з підвищеною термостійкістю, гнучкі, з високою стійкістю до абразива. Для стереолітографії доступні три кольори: білий, сірий, напівпрозорий.

### 1.1.3 SLM

SLM (Selective Laser Melting) - Вибіркове лазерне плавлення. Цей метод має багато спільного з методом SLA, тільки замість рідини використовується порошок з діаметром частинок 10-100 мкм, тонкими рівномірними шарами розподіляється в горизонтальній площині, а потім лазерний промінь плавить (рисунок 1.3) ділянки, що підлягають затвердінню на даному шарі моделі.

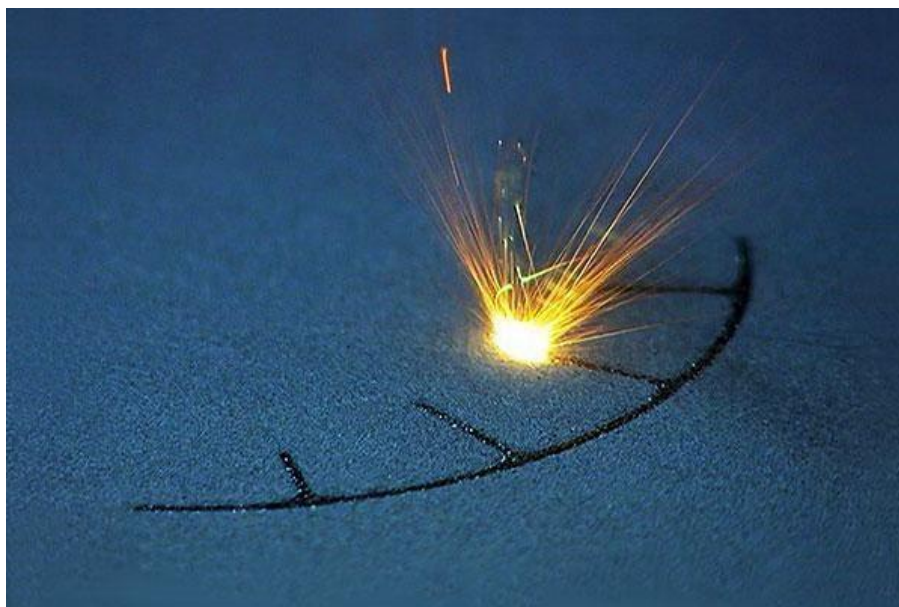


Рисунок 1.3 - Плавлення лазером порошкоподібного металу

Вихідні матеріали можуть бути самі різні: метал, пластик, кераміка, скло, ливарний віск. Порошок наноситься і розрівнюється по поверхні робочого столу

спеціальним валиком, який при зворотному проході видаляє надлишки порошку (рисунок 1.4). Потім працює потужний лазер, спікаються частки одна з одною і з попереднім шаром, після чого стіл опускається на величину, рівну висоті одного шару для зниження потужності лазера, необхідної для спікання. Порошок в робочій камері попередньо нагрівається майже до температури плавлення, а сам лазер працює в імпульсному режимі, оскільки для спікання важливіша пікова потужність, а не тривалість впливу [12].

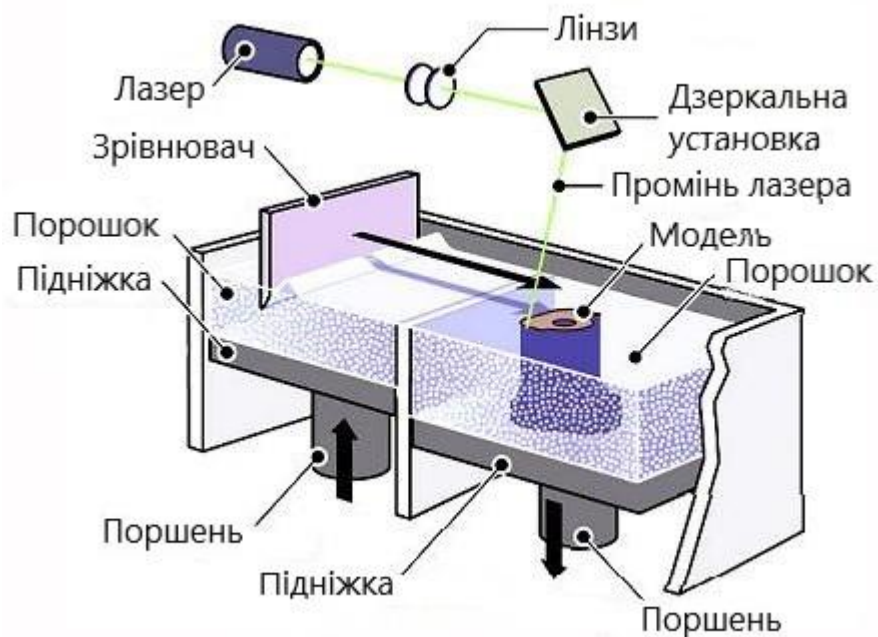


Рисунок 1.4 - Схема установки для SLM

Частки розплавляються повністю. Невикористаний порошок, який залишається навколо отверділих шарів, служить підтримкою при створенні нависаючих елементів моделі, тому немає необхідності у формуванні спеціальних підтримуючих структур. Але цей порошок по закінченні процесу необхідно видалити як з камери, особливо якщо наступна модель буде створюватися з іншого матеріалу, так і з порожнин вже виготовленої моделі, що можна зробити, лише після її повного остигання.

Часто потрібна фінішна обробка — наприклад, поліровка, оскільки поверхня може виходити шорсткою або з видимою шорсткістю. Крім того, матеріал може використовуватися не тільки чистий, але і в суміші з полімером або у вигляді

часток, покритих полімером, залишки яких потрібно видалити шляхом випалювання в спеціальній печі. Для металів одночасно відбувається заповнення виникаючих пустот бронзою.

Оскільки мова йде про високі температури, необхідні для спікання, процес відбувається в азотному середовищі з малим вмістом кисню. При роботі з металами це ще і запобігає окисленню.

Установки SLM, які випускаються серійно, дозволяють працювати з досить великими об'єктами, до  $55 \times 55 \times 75$  см.

Технологія вибіркової лазерної плавки застосовується для побудови об'єктів складної геометричної форми, часто з тонкими стінками і порожнинами. Можливість комбінування гомогенних і пористих структур в одному об'єкті корисна при створенні імплантів – наприклад, ацетабулярних чашок або інших ортопедичних імплантатів з пористою поверхнею, що сприяє остеоінтеграції (зрощуванню з кістковою тканиною). Крім того, SLM успішно застосовується в аерокосмічній галузі, дозволяючи створювати високоміцні елементи конструкцій, недосяжні за геометричною складністю для традиційних механічних методів виготовлення і обробки (фрезерування, різання тощо). Якість готових виробів настільки висока, що механічна обробка готових моделей майже не потрібна. Позитивним побічним ефектом служить економія матеріалів, бо SLM в силу своєї специфіки є практично безвідходним виробництвом [1].

В ході випробувань NASA було встановлено, що деталі для ракетних двигунів J-2X і RS-25, виготовлені з нікелевих сплавів методом SLM, дещо поступаються по щільності матеріалу аналогам, що виготовлено литтям з наступним зварюванням компонентів. З іншого боку, відсутність зварювальних швів сприятливо впливає на міцність виробів [1].

#### 1.1.4 DMLS

DMLS (Direct Method of Laser Sintering) – метод прямого лазерного спікання – технологія адитивного виробництва металевих виробів, розроблена компанією

EOS з Мюнхена. DMLS часто плутають зі схожою технологією вибіркової лазерної плавки [20].

Процес включає використання тривимірних моделей у форматі STL в якості креслень для побудови фізичних моделей. Тривимірна модель підлягає цифровій обробці для віртуального поділу на тонкі шари з товщиною, що відповідає товщині шарів, які наносяться друкарським пристроєм. Готовий файл використовується як набір креслень під час друку. В якості нагрівального елемента для спікання металевих порошків використовуються оптико-волоконні лазери щодо високої потужності – близько 200Вт. Деякі пристрої використовують більш потужні лазери з підвищеною швидкістю сканування (тобто пересування лазерного променя) для більш високої продуктивності. Як варіант, можливе підвищення продуктивності за рахунок використання декількох лазерів. DMLS дозволяє створювати цілісні металеві деталі складної геометричної форми [15].

Порошковий матеріал подається в робочу камеру в кількостях, необхідних для нанесення одного шару. Спеціальний валик вирівнює поданий матеріал в рівний шар і видаляє зайвий матеріал з камери, після чого лазерна головка спікає частинки свіжого порошку між собою і з попереднім шаром згідно контурам, визначеним цифровою моделлю. Після завершення малювання шару, процес повторюється: валик подає свіжий матеріал і лазер починає спікати наступний шар. Привабливою особливістю цієї технології є дуже високий дозвіл друку – в середньому близько 20 мікрон. Для порівняння, типова товщина шару в аматорських і побутових принтерах, що використовують технологію FDM, становить близько 100 мікрон [2].

Іншою цікавою особливістю процесу є відсутність необхідності побудови опор для нависаючих елементів конструкції. Не спечений порошок не видаляється під час друку, а залишається в робочій камері. Таким чином, кожен наступний шар має опорну поверхню. Крім того, невитрачений матеріал може бути зібраний з робочої камери після завершення друку і використаний заново. DMLS виробництво можна вважати фактично безвідходним, що важливо при використанні дорогих матеріалів; наприклад, дорогоцінних металів.

Технологія практично не має обмежень по геометричній складності побудови, а висока точність виконання мінімізує необхідність механічної обробки надрукованих виробів.

Технологія DMLS володіє декількома перевагами в порівнянні з традиційними виробничими методами. Найбільш очевидним є можливість швидкого виробництва геометрично складних деталей без необхідності механічної обробки. Виробництво є практично безвідходним, що вигідно відрізняє DMLS від традиційних технологій. Технологія дозволяє створювати кілька моделей одночасно з обмеженням лише за розміром робочої камери. Побудова моделей займає близько кілька годин, що незрівнянно вигідніше, ніж ливарний процес, який може займати до декількох місяців з урахуванням повного виробничого циклу. З іншого боку, деталі, вироблені лазерним спіканням, не володіють монолітністю, а тому не досягають тих же показників міцності, що і відлиті зразки, або деталі, вироблені традиційними методами.

DMLS активно використовується в промисловості зважаючи на можливість побудови внутрішніх структур цілісних деталей, недоступних за складністю традиційним методам виробництва. Деталі з комплексною геометрією можуть бути виконані цілком, а не зі складових частин, що сприятливо впливає на якість і вартість виробів. Так як DMLS не вимагає спеціальних інструментів (наприклад, ливарних форм) і не виробляє великої кількості відходів, на відміну від традиційних методів, виробництво дрібносерійних партій за допомогою цієї технології набагато вигідніше, ніж за рахунок традиційних методів.

Технологія DMLS застосовується для виробництва готових виробів малого і середнього розміру в різних галузях, включаючи аерокосмічну, стоматологічну, медичну та ін. Типовий розмір області побудови існуючих установок становить 250x250x250мм, хоча технологічних обмежень на розмір не існує – це лише питання вартості пристрою. DMLS використовується для швидкого прототипування, знижуючи час розробки нових продуктів, а також у виробництві, дозволяючи скорочувати собівартість дрібних партій і спрощувати складання виробів складної геометричної форми.



Північно-західний політехнічний університет Китаю використовує DMLS системи для виробництва елементів конструкції літаків. Дослідження, проведені EADS, також вказують на зниження собівартості та відходів при використанні технології DMLS для виробництва складних конструкцій в одиничних екземплярах або дрібними партіями.

## 1.2 Матеріали для 3D-друку

Всі матеріали для тривимірного друку можна розділити на полімерні матеріали та метали. Поділ за технологіями тривимірного друку є не зовсім правильним, адже один і той самий матеріал може застосовуватися в декількох методах [6].

### 1.2.1 Полімерні матеріали

#### 1.2.1.1 ABS-пластик

ABS-пластик, Акрилонітрілбутадієнстірол. Це найпопулярніший і один з кращих витратних матеріалів для 3D-друку. ABS не має запаху, не токсичний, ударостійкий і еластичний. Температура плавлення становить від 240°C до 248°C. У продажу зустрічається у вигляді порошку або тонких пластикових ниток, намотаних на котушки, як показано на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 - ABS-пластик для 3D-принтера

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

#### 1.2.1.2 Акрил

Застосування акрилу в 3D- друку досить вузьке, він використовується для створення прозорих моделей. У використанні акрил складний, необхідно враховувати, що для даного матеріалу потрібна вища температура плавлення ніж для ABS-пластика, він так само швидко остигає і твердне, у зв'язку з цим в моделі з'являється багато дрібних повітряних бульбашок, які можуть викликати візуальні спотворення у вигляді каламутності виробу.

#### 1.2.1.3 Нейлон

Друк нейлоном (рисунок 1.6) схожий з печаткою ABS-пластиком. Але для друку нейлоном потрібна вища температура друку, що знаходиться в діапазоні від 310°C до 325°C. У нейлону висока здатність вбирати воду, а також більш тривалий період застигання. Великі незручності викликає необхідність відкачки повітря з екструдера через токсичність компонентів нейлону, або друк під потужною вентиляційною системою. Через низький коефіцієнт тертя нейлону в екструдері необхідно замінити механізм на спеціальний, з великим коефіцієнтом зацепу. Незважаючи на перераховані недоліки, нейлон з успіхом використовують в 3D друку, адже деталі з даного матеріалу виходять не такими жорсткими, як з ABS-пластика, і його можна використовувати в шарнірах ковзання.



Рисунок 1.6 - Нейлон для 3D-друку

#### 1.2.1.4 Полікапролактон

Полікапролактон за властивостями збігається з біорозкладаним полієфіром. Це один з найпопулярніших витратних матеріалів для 3D друку. Він має низьку температуру плавлення, швидко твердне, забезпечує прекрасні механічні властивості готових виробів, легко розкладається в людському організмі і нешкідливий для людини. Крім того, він може застосовуватися відразу в декількох технологіях 3D-друку: SLS, ZCorp і FDM.

#### 1.2.1.5 Полікарбонат

Полікарбонат – це твердий пластик, який здатний зберігати свої фізичні властивості в умовах екстремально високих та екстремально низьких температур. Володіє високою світлонепроникністю, має високу температуру плавлення, зручний для друку методом FDM. При цьому його отримання пов'язане з рядом труднощів і він є екологічно безпечним. Використовується для друку надміцних моделей.

### 1.2.1.6 PLA-пластик

PLA-пластик – це самий екологічно чистий матеріал для 3D принтерів. Він виготовляється із залишків біомаси, силосу цукрових буряків або кукурудзи. Маючи масу позитивних властивостей, PLA має два істотних недоліки. По-перше, виготовлені з нього моделі недовговічні і поступово розкладаються під дією тепла і світла. По - друге, вартість виробництва PLA дуже висока, а значить і вартість моделей буде значно більшою за вартість аналогічних моделей, виготовлених з інших матеріалів. За зовнішнім виглядом PLA нитка не відрізняється від ABS нитки.

### 1.2.1.7 Поліпропілен

Поліпропілен (рисунок 1.7) – це найбільш легкий пластик з усіх існуючих. Порівняно з поліетиленом низького тиску гірше плавиться і краще протистоїть стиранню. При цьому вразливий до активного кисню, і деформується при негативних температурах.



Рисунок 1.7 - Поліпропілен для 3D-принтера

### 1.2.1.8 Поліфенілсульфон

Даний матеріал прийшов у 3D друк з авіапромисловості. Він практично не

горить, характеризується теплостійкістю, високою твердістю. Нагадує звичайне скло, але перевершує його по міцності. Використовується в технології 3D-друку: SLS і FDM.

#### 1.2.1.9 Поліетилен низького тиску

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

#### 1.2.2 Металовмісні матеріали

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

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

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

Алюміній і його сплави. Легкий сплав, що володіє більш низькою щільністю, ніж інші метали для 3D-друку. Володіє хорошими легуючими властивостями і електропровідністю. Використовується в автомобілебудуванні, аерокосмічній галузі, промисловості.

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

Нікелеві сплави. Матеріал з прекрасною механічною міцністю і здатністю до зварювання. Стійкий до 3000°C. Використовується в авіації, енергетиці,

виробництві інструментів та інших галузях.

3D-принтери можуть використовувати для друку широкий набір матеріалів. Згідно з технічним завданням, адитивна машина може бути налаштована для роботи практично з будь-якими іншими типами металів: вольфрамом, нікель-кадмієвими сплавами, залізом, міддю. Однак процес налаштування 3D-принтера на новий матеріал супроводжується багатьма труднощами і поки можливий тільки експериментально, що не завжди дозволяє використовувати повноту можливостей принтера.

### 1.3 Огляд 3D-принтерів для полімерів

#### 1.3.1 UP 3D Printer Mini

UP Mini (рисунок 1.8) - нова розробка фірми PP3DP, портативний 3D принтер, що дозволяє друкувати моделі з комп'ютера або ноутбука.



Рисунок 1.8 - Загальний вигляд UP 3D Printer Mini

Принтер виконаний зі сталі і має довговічну структуру, що робить його стійким до зносу і дозволяє працювати на ньому 24 години на добу.

Таблиця 1.1 - Характеристики UP 3D Printer Mini

Загальні відомості	
Розміри (мм)	240x355x340
Маса (кг)	6
Країна виробник	Китай
Технічні характеристики	
Спеціалізація	Для дому; Освіти
Якість друку (мм)	0,2
Технологія друку	FDM
Область побудови (мм)	120x120x120
Підтримувальні матеріали	ABS; PLA
Діаметр нитки (мм)	1,75
Діаметр сопла (мм)	0,4
Інтерфейс	USB
Платформа	Підігрівається
Швидкість друку (см <sup>3</sup> /хв)	30

Простий у використанні і економічний, принтер використовує адитивний спосіб друку. Міні оптимізований під друк ABS пластиком і має платформу, що підігрівається, а закритий корпус збирає тепло від екструдера і платформи, що стабілізує температуру, необхідну для друку ABS пластиком. Герметична камера повинна була забезпечувати безпеку і стабільність друку. Друк ABS дозволить при необхідності зробити спочатку окремі деталі, а потім з'єднати їх разом.

Приклади робіт, виконаних на даному принтері, наведені на рисунках 1.9 і 1.10. Як видно з рисунків, якість поверхні низька, велика шорсткість. Для отримання поверхні вищої якості використовується механічна обробка. В процесі обробки лінійні розміри виробу будуть зменшуватися, що необхідно врахувати при конструюванні моделі.

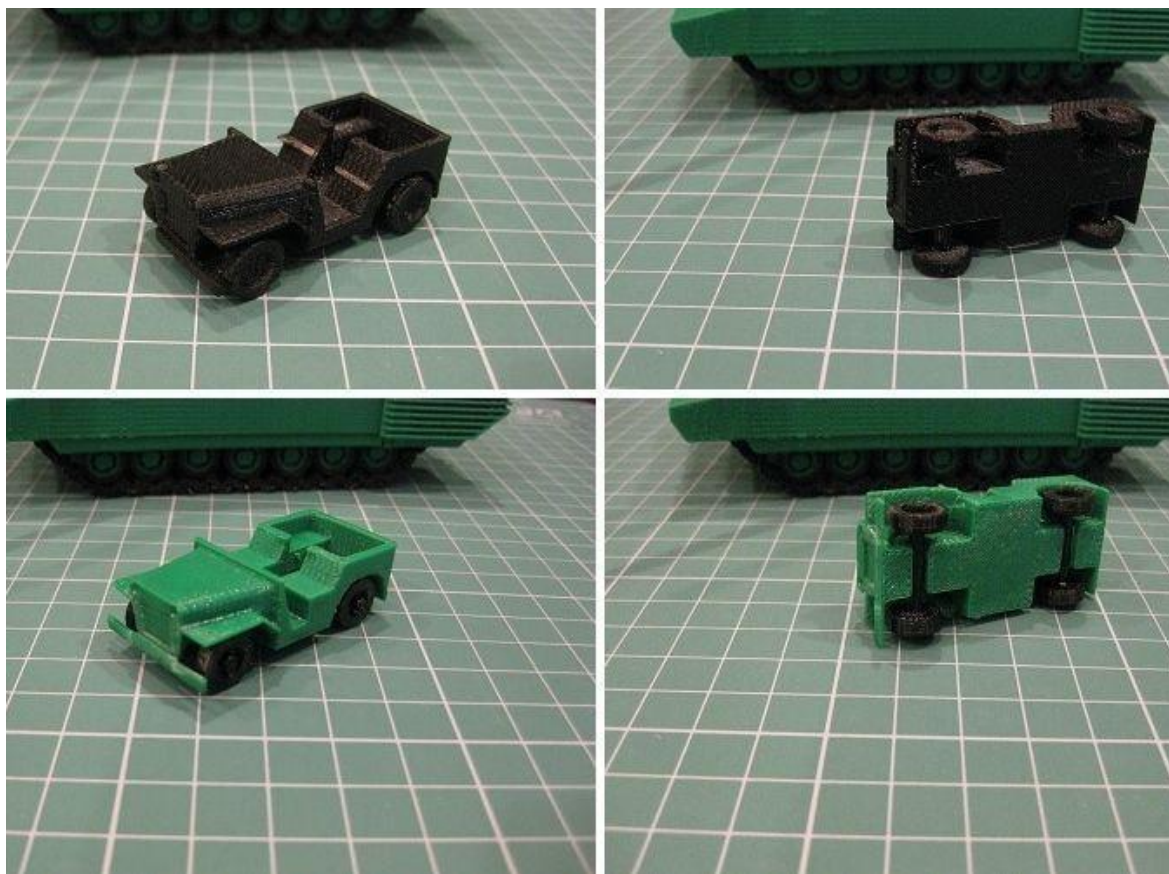


Рисунок 1.9 - Вироби, виконані 3D-принтером



Рисунок 1.10 - Виріб, виконаний 3D-принтером



### 1.3.2 Roland ARM-10

3D принтер Roland ARM-10 (рисунок 1.11) - один з представників моделей, що забезпечують надійний 3D-друк складних об'єктів.

У 3D принтері Roland ARM-10 технологія стереолітографії скомбінована з джерелами випромінювання UV-LED: модель вирощується шляхом послідовного нанесення шарів полімеру, що надходить з ємності з рідкою композицією. Можливість формування в одній робочій зоні одночасно декількох об'єктів дозволяє істотно економити час. Дану опцію можна вважати основною перевагою в порівнянні з технологією лазерного експонування окремих зон.

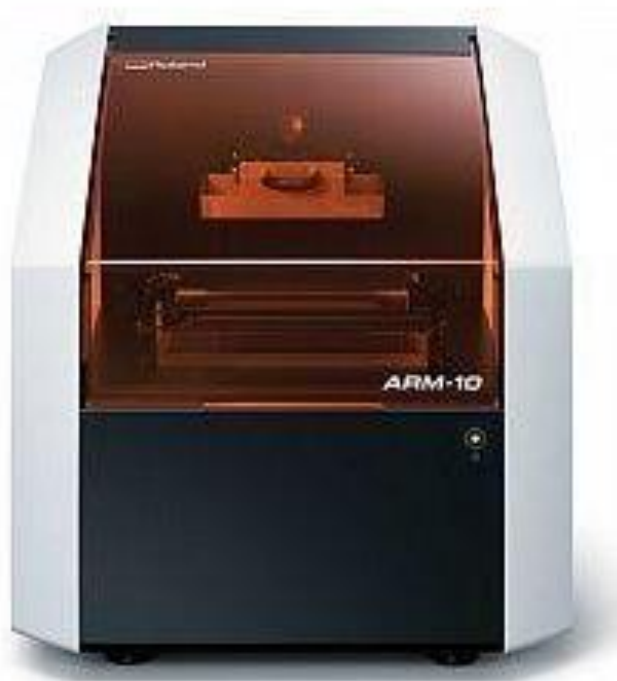


Рисунок 1.11 - 3D принтер Roland ARM-10

Характеристики принтера наведено в таблиці 1.2.

На рисунку 1.12 показаний об'єкт, виготовлений на принтері Roland ARM-10.

Складні вироби, які раніше вимагали багато осевої механічної обробки, наприклад, деталі з порожнинами всередині виробу, як і об'єкти з фігурними наскрізними отворами тепер можуть бути надруковані дуже легко і швидко.

Таблиця 1.2 - Характеристики Roland ARM-10

Загальні відомості	
Розміри (мм)	635x430x450
Маса (кг)	17
Країна виробник	Японія
Технічні характеристики	
Спеціалізація	Для дому; Освіти; Дизайн; Сувенірна продукція; Моделювання; Макетування
Якість друку (мм)	0,2
Технологія друку	SLA; DLP
Область побудови (мм)	130x70x70
Інтерфейс	USB
Швидкість друку (мм/час)	10



Рисунок 1.12 - Приклад роботи Roland ARM-10.

У підвісній системі вирощування об'єкта, полімер витрачається мінімально, тому знижується і собівартість готової моделі. Високоточний 3D принтер для

швидкого прототипування ARM-10 володіє доброзичливим інтерфейсом, і є ідеальним інструментом для реалізації різного роду ідей.

### 1.3.3 3D Systems ProJet 360 (ZPrinter 350)

Модель струминного монохромного 3D-принтера ProJet 360 (рисунок 1.13) є прикладом першого однокольорового автоматизованого 3D-принтера. З його допомогою можна виготовити досить велику модель. Відрізняється високою швидкістю і простий у використанні. Підходить для використання в офісі для створення монохромних моделей. Може використовуватися в самих різних областях: від системи освіти до промислового дизайну.



Рисунок 1.13 – 3D-принтер ProJet 360

В основі технології тривимірної друку лежить принцип пошарового 2D-друку. В процесі виробництва рідкий клейовий склад на водній основі, слугує для склеювання порошку, розподіляється за допомогою струменевої друкуючої головки. Таким чином формуються шари моделі. Клей розподіляється у відповідності з заданою програмою і застигає відразу ж після нанесення. Після формування одного шару принтер перевіряє його товщину і приступає до створення наступного. Після завершення процедури модель витягується з

порошку. Порошок, не використаний в процесі побудови моделі, застосовується для друку подальших моделей.

Характеристики наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристики 3D-принтера ProJet 360

Загальні відомості	
Розміри (мм)	1220x790x1400
Маса (кг)	179
Країна виробник	США
Технічні характеристики	
Спеціалізація	Для дому; Освіти; Дизайн; Сувенірна продукція; Моделювання; Макетування
Якість друку (мм)	0,01
Технологія друку	CJP
Область побудови (мм)	203x254x203
Підтримувальні матеріали	VisiJet PXL
Розширення DPI	300x450
Кількість дюз	304
Інтерфейс	USB; Wi-Fi
Кількість друкуючих головок	1
Колір друку	Монохромний
Швидкість друку (мм/час)	20

Професійний принтер 3D Systems ProJet 360 може бути використаний в різних областях застосування. Наприклад, для створення дизайнерських та архітектурних тривимірних моделей, що використовуються для демонстрації в якості макетів майбутніх виробів. Або в промисловості для виготовлення необхідних шаблонів.

На рисунках 1.14, 1.15 представлені вироби, надруковані на принтері ProJet 360.



Рисунок 1.14 - Макет індукційного датчика



Рисунок 1.15 - Модель комутатора

Для виготовлення моделей в 3D-принтерах серії ProJet x60 використовується композитний матеріал на основі гіпсу VisiJetPXL Core. Він являє собою порошок білого кольору. Сполучною речовиною виступає VisiJet PXL, який може бути безбарвним, блакитним, пурпуровим і жовтим.

### 1.3.4 EOS P 800

EOS P 800 (рисунок 1.16) - новітня модель промислового 3D-принтера для адитивного виробництва. Пристрій призначений для друку високотемпературним пластиком, поліарілефіркетеном, із застосуванням технології лазерного спікання. Процес тривимірного друку здійснюється під температурою до 385°C. Досить велика робоча зона дозволяє створювати моделі до 700x380x560мм. Мінімальна товщина шару друку становить 0,12 мм. Пристрій оснащений лазером регульованої потужності, що дозволяє працювати з багатьма видами матеріалів.



Рисунок 1.16 - 3D принтер EOS P 800

Характеристики принтера EOS P 800 наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Характеристики EOS P 800

Загальні відомості	
Розміри (мм)	2250x1550x2100
Маса (кг)	2300

## Продовження таблиці 1.4

Країна виробник	Німеччина
Технічні характеристики	
Спеціалізація	Автомобільна; Аерокосмічна промисловість; Макетування; Оборона промисловість
Якість друку (мм)	0,02
Технологія друку	SLS
Область побудови (мм)	700x380x550
Інтерфейс	Ethernet
Тип; потужність лазера (Вт)	CO <sub>2</sub> ; 2x50

## 1.4 Огляд 3D-принтерів для металів

## 1.4.1 Concept Laser Mlab R

Concept Laser Mlab R (рисунок 1.17) – промислова установка для адитивного виробництва методом вибіркової лазерної плавки за запатентованою технологією LaserCUSING. Компактне рішення адитивного виробництва для деталей зі складними структурами і високою якістю поверхні. Установка здатна працювати з реактивними і тугоплавкими матеріалами. Mlab R буде ідеальним рішенням для стоматологічних лабораторій і ювелірного виробництва, де крім традиційних матеріалів необхідно застосування Титану. Завдяки використанню вакуумної робочої камери і автоматичної системи перезарядки, можлива робота з реактивними матеріалами без контамінації витратного матеріалу. Мінімальна товщина наносного шару становить 20мкм, максимальний розмір виробів сягає 90x90x80мм. Установка оснащена Ethernet інтерфейсом для підключення до локальної мережі.

Формотворчі вставки із замкнутим контуром охолодження, а так само деталі і компоненти для ювелірних виробів, медичної, стоматологічної, автомобільної та аерокосмічної галузі можуть бути виготовлені за допомогою технології

LaserCUSING – пошарового процесу вирощування.



Рисунок 1.17 – Принтер Concept Laser Mlab R

LaserCUSING відкриває нові можливості для підвищення ефективності і швидкості роботи, більш продуктивного розвитку продукту. Екологічна технологія – LaserCUSING – це виробничий процес, який майже не виробляє відходів. Металевий порошок, який не розплавився, може бути повторно використаний для подальших процесів.

Характеристики принтера Concept Laser Mlab R наведені в таблиці 1.5.

Крім того, сам лазерний процес відбувається повністю без шкідливих викидів. Завдяки тому, що компанія Concept Laser застосовує високоефективні лазерні системи, більша частина енергії, яка вводиться в компонент, йде саме на робочий процес.

На рисунках 1.18 і 1.19 представлені приклади виробів, виготовлених даними принтером.



Таблиця 1.5 - Характеристики Concept Laser Mlab R

Загальні відомості	
Розміри (мм)	1220x705x1400
Маса (кг)	500
Країна виробник	Німеччина
Технічні характеристики	
Спеціалізація	Автомобільна промисловість; Аерокосмічна промисловість; Макетування; Оборонна промисловість; Ювелірна промисловість; Стоматологія
Якість друку (мм)	0,02
Технологія друку	LC
Область побудови (мм)	90x90x80
Інтерфейс	Ethernet



Рисунок 1.18 – Кронштейни

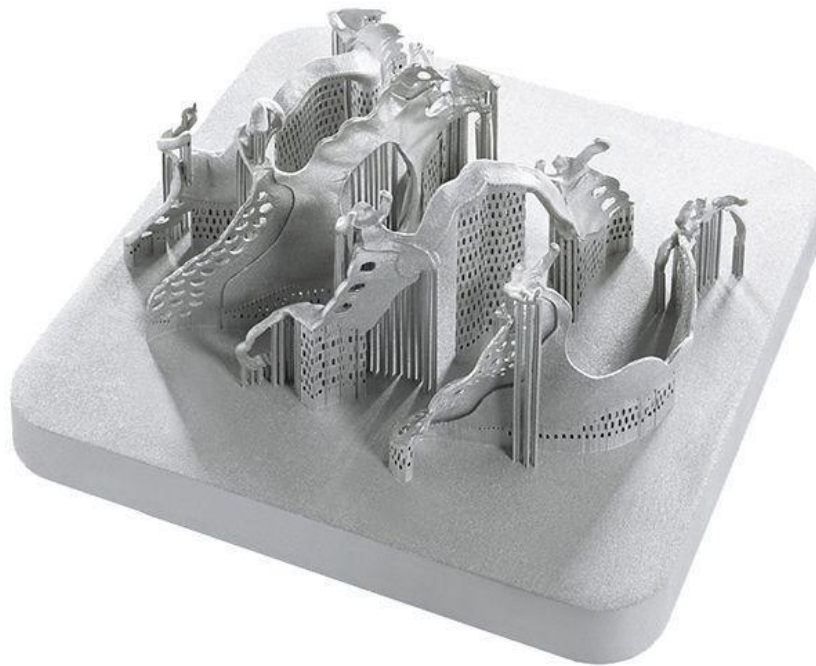


Рисунок 1.19 – Приклад виробу

#### 1.4.2 Concept Laser X line 1000R

Concept Laser X line 1000R (рисунок 1.20) - промисловий 3D-принтер для виробництва методом лазерного наплавлення і використанням новітньої технології LaserCusing. Пристрій дозволяє здійснювати друк різними металами і сплавами. Використовуючи вакуумну камеру, ви зможете працювати з реактивними металами, наприклад такими, як титан. Лазерна плавка дозволяє досягти відмінної точності з товщиною шару в 0,02 мм. 3D-принтер оснащений столами для безперервного процесу виробництва. Максимальні розміри друкованих деталей: 630 x 400 x 500 мм.

Характеристики принтера наведено в таблиці 1.6.

Кожух реактивного двигуна, представлений на рисунку 1.21, виготовлений на принтері Concept Laser X line 1000R. Успішно пройшов випробування.



Рисунок 1.20 – Принтер Concept Laser X line 1000R

Таблиця 1.6 – Характеристики Concept Laser X line 1000R

Загальні відомості	
Розміри (мм)	4415x3070x3900
Маса (кг)	8000
Країна виробник	Німеччина
Технічні характеристики	
Спеціалізація	Аэрокосмічна промисловість; Виробництво; Медицина; Моделювання; Макетування; Стоматологія; Автомобільна промисловість
Якість друку (мм)	0,02
Технологія друку	LC
Область побудови (мм)	630x400x500

## Продовження таблиці 1.6

Підтримувальні матеріали	Алюмінієві сплави; Нікелевий сплав; Титанові сплави; Титан; Дорогоцінні метали; металеві порошки
Формат моделі	STL
Інтерфейс	Ethernet
Швидкість друку(см3/час)	10-100

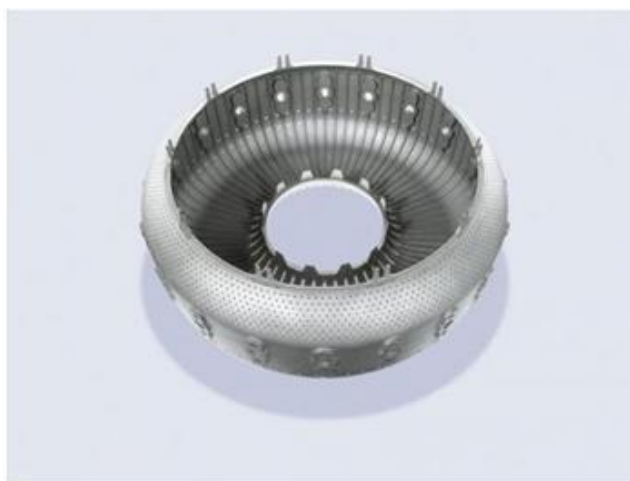


Рисунок 1.21 - Кожух турбіни реактивного двигуна

## 1.4.3 SLM 500HL

SLM 500 HL (рисунок 1.22) – установка селективного лазерного плавлення металів з великою робочою камерою (500x280x330мм). Застосовується для одиничного і дрібносерійного виробництва складних виробів із спеціальних металевих порошків: нержавіючої та інструментальної сталі, алюмінієвих, титанових сплавів, інконель, кобальт-хрому. SLM 500 HL є найпродуктивнішою установкою селективного лазерного плавлення серед всіх форматів SLM-машин, представлених на ринку. Процес побудови виробів повністю автоматизований і не вимагає присутності оператора після запуску машини.



Рисунок 1.22 – 3D-принтер SLM 500 HL

Установка SLM 500 HL, обладнана відразу 2 або 4 лазерами, дозволяє найкращим чином задовольнити будь-які виробничі потреби. Можливість регулювання плями лазера дає можливість вибирати між максимальною точністю або високою швидкістю побудови на простих ділянках. Базову версію установки SLM 500HL з двома (2x400 Вт) лазерами опціонально можна вдосконалити до версії з чотирма (4x400 Вт) лазерами.

3D-принтер SLM 500 HL здатний виробляти до 105 см<sup>3</sup> металевих виробів в годину. Він є флагманом серії і випереджає по ефективності найближчу модель середнього формату (SLM 280) в 2 рази. Мінімальна товщина стінки – 150 мкм. Пляма лазера автоматично регулюється від 80 до 115 мікрон, а мінімальна товщина шару складає всього 20 мікрон.

На рисунку 1.23 представлені лопатки турбін надруковані на даному принтері.



Рисунок 1.23 – Лопатки турбін

## Висновки

- 1) Темп розвитку адитивних технологій з кожним роком зростає, з'являються нові методи відтворення об'єктів, а так само допрацьовуються вже наявні методи з метою отримання більш високої якості кінцевого виробу.
- 2) На даний момент 3D-принтер здатний забезпечити точність виготовлення 20мкм.
- 3) У технологіях 3D-друку використовуються практично всі відомі конструкційні матеріали крім тугоплавких, таких як вольфрамокобальтові сплави, але з установкою лазера потужністю 1 кВт в принтер SLM 500HL ця проблема вирішується.
- 4) У всіх галузях промисловості можливе застосування тривимірного друку, але не в усіх галузях даний метод виготовлення деталей ще застосовується у зв'язку з малим поширенням технологій і дорогим виготовленням.

## 2 Можливості адитивних технологій

Застосування тривимірного друку можливо в двох перспективних напрямках, таких як макетування об'єктів і створення реальних деталей, що використовуються в промисловості. Нижче розглянемо кожен напрямок окремо [20].

### 2.1 Можливості тривимірного друку в макетуванні об'єктів

Створення масштабних об'єктів грає важливу роль в навчальному процесі і процесі проектування деталей машин і механізмів. Так само на масштабних макетах проводяться первинні експерименти для оцінки обладнання і можливості виробництва його в реальних розмірах з необхідних матеріалів, або прийняття рішення про доопрацювання деталі і обладнання в цілому.

Швидке прототипування є одним з основних факторів для використання тривимірного друку. Під швидким прототипуванням розуміється створення прототипу виробу за максимально коротким терміном. Воно входить до числа основних застосувань технологій адитивного виробництва. Прототип – це прообраз виробу, необхідний для оптимізації форми деталі, оцінки її ергономіки, перевірки можливості складання і правильності компоновальних рішень. Ось чому скорочення терміну виготовлення деталі дозволяє значно скоротити час розробки. Також прототип може бути моделлю, призначеною для проведення аеро- і гідродинамічних випробувань або перевірки функціональності деталей корпусу побутової та медичної техніки. Багато прототипів створюється як пошукові дизайнерські моделі з нюансами в конфігурації, кольоровій гамі розмальовки та т.д. Для швидкого прототипування використовуються недорогі 3D-принтери.

3D-друк в цьому напрямку має масу переваг перед традиційним створенням макетів і зразків:

- Швидкість створення об'єкта;

- Точність виготовлення;
- Широкий спектр матеріалів з різними характеристиками;
- Кінцева низька вартість.

В Інституті нафти і газу Сибірського федерального університету технологія 3D-друку для створення макетів вже використовується. На 3D-принтері RepRap, що використовує технологію FDM, була надрукована модель лопаткового долота з поворотними різцями. Дане долото було розроблено студентом кафедри технологічних машин і устаткування нафтогазового комплексу в рамках наукової роботи. На рисунку 2.1 представлена дана модель.



Рисунок 2.1 - Модель лопаткового долота

Так само, кафедрою ТМіОНГК був створений макет редуктора, так само представлений на рисунку 2.1 на задньому плані. Даний прототип був виготовлений методом стереолітографії.

Макетування окремих одиниць обладнання не є межею можливостей для тривимірного друку. Макети бурових вишок з усім попутним обладнанням, макети шельфових платформ в масштабі, так само можливо виготовити за допомогою 3D-друку.



## 2.2 Можливості тривимірного друку реальних об'єктів промисловості

Незважаючи на значну кількість плюсів тривимірного друку в макетуванні об'єктів, створення реальних деталей викликає більший інтерес.

Технології адитивного виробництва в промисловості мають великі перспективи. Дрібносерійне виробництво виробів зі складною геометричною формою і зі специфічних матеріалів поширене в нафтогазовій галузі, суднобудуванні, енергетичному машинобудуванні, відновній хірургії і дентальній медицині, аерокосмічній промисловості. Безпосереднє вирощування виробів з металу тут мотивовано економічною доцільністю, адже цей спосіб виробництва виявився менш витратним. З використанням адитивних технологій виробляють робочі деталі приводних механізмів і валів, імпланти і ендопротези, запасні частини для автомобілів і літаків. Розвитку швидкого виробництва сприяло і значне розширення числа доступних металопорошкових матеріалів. Якщо у 2000 роках налічувалося 5-6 видів порошків, то зараз пропонується широка номенклатура, що обчислюється десятками композицій від конструкційних сталей до дорогоцінних металів і жароміцних сплавів. Перспективні адитивні технології і в машинобудуванні, де їх можна використовувати при виготовленні інструментів і пристосувань для серійного виробництва – вставок для термопласт-автоматів, прес-форм, шаблонів [3].

У використанні адитивних технологій в промисловості варто виділити три напрямки: підвищення надійності обладнання, підвищення ремонтпридатності обладнання, виготовлення принципово нового обладнання.

### 2.2.1 Підвищення надійності обладнання

Перед конструкторами стоїть серйозне завдання – це підвищення надійності обладнання, тим самим зменшення втрат, пов'язаних з простоями устаткування в неробочому стані.

Обладнання саме по собі є надійним і невибагливим, адже проектувалося для

суворих умов роботи, але з часом надійність зменшується і вже не досягає необхідного рівня. Традиційні методи ремонту і відновлення здатні повернути повну працездатність, але не надійність, отже, після кожного наступного ремонту напрацювання обладнання зменшується, поки не настане критичний момент, коли ремонт недоцільний, і обладнання списують в утилізацію. Так само на передчасну відмову обладнання впливає агресивне середовище, при якому устаткування не виробляє і 50% терміну служби [3].

Використання технологій тривимірного друку дозволить підвищити надійність обладнання, не вдаючись до конструктивного втручання в обладнання. Домогтися підвищення надійності можливо двома шляхами. Перший шлях – це застосування матеріалів для виготовлення деталей обладнання з поліпшеними експлуатаційними характеристиками і властивостями. Другий шлях – виготовлення деталей обладнання одним масивом, виключаючи зварювальні і паяні з'єднання.

### 2.2.1.1 Використання нових матеріалів

Ряд матеріалів для тривимірного друку досить великий і сягає аж до металокераміки, з абсолютно різними властивостями і характеристиками. Всі ці матеріали давно відомі і застосовуються в промисловості, проте, через специфічність обробки окремих матеріалів, таких як титанові сплави, тверді сплави, металокераміка область їх застосування досить вузька. З даних матеріалів виготовлялися прості деталі, переважно методом гарячого пресування [5].

Метод гарячого пресування має ряд недоліків:

- Складність виготовлення прес-форм, чим обумовлена простота виробів;
- Усадка кінцевого виробу;
- Тривалість за часом.

В даний час виготовляються тільки пластинки і різці з твердого сплаву.

Тривимірний друк методом вибіркового лазерного плавлення не володіє даними недоліками в порівнянні з методом гарячого пресування, тому можливість

варіювати матеріал зростає в рази [3].

#### 2.2.1.1.1 Підвищення надійності турбокомпресора

Для прикладу пропонується розглянути турбокомпресор двигуна внутрішнього згоряння, схематичне зображення якого представлено на рисунку 2.2.

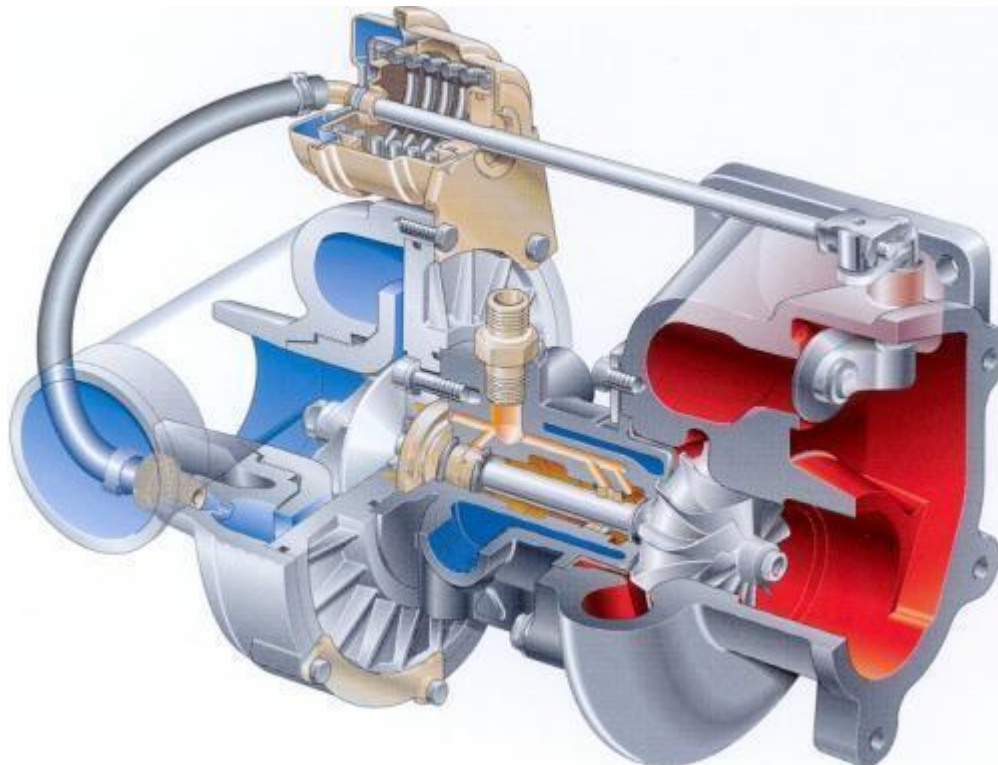


Рисунок 2.2 - Турбокомпресор ДВС

Принцип роботи турбокомпресора заснований на перетворенні енергії руху відпрацьованих газів в механічну енергію руху крильчаток. Вихлопні газы потрапляють на крильчатку турбіни, тим самим розкручуючи її і вал з яким вона з'єднана. На іншому кінці вала закріплена друга крильчатка компресора, що нагнітає повітря в циліндри двигуна. При використанні турбонадува повітря в циліндри подається під тиском, а не за рахунок розрідження, створюваного поршнем. В двигун потрапляє більша кількість суміші, отже, при згорянні збільшується обсяг утворюваного газу і відповідно виникає велика сила, що впливає на поршень [9].

Турбокомпресор є невід'ємною частиною надпотужних і високомоментних двигунів, від його надійності безпосередньо залежить надійність самого двигуна і обладнання на якому даний двигун використовується. Тому вартість турбокомпресора досить висока і поломка даної одиниці обладнання тягне за собою великі фінансові втрати.

Турбокомпресор має дві найбільш часті причини виходу з ладу. Одна з них осьовий люфт вала крильчаток, другою причиною є механічне пошкодження самих крильчаток. Розберемо кожну поломку окремо [19]. Оскільки турбокомпресор працює постійно при високих температурах, що доходять до 450°C і високих кутових швидкостях, відбувається прискорений знос підшипників ковзання (рисунок 2.3) валу крильчаток. Через підшипник проходить маслоканал для гідродинамічного змащення і охолодження підшипника вала. По мірі зносу, збільшується зазор між валом і підшипником, через який починає просочуватися масло і потрапляти в робочі порожнини турбокомпресора. Тиск масла в маслосистемі падає, забезпечення необхідного змазування не представляється можливим, ефект гідродинамічного змащення пропадає. Інтенсивність зношування збільшується [10].



Рисунок 2.3 - Підшипники ковзання турбокомпресора

Матеріалом виготовлення підшипників є Бр.АЖС7-1,5-1,5. З допомогою 3D-друку методом SLM, можна виготовити дані підшипники ковзання з залізграфіта. Даний матеріал має більшу зносостійкість, менший коефіцієнт

тертя і несе більше навантаження. Порівняльні дані приведені в таблиці 2.1. Використання даного матеріалу дозволить збільшити напрацювання турбокомпресора. Такий висновок можна зробити виходячи з результатів застосування металокерамічних вкладишів в парових турбінах. У масштабі масового виробництва заміна бронзових підшипників ковзання залізографітовими може привести до більшої економії [6].

Таблиця 2.1 - Порівняльні дані матеріалів

	Навантаження, кг/см <sup>2</sup>	Коеф. тертя без мастила	Коеф. тертя з мастилом	Коеф. лінійного розширення
Бронза	120-140	0,12-0,16	0,03-0,7	7-10
Залізографіт	150-200	0,09-0,1	0,009-0,01	9-11

При інтенсивній роботі турбокомпресора підвищується температура вихлопних газів двигуна. Гази високої температури на високій швидкості впливають на лопатки крильчатки, товщина яких може досягати 1 мм., тим самим створюючи локальний перегрів і деформацію лопаток. Згодом лопатки просто згорають, як показано на рисунку 2.4, ККД турбокомпресора падає [10].



Рисунок 2.4 - Дефект лопаток крильчатки

У міру зменшення ККД, падає продуктивність турбокомпресора, отже, падає потужність двигуна, збільшується кількість споживаного палива, і подальша експлуатація стає неефективною

Дану проблему можна вирішити, використовуючи більш жаростійкий матеріал ТНМ20. Він здатний зберігати свої властивості до 900°C, так само крильчатка з металокераміки буде володіти меншою масою, отже, момент інерції так само зменшиться, що дозволить турбокомпресору виходити на максимальну потужність за більш короткий час.

#### 2.2.1.1.2 Підвищення надійності турбобура

З розвитком технологій буріння, збільшенням швидкості проходження свердловини, досягненням більшої глибини, вимоги по надійності і продуктивності до обладнання різко посилилися, і вже більша частина обладнання не задовольняє пропонованим до нього вимогам. Відмова в роботі навіть одного елемента при бурінні призведе до простоїв, що в свою чергу призведе до значних економічних втрат [3].

Турбобур – це забійний гідравлічний двигун, вал якого обертає багатоступенева гідравлічна турбіна, перетворює гідравлічну енергію промивної рідини в механічну. Сучасний турбобур повинен мати напрацювання на відмову не менше 800 годин, інакше його використання буде нерентабельним. При роботі турбобура зносу схильні в основному радіальні опори, запобіжні осьові п'яти і крильчатки турбін (рисунок 2.5) [4].

На даний момент крильчатки виготовляються методом лиття з наступною механічною і термічною обробкою. Товщина зміцненого шару на робочій поверхні лопатки турбіни не перевищує 1 мм. Згодом, через абразивні частинки промивної рідини, цей шар руйнується, що призводить до прискореного зносу турбін і різкого зниження ККД турбобура. За статистичними даними, цей момент настає після 130- 180 годин напрацювання турбобура, в залежності від умов буріння і складу промивної рідини. Так само до зниження ККД веде знос

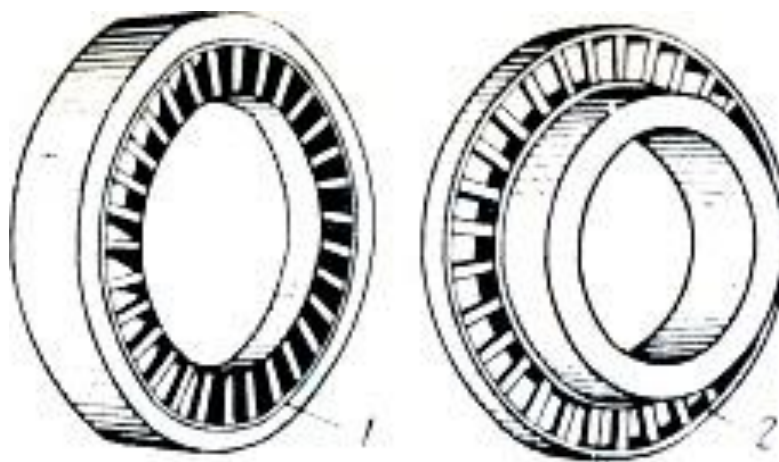


Рисунок 2.5 – Крыльчатки турбобура

радіальних опор і запобіжних осьових п'ят. При їх зносі в турбобурі з'являються люфти і зазори, через які відбувається витік промивної рідини, що веде до зміни перепаду тиску і втрати потужності турбобура. При зниженні ККД зменшується швидкість проходження свердловини, збільшується витрата промивальної рідини, що, безсумнівно, веде до економічних втрат [4].

Для виготовлення крильчаток турбін турбобура пропонується застосувати порошок твердого сплаву, зокрема вольфрамокобальтового сплаву ВК6, з вмістом 94% вольфраму і 6% кобальту. Зносостійкість отриманої крильчатки буде в 3-3,5 рази вище, ніж стандартної. Після завершення процесу друку необхідна механічна обробка поверхні, поєднаної з ротором. Обробка інших поверхонь не потрібно. Плюсом даної крильчатки є мінімум механічних операцій, які необхідно здійснити до безпосередньої установки на вал ротора, збільшений термін служби, за рахунок збільшення зносостійкості і твердості (92 HRA) [11].

Виготовлення радіальних опор і запобіжних осьових п'ят планується проводити з металокераміки ТНМ20. Згідно з розрахунками термін служби опор і п'ят в турбобура збільшиться до 2700 годин, що більше ніж в три рази перевищує напрацювання стандартних радіальних опор і запобіжних п'ят [4].

Застосування даних крильчаток, опор і п'ят не вимагає втручання в конструкцію турбобура. Так само вони не вплинуть на початкові характеристики (ККД, потужність, обороти), тому вони можуть поставлятися як в зборі з турбобуром, так і окремо як ремонтний комплект, і встановлюватися

безпосередньо в ремонтних підрозділах.

Ефект від застосування крильчаток, радіальних опор і запобіжних осьових п'ят, виготовлених методом прямого лазерного спікання порошку твердого сплаву полягає в підвищенні надійності турбобура, збільшенні напрацювання до 3000 годин, в залежності від умов буріння і застосовуваної промивної рідини. Завдяки тому, що весь масив деталі має однакові якості міцності, то знос буде рівномірним, і зменшення ККД буде проходити плавно, підкоряючись лінійному закону, до самої зони нерентабельності (Рисунок 2.6). Так само до явних плюсів відноситься те, що турбобур стає менш вибагливий до складу промивної рідини.

Пропонований спосіб природно призведе до збільшення вартості турбобура, але застосування деталей з твердого сплаву дозволить збільшити надійність і час напрацювання турбобура більш ніж в три рази. Отже відпаде необхідність двох замінів турбобура з підйомом всіх бурових труб, що знижує кількість важкої фізичної праці людини, знижує час простою всієї бурової вишки. У сукупності ці фактори компенсують вартість.



Рисунок 2.6 - Графік залежності ККД турбобура від часу напрацювання



З розвитком напрямку лазерного спікання вартість турбобура зменшиться, що в свою чергу призведе до ще більшої економічної вигоди [1].

### 2.2.1.2 Виготовлення цілісних конструкцій

Велика частина промислового обладнання та машин працюють в жорсткому режимі експлуатації. Однією з важливих складових є умови, що забезпечують необхідну роботу обладнання. До таких умов можна віднести високу температуру, надлишковий тиск, граничні механічні навантаження. Статистика відмов обладнання показує, що на вихід обладнання з ладу через дефект в місці з'єднання доводиться до 18% всіх поломок. До таких дефектів відносяться прогари прокладок, руйнування прокладок і ущільнень через підвищений тиску і агресивності середовища. Місця з'єднань є слабкою ланкою кожної одиниці обладнання.

#### 2.2.1.2.1 Гідроблок коробок передач

Прикладом може служити гідроблок автоматичної коробки перемикачів передач, або коробки відбору потужності. Основна причина відмови гідроблока – утомлююче руйнування ущільнюючої прокладки, внаслідок чого відбувається перепуск гідравлічної рідини між каналами, отже, некоректна робота обладнання, або його повна відмова. На рисунку 2.7 показана схема гідроблока автоматичної коробки передач. Прокладка знаходиться між двох плит гідроблока. Відстань між каналами не перевищує 2 мм.

Гідроблок – це складний пристрій управління, вартість якого досить висока. Ремонт гідроблока може здійснюватися тільки спеціалізованим майстром високої кваліфікації. Гідроблок виготовляється методом лиття під тиском з подальшим фрезеруванням поверхонь дотику плит. Лиття корпусу гідроблока єдиною деталлю неможливо через велику кількість внутрішніх каналів складної форми, як показано на рисунку 2.8.

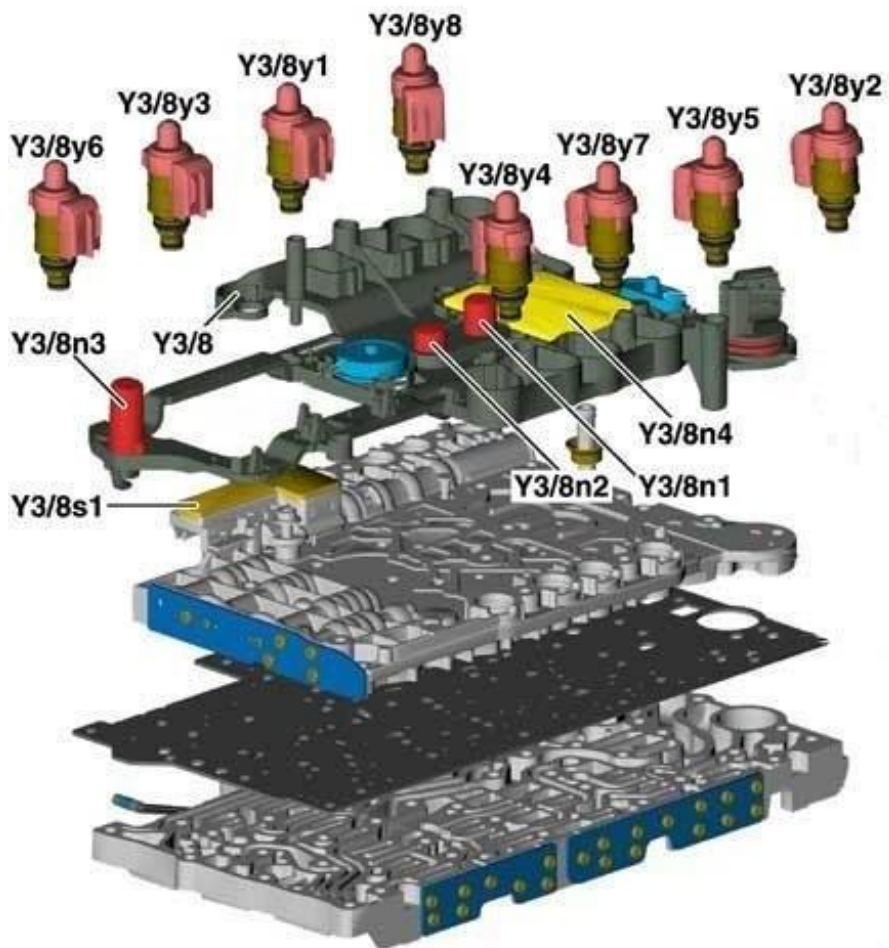


Рисунок 2.7 – Схема гідроблока АКПП

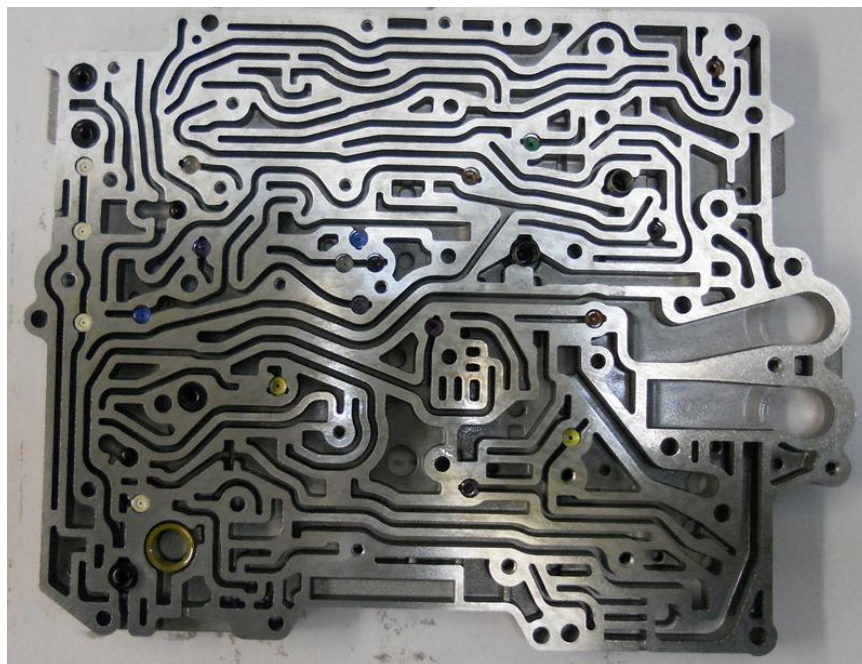


Рисунок 2.8 - Канали гідроблока

Пропонується виготовляти гідроблок єдиною деталлю методом SLM. Даний метод виготовлення дозволить відтворити канали гідроблоку з високою точністю в корпусі. Плюсами даної технології перед литтям у виготовленні гідроблоків є швидкість виготовлення, точність, міцність, відсутність гвинтового з'єднання в корпусі, що в свою чергу підвищить надійність гідроблоку та обладнання в цілому, знизить витрати на ремонт. Так само цільний корпус дозволить підвищити тиск у каналах, отже, підвищити продуктивність обладнання без втрати надійності.

#### 2.2.1.2.2 Реактивний двигун

Крім гідроблока в техніці є безліч механізмів зі складною внутрішньою структурою, яка значно ускладнює процес виготовлення. Наприклад, при виготовленні ракетного двигуна особливу складність представляє створення внутрішніх паливних каналів для палива в спідниці двигуна, які несуть крім функції паливозабезпечення ще й функцію охолодження. При тривимірному друці методом SLM таких проблем немає, можна створювати внутрішню структуру будь-якої складності. Метод селективного лазерного плавлення дозволить створювати ракетні двигуни маленьких розмірів з високою надійністю і високим ККД. Пробні моделі вже виготовляються за підтримки NASA [1].

В SolidWorks була розроблена тривимірна модель реактивного двигуна (рисунок 2.9) в реальному масштабі з усією внутрішньою структурою.

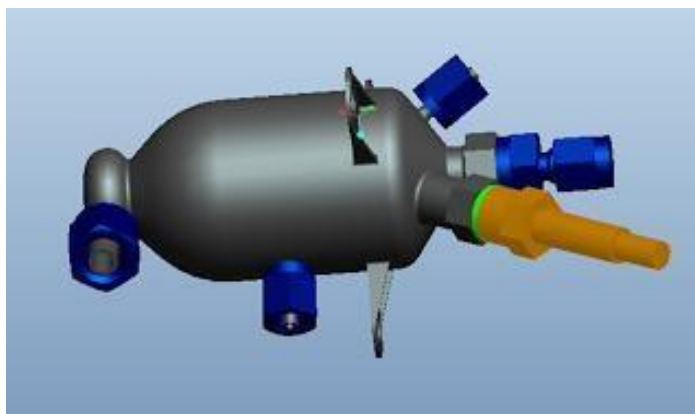


Рисунок 2.9 – 3D модель реактивного двигуна

Далі на 3D-принтері двигун (рисунок 2.10) був роздрукований і підготовлений до вогневих випробувань. Робота виконувалася принтером SLM 500HL. Технологія друку- SLM.



Рисунок 2.10 - Роздрукований реактивний двигун

Вогневі випробування, показані на рисунку 2.11 проводилися з постійним контролем температури сорочки охолодження, температури газу і температури палива, а також створюваного зусилля. На рисунку 2.12 показана залежність температури сорочки охолодження сопла від часу випробувань.

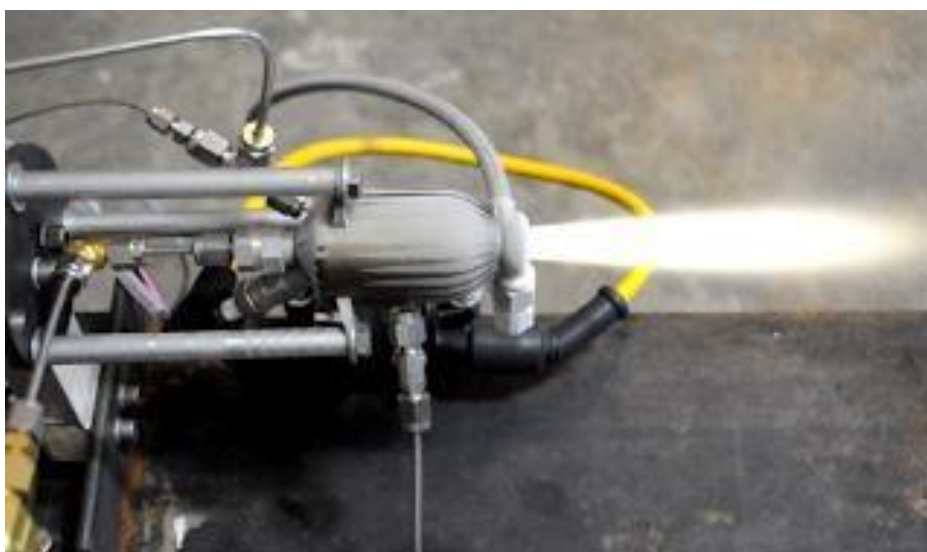


Рисунок 2.11 - Випробування реактивного двигуна

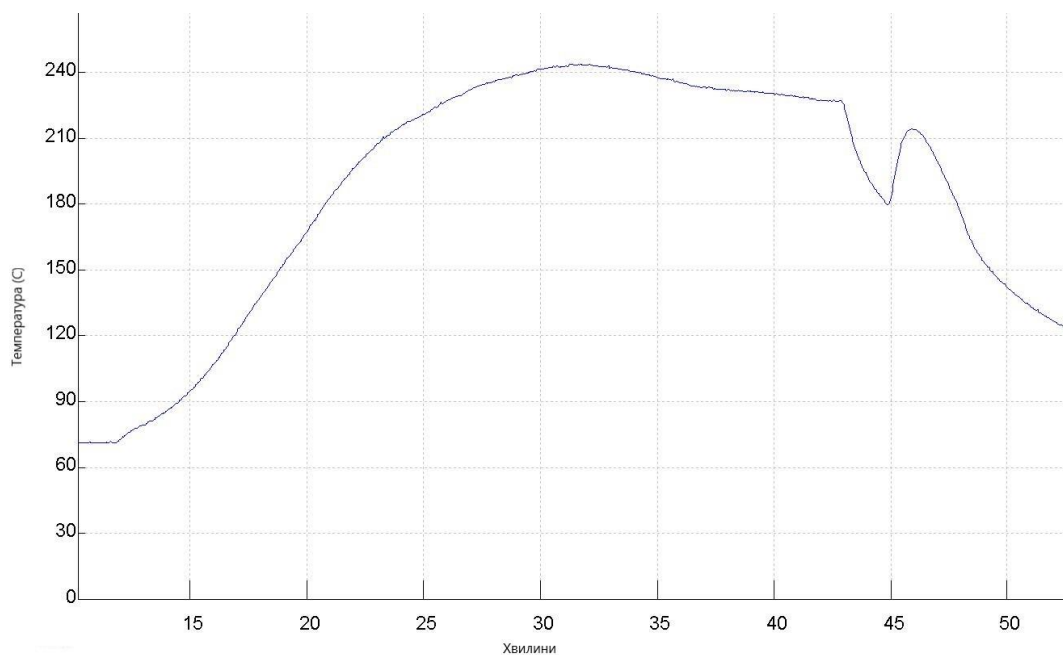


Рисунок 2.12 - Графік залежності температури охолоджуючої сорочки від часу

Як показали випробування, технологія тривимірного друку придатна для використання у виробництві. Деталь, виготовлена методом SLM, здатна витримувати високі температури і механічні навантаження.

#### 2.2.1.2.3 Мікрореактори

Інженерами-конструкторами на підставі креслень була розроблена 3D модель мікрореактора, представлена на рисунку 2.13.



Рисунок 2.13 - Хімічний реактор

Після проектування модель мікрореактора була надрукована з нержавіючої

сталі на 3D-принтері. Після друку зовнішню поверхню мікрореактора відполірували і нарізали різьбу для штуцера подачі водню.

Серія випробувань проводилася протягом декількох місяців. Режим роботи установок становить 24 години на добу. Тиск в реакторі був від 30 до 50 бар, в залежності від плану експерименту, температура від 150°C до 500°C. У реакторі отримували високооктанові компоненти бензину, необхідні для виробництва бензинів класу Євро-5. Після успішних випробувань замовник вирішив замовити вже партію мікрореакторів, надрукованих на 3D-принтері. Вартість мікрореактора склала близько 500 доларів, що для аналогічних мікрореакторів, виготовлених традиційними способами, приблизно в 10-15 разів дешевше. Процес традиційного виготовлення – це зварювання, токарна обробка, збірна конструкція. Орієнтовна вартість мікрореактора 5000-7500 \$ за штуку.

### 2.2.2 Підвищення ремонтпридатності обладнання

Значущу частину обладнання у виробництві займає обладнання імпортного виробництва. Імпортні виробники, на відміну від російських, не завжди готові запропонувати ЗІП до обладнання, що змушує споживачів купувати обладнання в зборі або окремими вузлами. Даний підхід вигідний виробнику, але не вигідний споживачеві, тому що через найменшу поломку доводиться міняти вузол обладнання.

Ремонтпридатність такого обладнання досить низька через відсутність запчастин. Однак, маючи на ремонтному майданчику 3D-сканер і 3D-принтер, ремонтні можливості розширяються.

Інший аспект підвищення ремонтпридатності пов'язаний із зовнішніми політичними відносинами між державами. В даний час, торговельні відносини Росії з деякими країнами утруднені, у зв'язку з цим постає проблема забезпечення виробництва запасними частинами для обладнання. Наприклад, запасні частини на обладнання американського виробництва стали менш доступними, доставка супроводжується рядом проблем, що в свою чергу збільшує час поставки.

Устаткування турецького виробництва завжди відрізнялося хорошим співвідношенням ціна-якість, тому практично на кожному виробництві можна зустріти обладнання, виготовлене в даній країні. Однак, у зв'язку з підвищенням курсу долара по відношенню до рубля і призупиненням торгових відносин між Росією і Туреччиною, поставка як обладнання, так і ЗІП неможлива, що негативно позначається на підтримці виробництва.

У таблиці 2.2 наведені розрахункові значення вартості виготовлення і часу виготовлення деяких деталей промислового обладнання, а так само наведені значення ринкової вартості деталей.

Таблиця 2.2 - Аналіз вартостей запасних частин

Найменування	Вартість деталей, тис. грн.	Вартість виготовлення 3D- друком, тис. грн	Розрахунковий час виготовлення, час
Підшипник ковзання	1.5-3.5	1-2.25	0,4
Крильчатка турбіни	8	6	8
Гідроблок АКПП	8.5-15	7.5-24	21
Різець долота	0,45	0.85	1,5

Застосування технологій тривимірного друку в ремонтних підрозділах на виробництвах дозволить позбутися ряду проблем:

- Відсутності запасних частин обладнання;
- Перенасичення складських приміщень запасними частинами;
- Тривалої поставки ЗІП;
- Залежності забезпечення запасними частинами і приладдям від курсу валют і зовнішньоекономічних відносин.

### 2.2.3 Виготовлення принципово нового обладнання

На даний момент існує безліч розробок обладнання, які ще не реалізовані, у зв'язку з труднощами його виготовлення. До таких труднощів відносяться: складна геометрична форма, внутрішні порожнини, необхідність використання матеріалу, що важко піддається механічній обробці.

Одним з такого обладнання є гідравлічний розподільник пропорційного регулювання з поворотним золотником, представлений на рисунку 2.14.

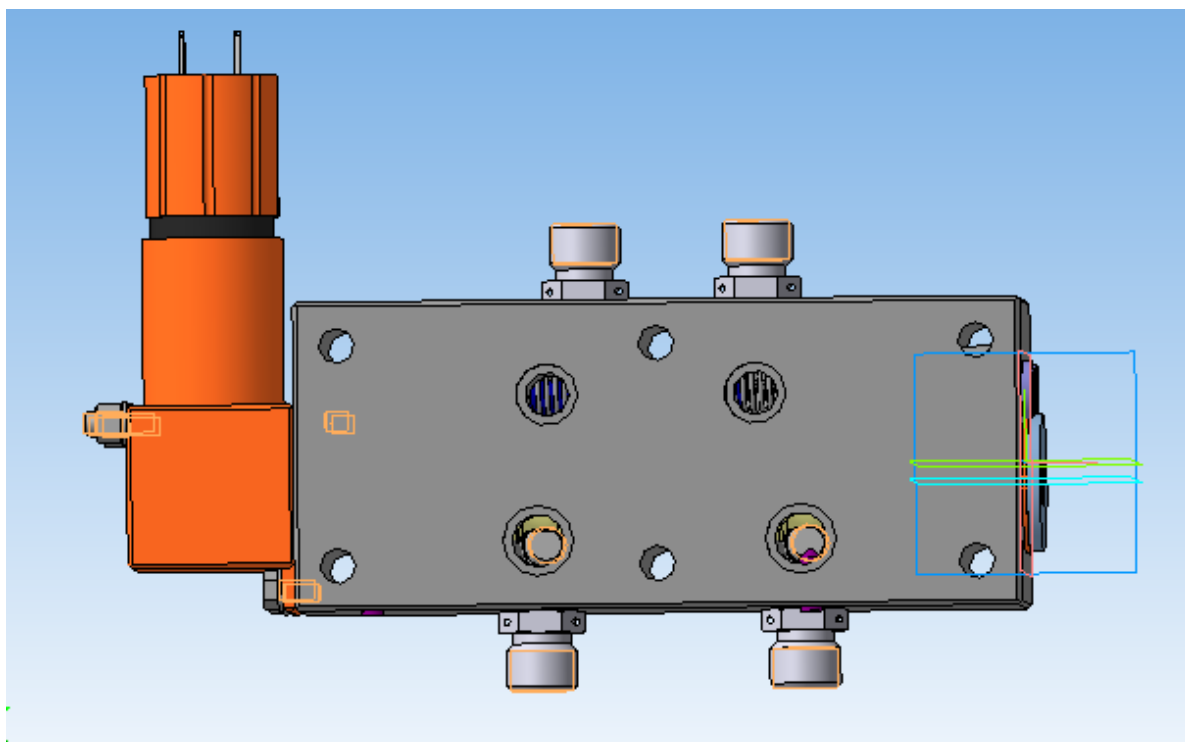


Рисунок 2.14 – Модель гідравлічного розподільника

Проблемами виготовлення даного розподільника є каплевидні отвори і внутрішні порожнини золотника (рисунок 2.15). Так само до проблем можна віднести складність каналів в корпусі розподільника (рисунок 2.16). Виготовлення традиційними методами не представляється можливим.



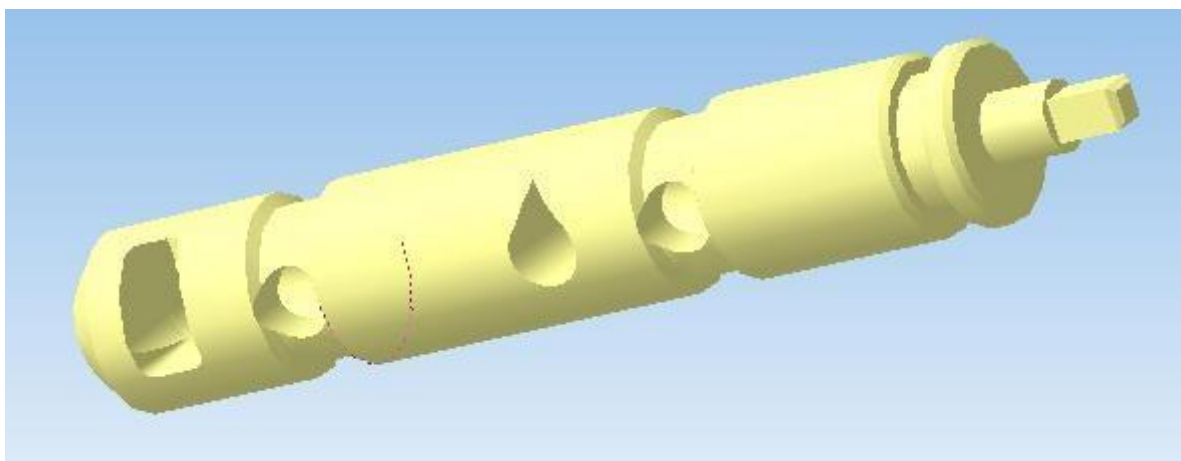


Рисунок 2.15 - Модель золотника

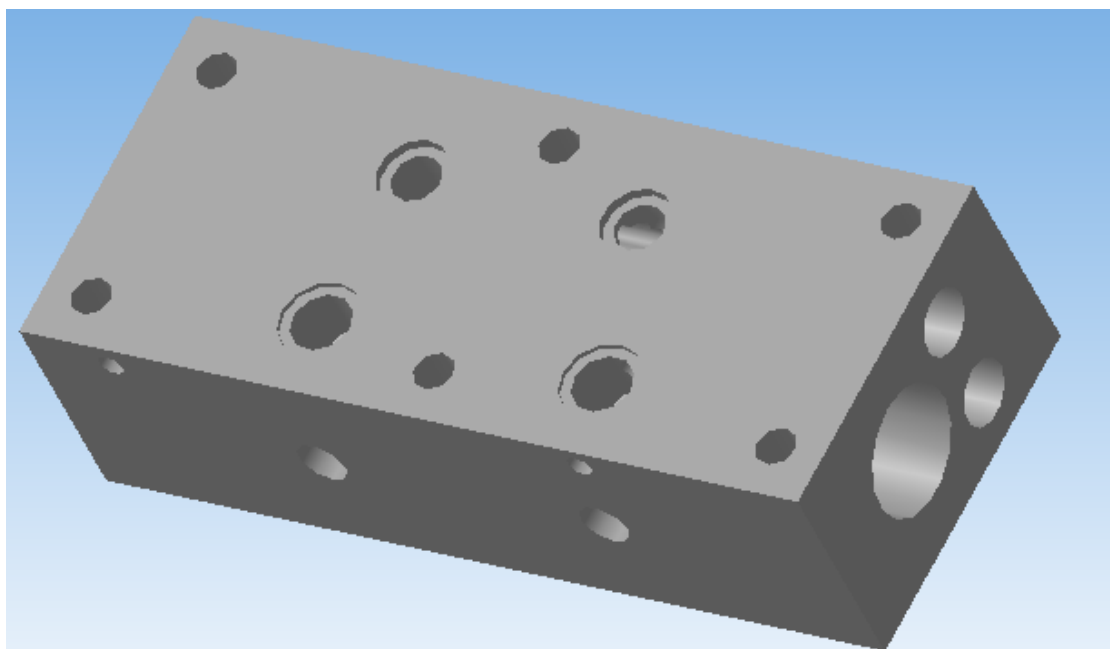


Рисунок 2.16 - Модель корпусу гідророзподільника

Проаналізувавши всі можливі методи виготовлення, ми прийшли до висновку, що виготовлення даного розподільника можливо лише застосуванням 3D-друку. Для виготовлення даного обладнання підходить метод SLM, так як він здатний спекати як метали, так і кераміку.

## Висновки

1) У розділі були виявлені найбільш перспективні напрямки застосування тривимірного друку в макетуванні та виробництві реальних об'єктів: навчання, підвищення надійності устаткування, підвищення ремонтпридатності обладнання, виготовлення принципово нового обладнання.

2) На кожен напрямок наведені приклади реального обладнання, яке можливо виготовити за допомогою 3D-друку: гідроблок, крильчатка турбіни, підшипники ковзання

3) Виготовлення деталей складної форми з металокераміки методами лазерного спікання стає можливим.

4) При використанні 3D-друку для виготовлення деталей машин і устаткування з'являється можливість підвищити надійність обладнання і збільшити напрацювання на відмову без конструктивної зміни обладнання і машини.

5) Випробування деталей, виготовлених адитивним методом, довели можливість існування даного напрямку виготовлення деталей в реальному виробництві.

### 3 Дослідження і оцінка продуктивності двох 3D FDM принтерів

Розвиток і поширення технології FDM (Fused Deposition Modeling), моделювання методом напалення серед компаній і приватних осіб стало передумовою появи множестов різних принтерів, по конфігурації, конструкції і вартості. Вони володіють різними характеристиками і якістю друку. Щоб зрозуміти відмінність, ми порівнюємо промисловий і персональний 3D принтер [Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades, стр. 1].

#### 3.1 Аналіз

Проведемо аналіз між 3D принтером Dimension Elite (рисунок 3.1) від компанії Stratasys, це промисловий принтер, який використовується в багатьох галузях машинобудування. Має два екструдера, які забезпечені ниткою з ABS-пластика товщиною 1,75 мм. Робочий об'єм складає 200x200x250 мм. Вартість близько 20 000 євро. І 3D Touch (рисунок 3.2) від Bits from Bytes (BFB) персональний принтер, який використовується в дрібних компаніях по швидкому прототипуванню (RP), або приватними особами. Екструзійна головка складається з трьох екструдерів. У екструдери можна подавати пластик діаметром 3 мм через сопло 0,5 мм, з товщиною шару 0.125, 0.25 мм або 0.50 мм. Робочий об'єм 185x265x240 мм.



Рисунок 3.1 – Dimension Elite [Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades]

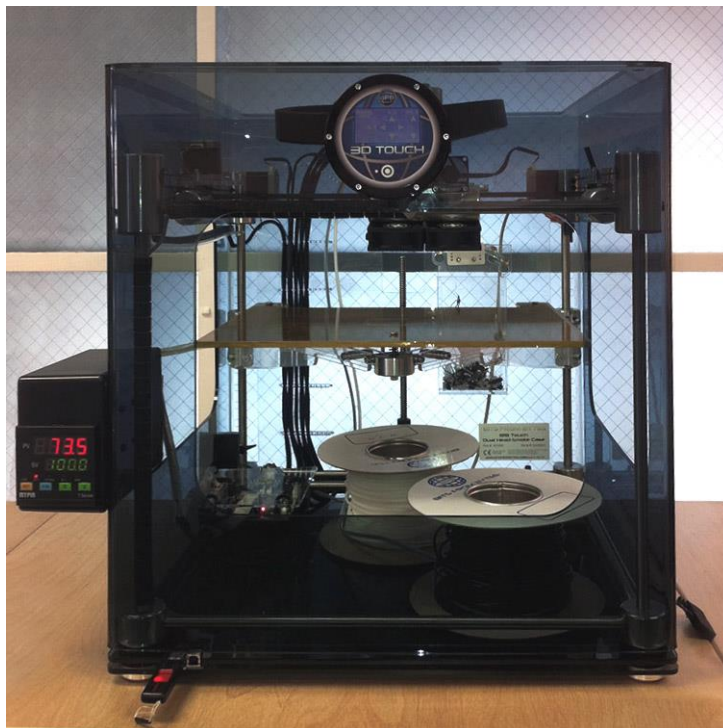


Рисунок 3.2 – 3D Touch [Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades]

Порівняння і аналіз цих двох RP машин ґрунтується на їх продуктивності, геометричній точності, і швидкості друку. В якості дослідного зразка (рисунок 3.3) використовується тестова модель товщиною 5 мм, з наступними елементами:

- набір з семи прямокутних блоків 4x15 мм з різною послідовною висотою 1, 3, 6, 10, 15, 21 і 28 мм;
- набір прямокутників з різними отворами з глибиною від 1-21 мм;
- набір з семи ступенів, ступені з'єднані, і їх висота зменшується з 28 до 1 мм в зворотній послідовності;
- дві пари коаксиальних усічених конусів. Перший має зовнішній діаметр 20, внутрішній 13,6 і висоту 12 мм. Другий має зовнішній діаметр 5, внутрішній діаметр 4 і висоту 6 мм;
- два коаксиальних циліндра. Перший складається з двох циліндрів діаметром 8 і 24 мм і двох глухих отворів 4 і 16 мм. Всі ці елементи мають висоту 8 мм. Другий набір має зворотну форму, але однаковий розмір циліндрів і набору отворів;

- два набори півкілець;
- чотири набори чверть сфер з діаметрами 4, 8, 16 і 24 мм;
- три набори похилих площин з різними градусами нахилу від  $0^\circ$  до  $45^\circ$  з кроком  $5^\circ$ ;
- кілька інших вертикальних або горизонтальних площин, які паралельні ортогонально квадратній основі.

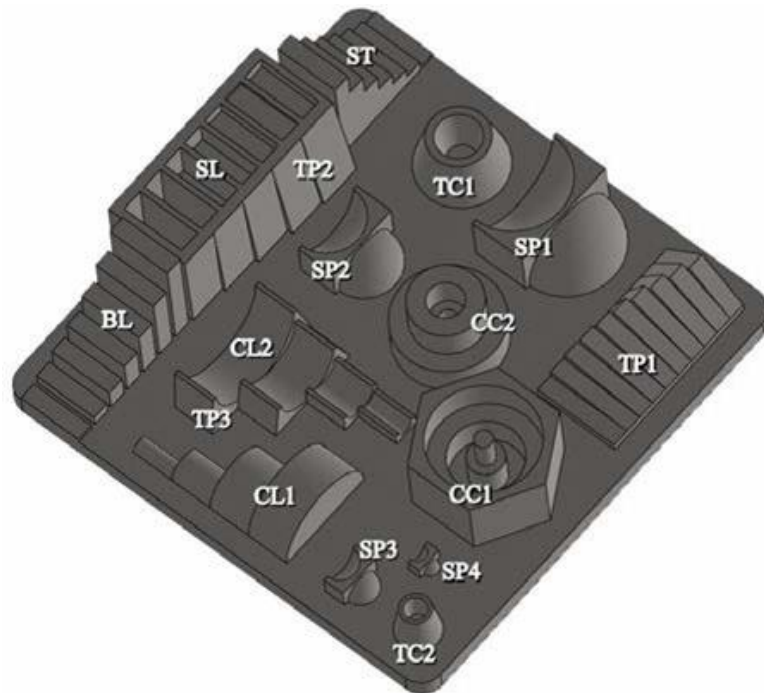


Рисунок 3.3 – Модель геометрії дослідного зразка [Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades]

### 3.2 Виготовлення та перевірка

Dimension Elite 3D FDM принтер використовує білу нитку, надрукував дослідну модель приблизно за 7 годин з товщиною шару 0,254 мм (рисунок 3.4). Для виготовлення деталі потрібно близько  $120 \text{ см}^3$  матеріалу ABS пластику, що відповідає приблизно 1/10 нової катушки.



Рисунок 3.4 – Надрукований дослідний зразок на Dimension Elite 3D принтері  
[Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades]

На 3D Touch використовували чорний пластик (рисунок 3.5). Виготовлення дослідного зразка зайняло майже 18 годин, товщина шару 0,125 мм. При виготовленні деталей було використано близько 80 г матеріалу ABS з абсолютно нової котушки вагою 1 кг. Тому для обох машин кількість необхідного матеріалу є прийнятним. В обох випадках деталь була виготовлена в центрі робочого столу.



Рисунок 3.5 – Надрукований дослідний зразок на 3D Touch принтері  
[Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades]

Після виготовлення зразків принтерами вони перевіряються за допомогою моделі DEA CMM GLOBAL Image 07.07.07, яка має заявлену об'ємну похибку вимірювання довжини  $MPE_E$  згідно ISO-10360/2, що дорівнює  $1,5 + L / 333$  мкм, де  $MPE$  - це аббревіатура від «Максимально допустимої похибки» і  $L$  - виміряна довжина [Benchmarking of FDM machines through part quality using IT grades]. Кожен із зразків був схилений до трьох перевірок, а тоді середні значення враховуються при аналізі результатів.

Результати програми порівнюємо з допусками ISO IT класів. Так як зразки менше 500 мм, вони відповідають 5-18 IT класу точності. Допуск розраховується за формулою:

$$i = 0.45 \times \sqrt[3]{D} + 0.001 \times D,$$

де  $D$  - середнє геометричне значення діапазону номінальних розмірів, мм.  
(Таблиця 3.1):

Таблиця 3.1 - Діапазони базових розмірів ISO та відповідний коефіцієнт допуску  $i$ .

Діапазон	Базові розміри								
Вище	$D1$ (мм)	1	3	6	10	18	30	50	80
Менше дорівнює	$D2$ (мм)	3	6	10	18	30	50	80	120
Стандартний коефіцієнт допуску	$i$ (мм)	0.542	0.733	0.898	1.083	1.307	1.561	1.856	2.173

$$D = \sqrt{D_1 \times D_2}.$$

Оцінки IT класифікуються згідно з таблиці 3.2 по числу  $n$  раз, коли коефіцієнт допуску  $i$  вписується в розмірне відхилення.

Таблиця 3.2 Класифікація IT класів відповідно до ISO 286-1: 1988.

Базові розміри	Стандартні толерантні оцінки													
	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16	IT 17	IT 18
Від 1 до 500	$7i$	$10i$	$16i$	$25i$	$40i$	$64i$	$100i$	$160i$	$250i$	$400i$	$640i$	$1000i$	$1600i$	$2500i$

Для загального номінального розміру  $D_{jn}$  число одиниць допусків  $n_j$  розраховується наступним чином:

$$n_i = \frac{1000 |D_{jn} - D_{jm}|}{i},$$

де  $D_{jm}$  - це відповідний вимірний розмір.

Таблиця 3.1 - Діапазони базових розмірів ISO та відповідний коефіцієнт допуску  $i$ .

Діапазон	Базові розміри								
	$D1$ (мм)	1	3	6	10	18	30	50	80
Вище	$D1$ (мм)	1	3	6	10	18	30	50	80
Меньше дорівнює	$D2$ (мм)	3	6	10	18	30	50	80	20
Стандартний коефіцієнт допуску	$i$ (мм)	0.542	0.733	0.898	1.083	1.307	1.561	1.856	2.173

Для розміру кожного елемента або відстані між об'єктами обчислюється значення  $n_i$ , яке відноситься до діапазону базових розмірів ISO. Визначений розподіл числа одиниць отриманий таким чином для кожного діапазону ISO для двох копій. Результати підсумовані за допомогою гістограми на рисунку 3.6.

Оцінка точності для Dimension Elite для великих розмірів становить до IT 11 класу точності, для дрібних розмірів від IT 13 класу. Тоді як для 3D Touch точність погіршується до 12 і 15 класу точності зі зменшенням базового розміру.

Так само оцінюються окремо горизонтальні, вертикальні, похилі площини, паралельність коаксиальність конусів і циліндрів (рисунок 3.7).



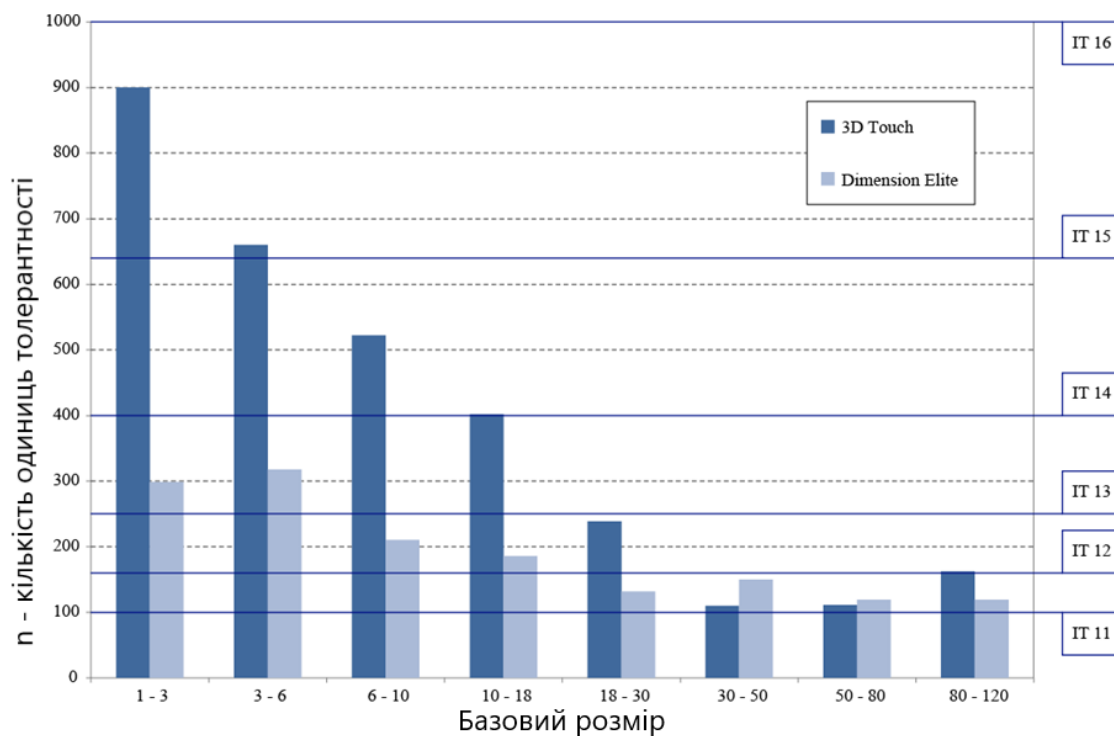


Рисунок 3.6 - Точність вимірювань з точки зору IT-класів для різних діапазонів базових розмірів ISO.

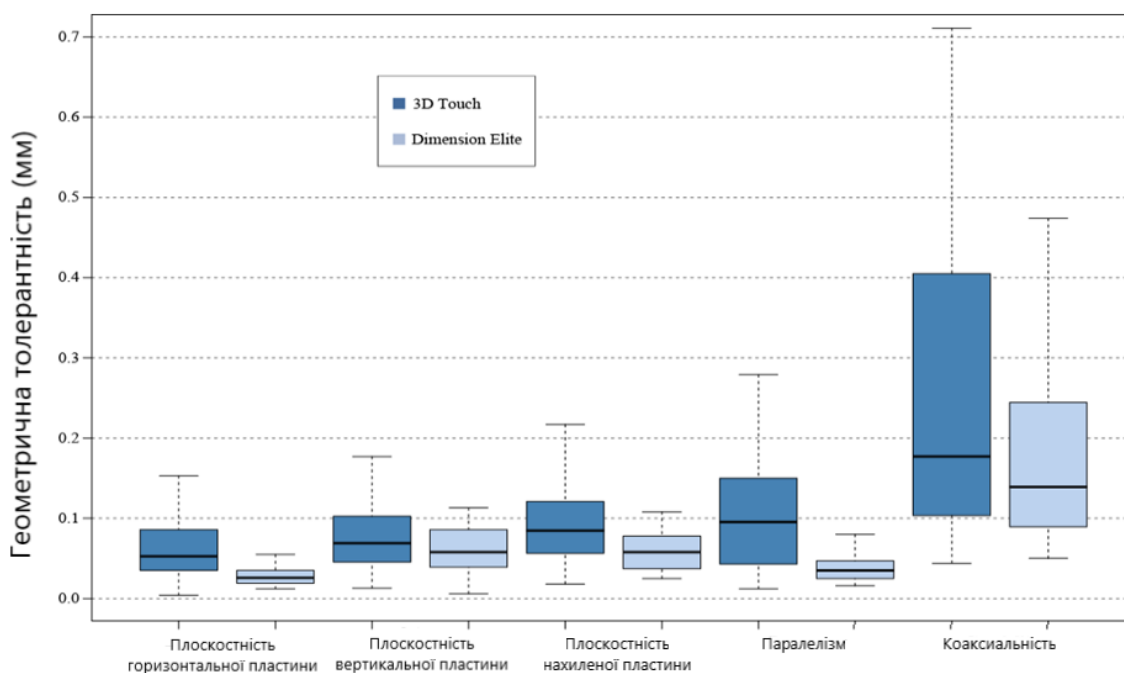


Рисунок 4.7 - Порівняння значень для різних геометричних допусків характеристик контрольних частин.

## Висновки

На основі отриманих даних друку дослідного зразка двома різними принтерами 3D FDM друку можна зробити висновок що за багатьма аспектами Dimension Elite краще, ніж 3D Touch.

А саме, краще геометричною точністю, деталізацією. Гаряча камера сприяє зменшенню усадки шарів, що сприяє деформації деталі під час друку. З точки зору друку простих геометричних фігур краще виявився 3D Touch, завдяки меншій товщині шару. Промисловий принтер витратив значно менше часу на створення моделі ніж персональний. Що економить час і подвоює продуктивність. Величезний мінус будь-якого промислового принтера – його ціна, тому не кожна компанія може його придбати замінюючи більш дорогий варіант більш дешевим персональним.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Аналіз потенційних небезпек

Робота та дослідження, які виконуються в магістерській роботі передбачає проведення дослідів в лабораторії «Мотор Січ» на території запорізького національного технічного університету. Для усунення ризиків травматизму, нещасних випадків та створення нормованих умов роботи необхідно дотримуватися правил техніки безпеки під час роботи з персональним комп'ютером та 3D принтером. Така робота належить до розряду робіт з підвищеним розумовим навантаженням. Тому на дослідника впливають такі небезпечні та шкідливі фактори як:

- можливість зазнати опіки від розплавленого термопластика, або столу печаті, який нагрівається до 100-150°C;

- недостатній рівень штучного та природного освітлення може призвести до швидкої втоми, зниження працездатності, короткозорості(допустимий рівень освітленості в зоні роботи з комп'ютером та дрібними деталями 300- 500 лк);

- ураження електричним струмом внаслідок недотримання правил безпеки при роботі з електричними приладами, порушення ізоляції дротів, несправності електричних приладів;

- підвищена пульсація світлового потоку (при коефіцієнті пульсації більше 5%) може призвести до втоми органів зору, зниження уваги, гальмування активності мозку, погіршення зору;

- механічне травмування в наслідок не раціонального розташування робочого місця;

- кістково-м'язові порушення, у зв'язку з тривалим статичним напруженням м'язів спини, шиї, рук і ніг;

- негативний вплив монітора комп'ютера, а саме коливання зображення, занадто яскраве, або темне зображення, неправильне розташування монітора, все це приводить до погіршення зору;

- підвищений рівень вібрації від 3D принтера та ПК визиває у людини

головну біль, погіршення зору та слуху;

- хімічні отруйні речовини, що виділяються під час друку, сприяють виникненню легневих захворювань і зниження імунітету;

- інтелектуальне перевантаження може призвести до втоми, підвищеного емоційного стану, порушенню сну;

- температура повітря в теплу та холодну пори року в робочій зоні (холодна пора року 21...24°C, в тепла пора року 23...25°C) можуть призвести до млявості, застуди, загострення хронічних хвороб;

#### 4.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

Перед початком дослідницької роботи студент повинен пройти вступний інструктаж з охорони праці. Також безпосередньо перед роботою на робочому місці проводиться первинний інструктаж.

Для захисту від можливих опіків та травм, пов'язаних з розплавленим пластиком надати робітнику засоби індивідуального захисту (спеціальний одяг, засоби захисту рук, очей) згідно НПАОП 0.00-4.01-08 «Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту».

Для усунення ймовірності ураження електричним струмом передбачаються організаційні заходи. Згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

Робітник повинен утримувати робоче місце в чистоті, не захаращувати його сторонніми предметами. Дотримуватися вимог санітарних норм та правил особистої гігієни.

Системний блок та принтер не слід розміщати всередині столу, або в іншому замкнутому просторі де порушена циркуляція повітря.

Для запобігання впливу шкідливих чинників при роботі на ПК та 3D принтера необхідно дотримуватись режиму роботи та відпочинку.

### 4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Стопи ніг повинні розміщуватися на спеціальній підставці або горизонтальній підлозі, стегна у горизонтальній площині, а передпліччя – вертикально, лікті повинні бути під кутом 70 - 90° до вертикальної площини, зап'ястя – зігнуті відносно вертикальної площини не більш ніж на 20°. Висота робочої поверхні столу 680-800мм, а ширина достатня для забезпечення можливості виконання операцій у зоні досяжності рук.

Для запобігання запиленості та загазованості приміщення пилом і парами пластика, що плавиться при 3D друкуванні необхідно передбачити вентиляційні системи, які повинні відповідати вимогам ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Оцінку впливу рівня вібрацій необхідно проводити за ДСТУ ISO 2631-1:2004 «Вібрація та удар механічні. Оцінка впливу загальної вібрації на людину».

Рівень шуму при проведенні дослідів в лабораторії не повинен перевищувати 80 дБ згідно вимог ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности».

Приміщення повинні мати природне та штучне освітлення. Значення освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення ПК має становити 400 лк, якщо ці значення неможливо забезпечити системою загального освітлення, допускається використовувати місцеве освітлення.

Штучне освітлення має бути комбінованим, тобто поєднується з місцевим. В якості джерел штучного освітлення рекомендується застосовувати люмінесцентні лампи білого спектрального складу. Місцеве освітлення не повинно створювати відблиски на поверхні екрану та збільшувати освітленість екрану більше 400 лк. Коефіцієнт пульсації не має перевищувати 5%. Тому рекомендується використовувати світильники з розсіювачами та дзеркальними екранними сітками або віддзеркалювачі з високочастотними пускорегулювальними апаратами. Для забезпечення освітлюваності в 400 лк розрахуємо необхідну кількість світла та визначимо схему розташування

світильників:

1) Вибір системи освітлення.

Вибір системи освітлення залежить від зорових робіт і визначається за Державними будівельними нормами України (ДБН В.2.5.-28-2006 «Природне і штучне освітлення»). Для лабораторії підходить розряд зорової роботи IIIа, застосовуємо систему комбінованого освітлення.

2) Визначення рівня нормованої освітленості ( $E_n$ ) проводимо за допомогою додатка А [28]. В залежності від розряду зорових робіт, фону та контрасту об'єкта. Приймаємо  $E_n = 400$  лк.

3) Вибираємо джерело освітлення: використовуємо люмінесцентні лампи ЛБ (білого кольору 2500-2800К), тому що висота нашої споруди не перевищує 6м.

Розміри лабораторії: довжина  $A = 6$  м, ширина  $B = 6$  м, висота  $H = 2,8$  м.

4) Вибір типу світильника проводимо з урахуванням умов навколишнього середовища, характеристики і освітлювального приміщення за вибухопожежонебезпекою за допомогою додатка В [28]. Для лабораторій, та приміщень з пиловиділенням висотою до 5 м обираємо тип світильника ПВЛ. Коефіцієнт світильника  $[L/h] = 1,5$ .

5) Оцінка коефіцієнта запасу та коефіцієнта нерівномірності (мінімального) освітлення:

Коефіцієнт запасу  $k_z$  враховує зниження рівня освітленості з часом в результаті забруднення та старіння ламп, світильників і поверхонь приміщення, приймається в залежності від виробничих умов за додатком Г, таблиця 4 [28]. Обираємо  $k_z = 1,5$ .

Коефіцієнт нерівномірності (мінімального) освітлення  $z = 1,1$  – для люмінесцентних ламп.

6) Оцінка коефіцієнтів відбиття поверхонь приміщення:

Обирається за дод. Г, табл. 5 [28] в залежності від виділення пилу у процесі роботи. У приміщеннях з незначним пиловиділенням  $r_c = 50\%$  – відбиття від стелі,  $r_{ст} = 30\%$  – відбиття від стін,  $r_p = 10\%$  – відбиття від підлоги.

7) Значення індексу приміщення визначаємо за формулою:

$$i = \frac{AB}{h(A+B)}, \quad (4.1)$$

де  $A$  – довжина приміщення, м;

$B$  – ширина приміщення, м;

$h$  – висота розміщення світильників над робочою поверхнею, м.

$$h = H - h_p - h_3, \quad (4.2)$$

де  $H$  – висота виробничого приміщення, м;

$h_p$  – висота робочої поверхні над підлогою, м, (як правило, висота умовної робочої поверхні  $h_p = 0,8$  м);

$h_3$  – висота звисання світильника від стелі, м.

Так як  $h_3$  не задана, то розрахунок проводимо за формулами:

а) Розраховуємо кількість рядів світильників у приміщенні:

$$N_p = \frac{B}{(H-h_p) * [L/h]}, \quad (4.3)$$

де  $[L/h] = 1,5$  – числове значення коефіцієнта світильника за дод. В [27].

$$N_p = \frac{6}{(2,8 - 0,8) * 1,5} = 2 \text{ ряди}$$

б) визначаємо максимально припустиму відстань між рядами світильників:

$$L_{max} = \frac{B}{N_p} = \frac{6}{2} = 3 \text{ м} \quad (4.4)$$

в) розраховуємо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = \frac{L_{max}}{[L/h]} = \frac{3}{1,5} = 2 \text{ м} \quad (4.5)$$

г) знаходимо висоту звисання світильника від стелі:

$$h_3 = H - h_p - h = 2,8 - 0,8 - 2 = 0 \text{ м} \quad (4.6)$$

Знаходимо чисельне значення індексу приміщення за формулою (4.1):

$$i = \frac{6 * 6}{2(6 + 6)} = 1,5$$

8) Значення коефіцієнта використання світлового потоку  $\eta$  обираємо в залежності від виду джерела світла, типу обраного світильника, коефіцієнтів відбиття поверхонь приміщення ( $\rho_s$ ,  $\rho_{st}$ ,  $\rho_p$ ) та індексу приміщення додаток Д [28]. Приймаємо  $\eta = 40\%$ .

9) Проводимо розрахунок світлового потоку лампи та загальної кількості

світильників за схемою:

а) Визначаємо сумарний світловий потік освітлювальної установки у даному виробничому приміщенні:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot S \cdot k_3 \cdot z}{\eta}, \quad (4.7)$$

де  $\Phi_{\Sigma}$  – розрахункове значення сумарного світлового потоку у приміщенні, лм;

$E_n$  – нормоване значення освітленості, лк;

$S$  – площа освітлювальної поверхні, м<sup>2</sup>;

$k_3$  – коефіцієнт запасу;

$z$  – коефіцієнт нерівномірності (мінімальної) освітленості;

$\eta$  – коефіцієнт використання світлового потоку

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{400 \cdot 36 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{0,4} = 59\,400 \text{ лк}$$

б) Визначаємо умовну загальну кількість світильників у приміщенні, виходячи з позиції розташування їх у вершинах квадрата:

$$N^* = \frac{AB}{L_{max}^2} = \frac{6 \cdot 6}{3^2} = 4 \text{ світильника} \quad (4.8)$$

в) Розраховуємо світловий потік умовного джерела світла:

$$\Phi_{л}^* = \frac{\Phi_{\Sigma}}{N_{л}}, \text{ лм} \quad (4.9)$$

де  $N_{л}$  – загальна кількість ламп у приміщенні, шт;

$$N_{л} = N^* \cdot n = 4 \cdot 2 = 8 \text{ шт}$$

$n$  – кількість ламп у світильнику.

$$\Phi_{л}^* = \frac{59\,400}{8} = 7\,425 \text{ лм}$$

г) За додатком Б обираємо тип стандартної лампи з найближчим значенням фактичного світлового потоку лампи  $\Phi_{л}$  і розраховуємо коефіцієнт  $m$ . Тип лампи – ЛБ,  $P_{л} = 80$  Вт – потужність лампи,  $\Phi_{л} = 5\,400$  лм – світловий потік лампи,  $L = 1,5$  м – довжина лампи.

$$m = \frac{\Phi_{л}^*}{\Phi_{л}} = \frac{7\,425}{5\,400} = 1,375 \quad (4.10)$$

д) Визначаємо оптимальну кількість ламп у приміщенні:



$$N = N_{\text{л}} \cdot m = 8 \cdot 1,375 = 11 \text{ ламп} \quad (4.11)$$

Приймаємо фактичну кількість ламп у приміщенні  $N_{\text{фл}} = 12$  ламп.

10) Визначаємо загальну розрахункову освітленість  $E_p$  у приміщенні, що створюється при застосуванні стандартних ламп:

$$E_p = \frac{\Phi_{\text{л}} \cdot N_{\text{фл}} \cdot \eta}{S \cdot k_3 \cdot z} = \frac{5\,400 \cdot 12 \cdot 0,4}{36 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 436,4 \text{ лк} \quad (4.12)$$

При правильному виборі типу і кількості стандартних ламп повинна виконуватися умова:

$$E_p = (-10\% \dots +20\%) \cdot E_{\text{н}}, \text{ лк} \quad (4.13)$$

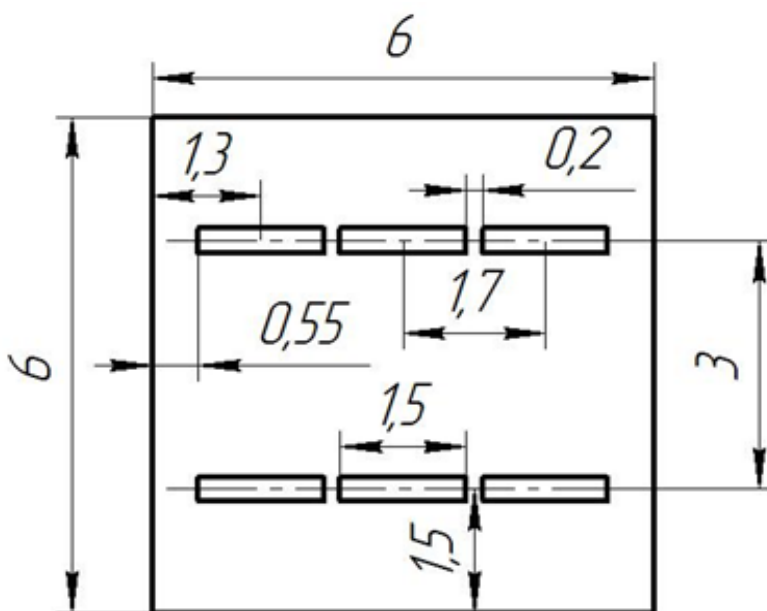
$$E_p = 360 \dots 480 \text{ лк}$$

Розрахункове значення освітленості  $E_p$  складає 436,4 лк, отже необхідна умова виконується.

11) Розраховуємо загальну потужність освітлювальної установки:

$$P_{\Sigma} = N_{\text{л}} \cdot P_{\text{л}} = 12 \cdot 80 = 960 \text{ Вт} \quad (4.14)$$

12) Виконаємо ескіз розташування світильників на плані приміщення.



Риснок 5.1 – Схема розміщення світильників у лабораторії

Площа лабораторії, що виділяється для одного робочого місця, на якому розміщено обладнання, повинна становити не менше  $6\text{ м}^2$ , а об'єм – не менше  $20\text{ м}^3$ . СНиП 2.09.02-85 «Производственные здания».

Екран монітора повинно розмістити, щоб забезпечити зручність зорового спостереження в вертикальній площині під кутом  $\pm 30^\circ$  від лінії зору працівника. ГОСТ 12.2.032-78. «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».

Забезпечення вимог до санітарно-побутових приміщень (згідно ДБН В.2.2-28:2010 «Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення»).

Працюючі з ПЕОМ підлягають обов'язковим медичним оглядам. Періодичні огляди мають проводитися раз на два роки. Основними критеріями оцінки стану придатності до роботи є стан органів зору, при цьому необхідно враховувати також стан організму в цілому. Наказ міністерства охорони здоров'я України від 21 травня 2007р. №246 «Про затвердження порядку проведення медичного огляду працівників певних категорій».

Відносна вологість повітря у приміщенні 40-60% – в холодну і теплу пору року. ДСН 3.3.6.042-99 „Державні санітарні норми параметрів мікроклімату”

#### 4.4 Заходи з пожежної безпеки

Заходи з пожежної безпеки при роботі у лабораторіях, обладнаних ПК з ВДТ розробляється згідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

У лабораторії обладнаній ПК та іншим електронним обладнанням можлива пожежа класу А (пожежа, що супроводжується горінням твердих матеріалів) та Е (горіння електроустановок, що перебувають під напругою до 1000В) згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)».

Відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою», воно належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали. Оскільки приміщення (дослідницької лабораторія) обладнане ПК з ВДТ належить до

категорії «Д» з пожежної небезпеки, тому згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» воно має II ступінь вогнестійкості.

У разі виникнення пожежі у дослідницькій лабораторії обладнаному ПК з ВДТ для евакуації персоналу відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» передбачені виходи, по обидві сторони приміщення, з одного боку, а з іншого – вхідні двері. Згідно п. 2.29 (табл. 2) СНиП 2.09.02-85\* «Производственные здания», відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу не обмежується.

Згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту», в приміщенні (дослідницької лабораторії) обладнаному ПК з ВДТ встановлюється система пожежної й охоронної сигналізації «Сигнал-ВК6». Яка забезпечує виявлення теплових і димових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика.

#### 4.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

Використання сил цивільного захисту на хімічно небезпечному об'єкті при ліквідації вогнищ ураження, утворених витіканням великої кількості сильнодіючих отруйних речовин.

Хімічно небезпечним об'єктом (ХНО) вважається об'єкт господарювання, при аваріях і руйнуваннях якого можуть відбутися масові ураження людей, тварин і рослин сильнодіючими отруйними речовинами.

До хімічно небезпечним об'єктом відносяться:

- підприємства хімічної галузі промисловості, які виробляють чи використовують сильнодіючі отруйні речовини;
- підприємства по переробці нафтопродуктів;
- підприємства інших галузей промисловості, які використовують СДОР;
- підприємства, які мають на оснащенні холодильники, водонапірні станції,

очисні споруди, що використовують хлор і аміак;

- залізничні станції і порти, де концентрується продукція хімічних виробництв, термінали і склади на кінцевих пунктах переміщення СДОР;

- транспортні засоби, контейнери і наливні потяги, автоцистерни, річкові і морські танкери, які перевозять хімічно небезпечні продукти;

- склади і бази, на яких зберігаються запаси речовин для дезінфекції, дератизації сховищ для зерна і продуктів його переробки.

Сильнодіючі отруйні речовини (СДОР) — це токсичні хімічні речовини, що застосовуються в господарських цілях і здатні при витіканні зі зруйнованих чи ушкоджених технологічних ємностей, сховищ і устаткування, викликати масові ураження людей.

За своїми вражаючими властивостями СДОР поділяються на такі групи:

- речовини з переважно задушливою дією (хлор, фосген, хлорпікрин та 87н.);

- речовини переважно загально отруйної дії (окис вуглецю, ціаністий водень та 87н.);

- речовини задушливої та загально отруйної дії (аміак, 87н.87но токси, азотна кислота й окисли азоту, сірчистий ангідрид, фтористий водень);

- речовини, які діють на генерацію, проведення і передачу нервового імпульсу — нейротропні отрути (сірковуглець, тетраетил свинець, фосфорорганічні сполуки й 87н.);

- речовини задушливої і нейротропної дії (аміак, гептил, 87н.87но та 87н.);

- метаболічні отрути (окис етилену, дихлоретан та 87н.).

За ступенем токсичності СДОР, які надходять в організм через органи дихання і шлунково-кишковий тракт, можна розділити на шість груп (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1

Групи токсичності	Середня смертельна чи частково смертельна концентрація
Надзвичайно	токсичні менше 1
Високотоксичні	1-5
Сильнотоксичні	6-20
Помірнотоксичні	21-80
Малотоксичні	81-160
Практично нетоксичні	більше

До надзвичайно і високотоксичних СДОР відносяться сполуки миш'яку, ртуті, кадмію талію , свинцю, цинку, нікелю, заліза, фосфору, хлору, бромю, синильної кислоти і деякі інші сполуки.

До 88н.88но токсичних хімічних речовин відносяться сірчана, азотна, соляна, ортофосфорна, оцтова й 88н.. кислоти, луги (аміак, їдкий калій, натрій, хлористий і бромистий метил).

Токсодоза – кількість речовини (в одиницях ваги), віднесена до одиниці об'єму і до одиниці часу. Токсодоза характеризує кількість токсичної речовини, поглинутої організмом за певний інтервал часу.

Території, які потрапили під вплив сильнодіючих отруйних речовин у результаті аварії на хімічно небезпечному об'єкті , поділяють на зони:

а) Зона смертельних токсодоз (надзвичайно небезпечного зараження) – зона, на зовнішній межі якої 50% людей одержують смертельні ураження.

б) Зона вражаючих токсодоз (небезпечного зараження) – зона, на зовнішній межі якої 50% людей втрачають працездатність, їм потрібна медична допомога чи навіть госпіталізація.

в) Дискомфортна (гранична) зона – зона, на зовнішній межі якої люди відчувають дискомфорт, у них починаються загострення хронічних захворювань або з'являються перші ознаки інтоксикації.

Масштаби і тривалість зараження СДОР при аварії на хімічно небезпечному об'єкті обумовлюються:

- фізико-хімічними властивостями СДОР;
- кількістю СДОР, викинутих на місцевість, в атмосферу, у воду;
- метеорологічними умовами;
- оперативністю оповіщення і вживання заходів;
- підготовленістю обслуговуючого персоналу до ліквідації наслідків розливу СДОР;
- характеристиками об'єктів зараження (для місцевості – наявністю і характером рослинного покриву, місцями можливого застою повітря; для води – площею поверхні, глибиною, швидкістю течії, наявністю ґрунтових вод, характеристикою прибережних ґрунтів; для населення – ступенем захищеності від ураження СДОР, характером діяльності; для матеріальних засобів – характеристикою матеріалів, які підпали під зараження, у тому числі пористістю, наявністю і складом лакофарбових покриттів).

Ураження людей і тварин відбувається унаслідок вдихання зараженого повітря (інгаляційно), контакту із зараженими поверхнями (контактно-резорбтивно), через шлунково-кишковий тракт (перорально) у результаті вживання заражених продуктів харчування, через шкірні покриви, слизові оболонки і поверхні ран (резорбтивно) та іншими шляхами. В результаті впливу СДОР на організм людини, крім безпосередніх уражень, можуть спостерігатися і віддалені генетичні наслідки.

Одним із основних завдань держави є забезпечення гарантованого захисту життя і здоров'я людей, безпеки територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру шляхом запобігання, негайного і ефективного реагування на надзвичайні ситуації та ліквідації їх наслідків зі здійсненням комплексу заходів по наданню допомоги постраждалому населенню.

Для координації дій органів державної влади та органів місцевого самоврядування, органів управління та сил цивільного захисту, а також організованого та планового виконання комплексу заходів реагування на НС та

ліквідації їх наслідків: використовуються центри управління надзвичайним станом, утворюються спеціальні комісії, призначаються керівники робіт за ліквідації лиха, визначається потреба у силах цивільного захисту, долучають сили цивільного захисту до ліквідації наслідків надзвичайної ситуації.

Центральна роль у забезпечення реагування на НС відводиться Державній службі України за надзвичайних ситуацій, яка виконує дві ключові функції:

а) організація всього процесу реагування і ліквідації НС із залученням всіх можливостей держави;

б) застосування рятувальних сил ДСНС як основну складову реагування, спрямовану на захист цивільного населення країни.

Обов'язковою умовою щодо ефективного реагування при виникненні надзвичайної ситуації є не тільки своєчасне зосередження сил і засобів в районі виникнення надзвичайної ситуації, але й правильна організація управління підрозділами під час проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт.

#### 4.6 Організація цивільного захисту на промисловому об'єкті

Загальне керівництво Цивільним захистом відповідно до її побудови покладається на: Кабінет Міністрів України, Міністерства, інші центральні органи виконавчої влади, місцеві держадміністрації, керівників підприємств, установ і організацій незалежно від форм власності і підпорядкування.

Начальником Цивільної оборони України є Прем'єр-міністр України. На місцевому рівні функції начальників цивільної оборони здійснюють керівники відповідних органів виконавчої влади, а в міністерствах, відомствах і на підприємствах їхні керівники.

Органом повсякденного управління процесами захисту населення при Кабінеті Міністрів є Міністерство з питань надзвичайних ситуацій та в справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи. З цією ж метою при місцевих органах виконавчої влади створюються відповідні управління і відділи.

У міністерствах, відомствах, підприємствах і установах також створюються органи повсякденного управління. Усі ці органи здійснюють покладені на них завдання. Так Кабінет Міністрів України здійснює наступні основні завдання:

- забезпечує здійснення заходів щодо попередження надзвичайних ситуацій і ліквідації їхніх наслідків;

- розподіляє міста і території за групами, юридичних осіб — за категоріями щодо реалізації заходів з цивільної оборони;

- створює резерви засобів індивідуального захисту і майна цивільної оборони, матеріально-технічних та інших фондів на випадок виникнення надзвичайних ситуацій у мирний та воєнний час, а також визначає їх обсяг і порядок використання;

- вживає заходи щодо забезпечення готовності органів управління у справах цивільної оборони, сил та засобів цивільної оборони до дій в умовах надзвичайних ситуацій;

- створює єдину систему підготовки органів управління в справах цивільної оборони, сил цивільної оборони і населення до дій в умовах надзвичайних ситуацій;

- визначає порядок створення спеціалізованих, професійних та невоєнізованих аварійно-рятувальних служб (формувань);

- задовольняє мобілізаційні потреби військ, органів управління у справах цивільної оборони та установ цивільної оборони;

- координує діяльність аварійно-рятувальних служб;

- залучає аварійно-рятувальні служби до ліквідації надзвичайних ситуацій за межами території України.

Міністерства й інші органи виконавчої влади в межах своїх повноважень забезпечують рішення питань цивільної оборони, здійснення заходів щодо захисту населення і територій під час надзвичайних ситуацій, сприяють органам управління в справах цивільної оборони у виконанні покладених на них функцій.

Міністерство з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи вирішує такі основні завдання:



- бере участь у реалізації державної політики у сфері цивільної оборони, захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, а також попередження цих ситуацій;

- організовує розроблення і здійснення відповідних заходів із цивільної оборони;

- керує діяльністю підпорядкованих йому органів управління у справах цивільної оборони та спеціалізованих формувань, військами цивільної оборони;

- здійснює контроль за виконанням вимог цивільної оборони, станом готовності сил і засобів цивільної оборони для проведення невідкладних робіт для попередження та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру;

- здійснює координацію діяльності центральних органів виконавчої влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, місцевих державних адміністрацій, виконавчих органів місцевих рад та юридичних осіб щодо ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру;

- здійснює оповіщення населення про загрозу виникнення або виникнення надзвичайної ситуації, забезпечує належне функціонування відомчих територіальних і локальних систем оповіщення;

- здійснює навчання населення, представників органів управління і сил цивільної оборони з питань захисту і дій у надзвичайних ситуаціях;

- організовує фінансове і матеріально-технічне забезпечення військ цивільної оборони;

- створює згідно до законодавства України підприємства з виробництва спеціальної техніки, засобів захисту населення і контролю тощо.

Безпосереднє керівництво виконанням завдань цивільної оборони, діями органів управління і сил під час надзвичайних ситуацій покладається на управління (відділи) з питань надзвичайних ситуацій та цивільного захисту населення на спеціальні підрозділи міністерств і відомств та працівників цивільної оборони об'єктів господарської діяльності.

На територіальні органи управління з питань надзвичайних ситуацій та

цивільного захисту населення покладаються наступні завдання:

- реалізація державної політики в області цивільної оборони;
- розроблення і реалізація заходів щодо захисту населення від наслідків надзвичайних ситуацій, керівництво діяльністю підлеглих органів управління і сил цивільної оборони;
- здійснення контролю за станом цивільної оборони на відповідній території;
- координація в рамках їхньої компетенції дій інших місцевих органів виконавчої влади, територіальних органів міністерств і відомств, підприємств, закладів і організацій, що залучаються до виконання завдань, зв'язаних з безпекою населення і забезпеченням його життєдіяльності під час надзвичайних ситуацій.

Територіальні органи управління з питань надзвичайних ситуацій і цивільного захисту населення відповідно до законодавства України входять до складу місцевих держадміністрацій та інших органів виконавчої влади за принципом подвійного підпорядкування.

Однією з найважливіших ланок у системі цивільної оборони є об'єкти господарської діяльності (далі об'єкти). Об'єкти — це підприємства (незалежно від форми власності), заклади і організації, навчальні установи та інші.

Відповідальність за організацію і стан цивільної оборони на об'єкті, за постійну готовність її сил і засобів до виконання поставлених завдань несе начальник цивільної оборони об'єкта — керівник підприємства.

Начальник цивільної оборони об'єкта підпорядковується відповідному міністерству в підпорядкуванні якого знаходиться об'єкт, а також начальнику цивільної оборони міста (району) на території якого розташовується даний об'єкт.

Начальник цивільної оборони об'єкта може мати декілька заступників. Як правило це такі як з: інженерно-технічного постачання, евакуації, матеріально-технічного постачання та інші.

При ньому створюється штаб, що укомплектовується штатними працівниками цивільної оборони, а також позаштатними, які виконують обов'язки з цивільної оборони за сумісництвом.

Як правило, крім начальника, до складу штабу включають заступників з

оперативно-розвідувальної роботи, підготовки формувань, робітників та службовців, а також інших фахівців виходячи зі специфіки підприємства.

На об'єкті, в залежності від характеру виробничої діяльності, створюються служби цивільної оборони: оповіщення і зв'язку; медична; радіаційного і хімічного захисту; охорони громадського порядку; протипожежна, енергопостачання і світломаскування; аварійно-технічна; сховищ і укриттів; транспортна, матеріально-технічного забезпечення та інші.

На невеликих об'єктах, де бази для створення подібних служб нема, їхні функції виконують структурні органи цих об'єктів.

## ВИСНОВКИ

Всі поставлені завдання були виконані, мета наукової роботи досягнута. Адитивні технології постійно розвиваються, з'являються нові методи відтворення об'єктів, а так само допрацьовуються вже наявні методи з метою збільшення швидкості друку, якості та енергоефективності. Застосування 3D-друку можливо у всіх галузях промисловості, однак, не в усіх галузях даний метод виготовлення деталей ще застосовується у зв'язку з високою вартістю технологій.

У звіті були виявлені найбільш перспективні напрямки застосування тривимірного друку в макетування та виробництві реальних об'єктів. Було знайдено обладнання, де застосування 3D-друку матиме позитивний вплив на надійність, напрацювання на відмову і ефективність, без конструктивної зміни обладнання і машини. Таким обладнанням є гідроблок коробок передач або коробок відбору потужності, крильчатка турбокомпресора, різні типи і види підшипників ковзання.

Розміри робочої камери сучасних 3D-принтерів забезпечують можливість виготовлення великогабаритних деталей, або декількох невеликих, тим самим зменшуючи час робочого циклу.

Розраховані критерії подібності спікання металевих порошків, що дозволяють скоротити час налаштування принтера для друку новим матеріалом. Отримана модель адекватно відображає фізичні процеси, що протікають при реальному лазерному спіканні металевих порошків різних видів.

Таким чином, технологічні можливості застосування 3D-принтерів для моделювання і виготовлення реальних деталей обладнання безмежні і мають масу переваг перед традиційними методами виготовлення деталей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Валетов В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы); учебное пособие / В.А. Валетов. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 63 с.
- 2 Галактионова Н.А. Конструкционные материалы и их обработка/ Н.А. Галактионова, И.Ф. Бойчук. – М.: Металлургия, 1975. – 394 с.
- 3 Горячий В.В. Повышение надежности нефтегазового оборудования применением 3D-печати / В.В. Горячий // Инновации и инвестиции. – 2015.– №11. – С. 150-152.
- 4 Гусман М.Т. Расчет конструирование и эксплуатация турбобуров / М.Т. Гусман. – М.: Недра, 1976. – 368 с.
- 5 Еланский Г.Н. Основы производства и обработка металлов; учебник/ Г.Н Еланский, Б.В. Линчевский, А.А. Кальменев – М.: Московский государственный вечерний металлургический институт, 2005. — 416 с.
- 6 Киффер Р. Твердые сплавы/ Р. Киффер, Ф. Бенезовский. – М.: Металлургия, 1971. – 391 с.
- 7 Логачева А.И. Аддитивные технологии производства ответственных изделий из металлов и сплавов (обзор)/ А.И Логачева, Ж.А. Сентюрин,И.А. Логачев // Перспективные материалы. – 2015. – №4. – С. 5-16.
- 8 Маранц А.В. Сравнение свойств материалов сталь–TiC, полученных методами лазерных технологий и порошковой металлургии / А.В. Маранц // ПМиФП Известия вузов. – 2013 . – №1. – С. 22-26.
- 9 Межерицкий А.Д. Турбокомпрессоры судовых дизелей./ А.Д. Межерицкий Ленинград.: Судостроение, 1971. – 192 с.
- 10 Селезнёв К.П. Теория и расчёт турбокомпрессоров; учебное пособие./ К.П. Селезнев. – СПб.: Машиностроение, 1968. — 407 с.
- 11 Цукерман С.А. Порошковая металлургия./ С.А. Цукерман. М.: Издательство Академии Наук СССР, 1958. - 158 с.

- 12 Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники/ Д.М. Чумаков//Труды МАИ.– 2014. – № 78. – 22 с.
- 13 Шишковский И.В. Послойный синтез объемных изделий из нитрида титана методом SLS/ И.В. Шишковский, С.Е. Закиев, Л.П. Холпанов//Физика и химия обработки материалов. – 2005. – №3 . — С. 71-78.
- 14 Bassani F., Liedl G.L., Wyder P. Encyclopedia of Condensed Matter Physics. 5-volume Set. — Elsevier, 2005. — 2562 p.
- 15 Steen W. M. Laser material processing/ W.M. Steen. – London.: Springer, 2003. – 408p.
- 16 СТО 4.2–07–2014 Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности.– Красноярск : ИПК СФУ. – 2014. – 60 с.
- 17 Материалы для 3D-печати [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://www.orgprint.com/wiki/3d-pechat/materialy-dlja-3d-pechat>
- 18 Технологии 3D-печати [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://3d-only.ru/articles/tehnologii-3d-pechat>
- 19 Турбокомпрессоры. Причины выхода из строя [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://turbomaster.ru/article/val>
- 20 3D-печать. Аддитивные технологии [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://www.up-pro.ru/library/innovations/niokr/additive-3d.html>



# Магістерська робота

На тему: «Дослідження і оцінка продуктивності  
3D FDM принтерів»

Розробив ст. гр. Мз-113м

Биховський Є. Ю.

Керівник к.т.н.

Логомінов В. О.

# Область застосування адитивних технологій

Машинобудування

Приладобудування

Авіаційна промисловість

Військово-промисловий  
комплекс

Робототехніка



# ASTM International розділяє 3D адитивні технології на категорії:

Витискання матеріалу

Фотополімеризація

Розпилення матеріалу

Спінання порошкових  
матеріалів

Склеювання листових  
матеріалів

Розпилення селективного  
реагенту

Одночасне підведення матеріалу  
і енергії в точку побудови

# Матеріали 3D-друку

ABS-пластик

Акрил

Нейлон

Поліпропілен

Полікарбонат

PLA-пластик

Полікапролактон

Поліфенілсульфон

## Металовмісні матеріали 3D друку

Інструментальна і нержавіюча сталь

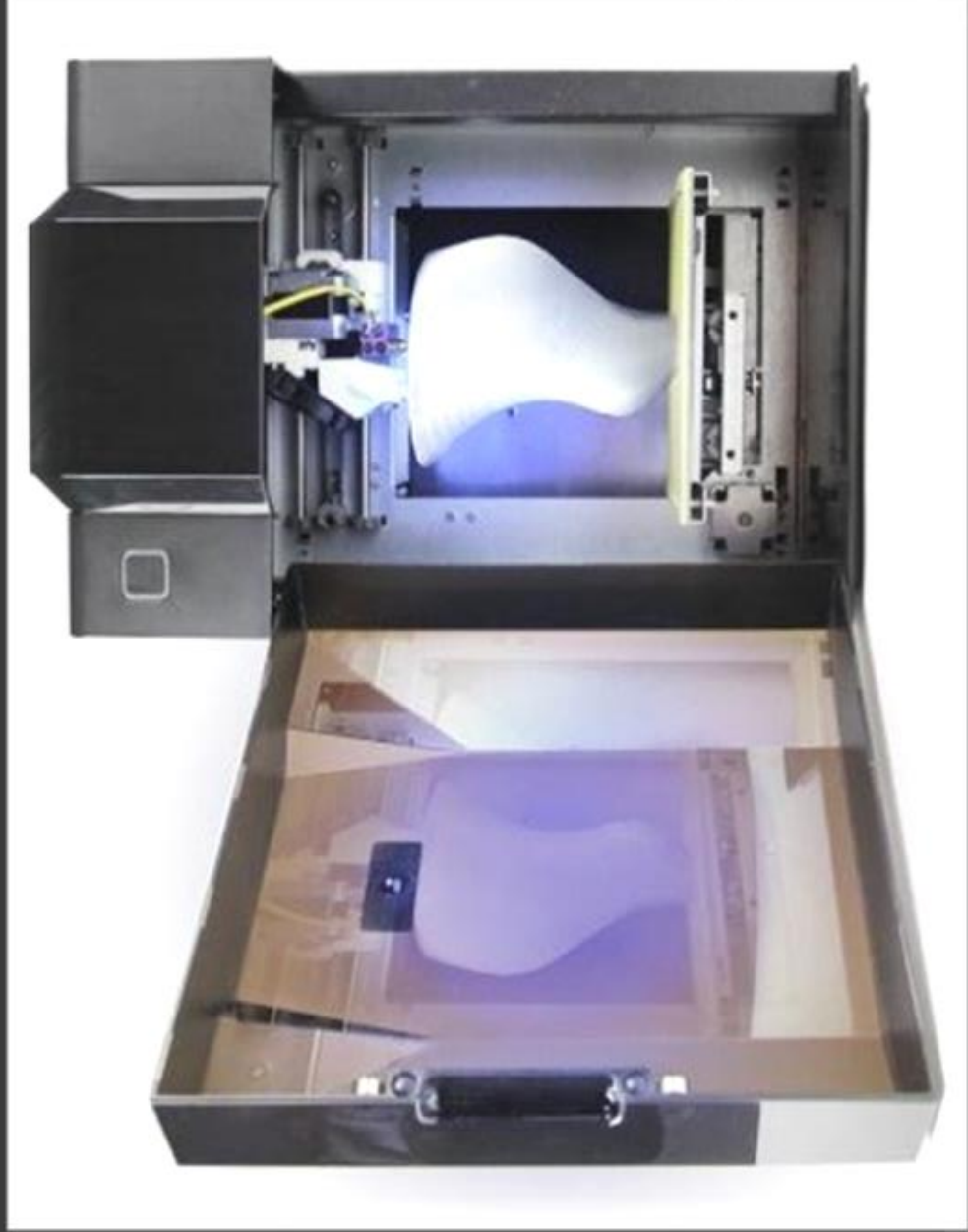
Алюміній і його сплави

Кобальт-хром

Нікелеві сплави

Титан

## 3D-принтер для полімерів



## 3D-принтер для металів

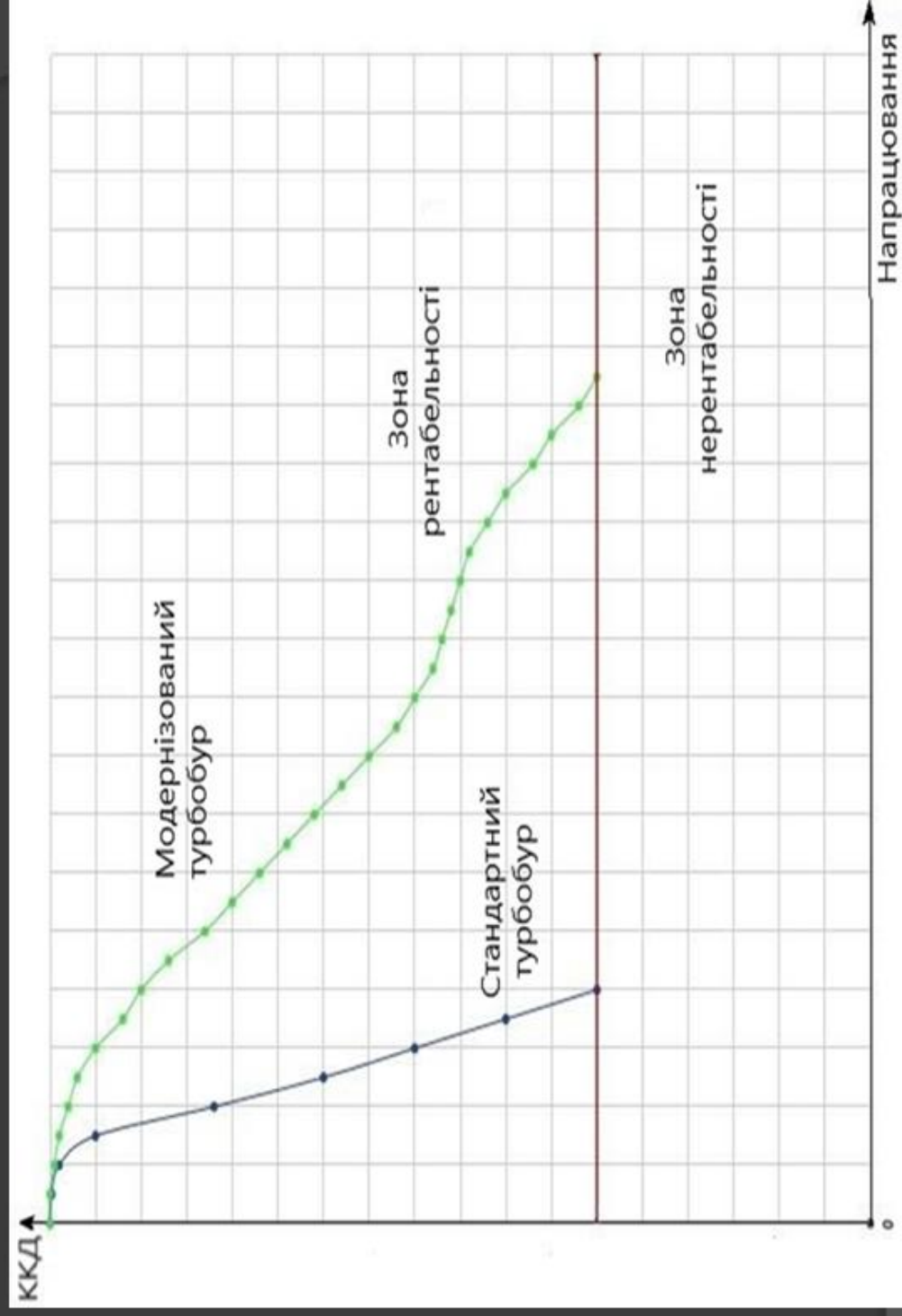


## Можливості 3D друку у виготовленні деталей

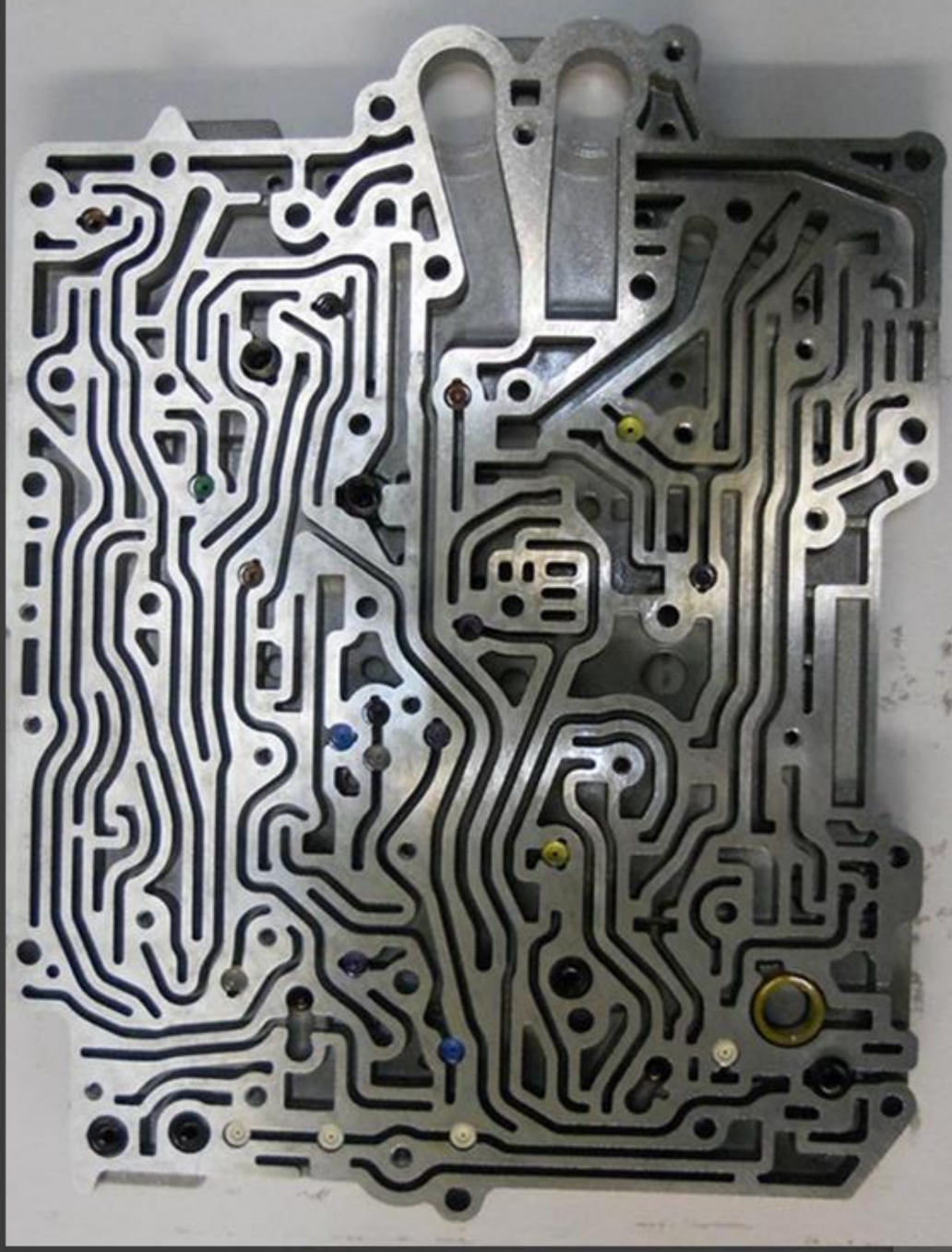
- 1) Підвищення надійності обладнання
- 2) Використання нових матеріалів
- 3) Підвищення надійності деталі
- 4) Виготовлення цілісних конструкцій
- 5) Підвищення ремонтопридатності обладнання



# Графік залежності ККД турбобура від часу напрацювання



Приклад цілісного виробу за допомогою  
3D принтера





# Аналіз вартостей та часу на виготовлення різних деталей, традиційним та адитивним способом виготовлення

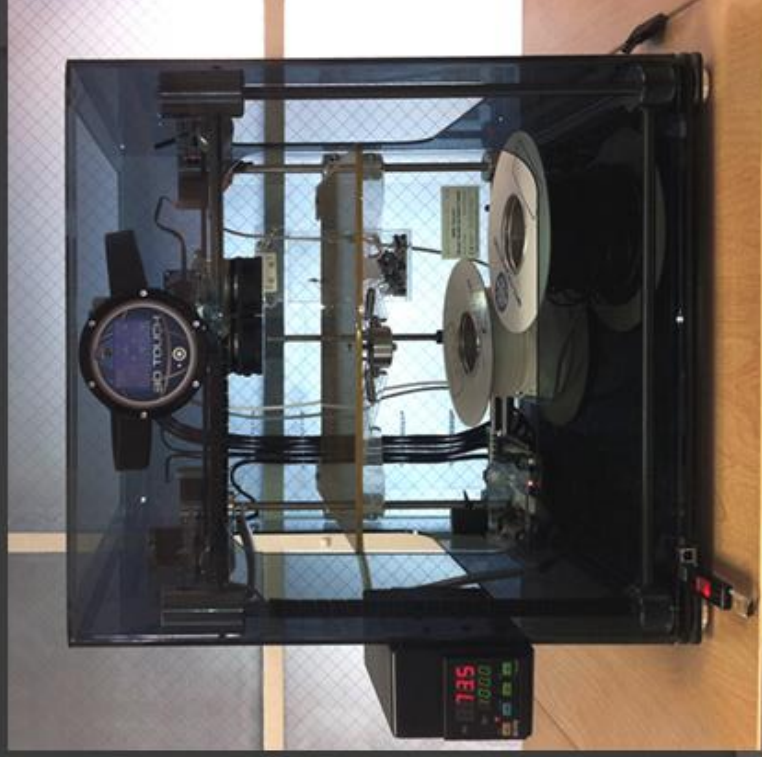
<u>Найменування</u>	<u>Вартість</u> <u>деталей тис.</u> <u>грн</u>	<u>Вартість</u> <u>деталей</u> <u>ЗДдруку тис.</u> <u>грн</u>	<u>Час</u> <u>виготовлення</u> <u>деталей час.</u>
Підшипник ковзаня	1,5 – 3,5	1 - 2,25	1,5 / 0,4
Крильчатка турбіни	8	6	12 / 8
Гідроблок АКПП	8,5 – 15	7,5 - 24	38 / 21
Різець долота	0,45	0,85	5 / 1,5

# Бенчмаркінг

Dimension Elite



3D Touch



## Бенчмаркінг

Dimension Elite

Компанія Stratasys

Промисловий принтер

Два екструдера

ABS 1,75 мм

200x200x250 мм

Вартість 20 тис. євро

3D Touch

Компанія Bits from Bytes

Персональний принтер

Три екструдера

ABS 3 мм

185x265x240 мм

Вартість 4,5 тис. євро

## Виготовлення та перевірка зразка за еталоном

Dimension Elite використовує білу нитку, надрукував дослідну модель за 7 годин з товщиною шару 0,254 мм. Для виготовлення деталі витрачено 120 см<sup>3</sup> ABS пластику, 1/10 котушки.

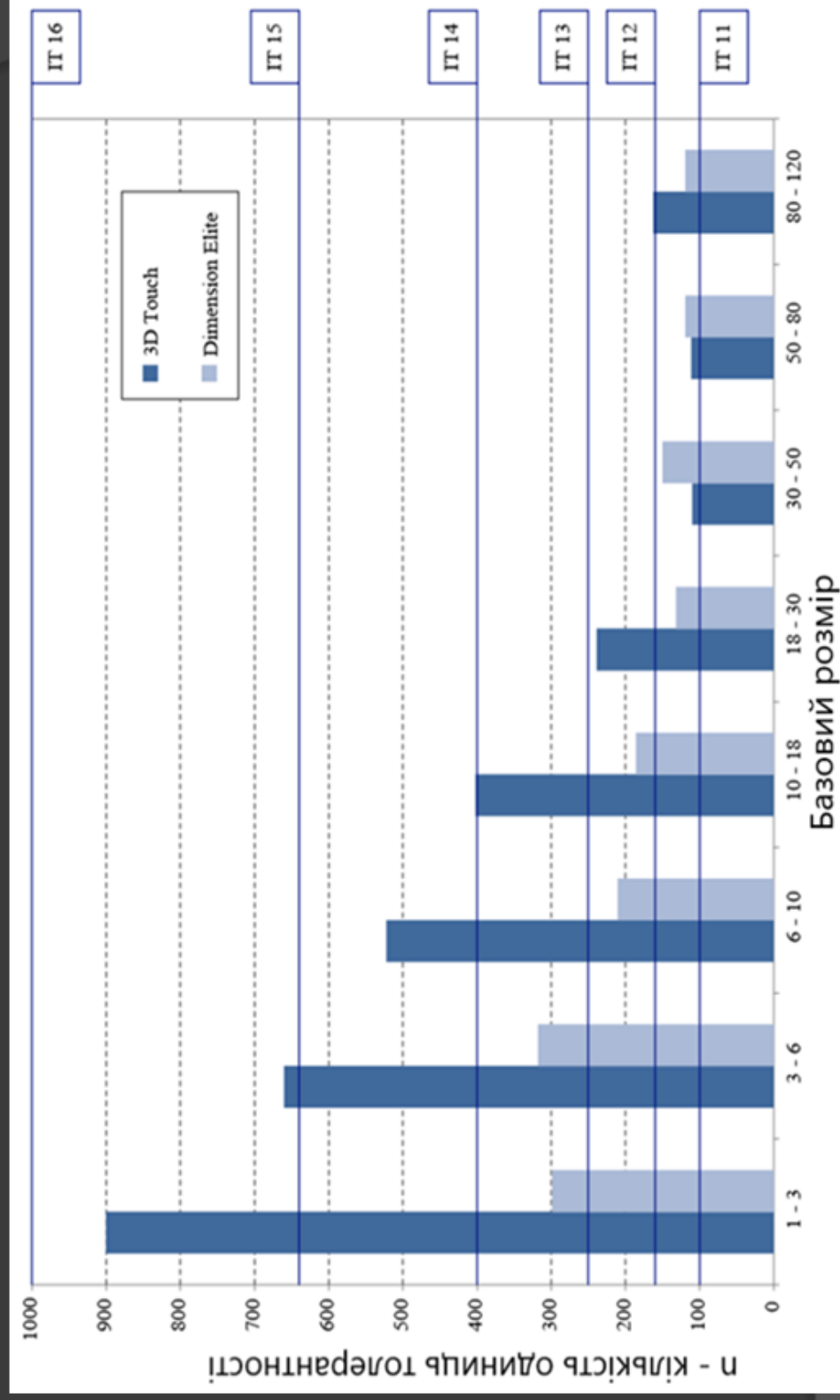


## Виготовлення та перевірка зразка за еталоном

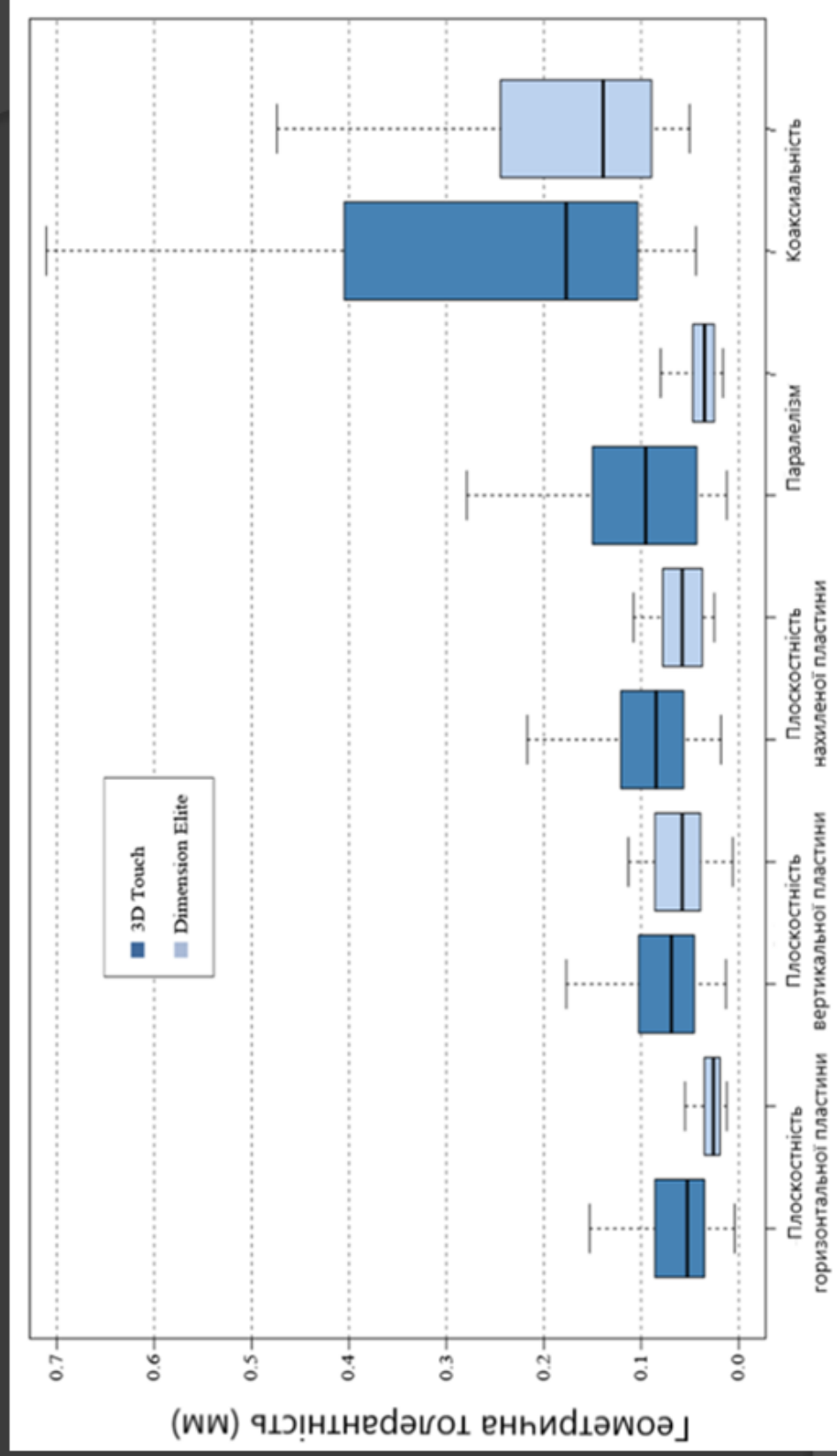
3D Touch використовує чорний пластик. Виготовлення 18 годин, товщина шару 0,125 мм. Було використано близько 80 г матеріалу ABS нової катушки.



# График точности вимірювань ІТ-класів для діапазонів базових розмірів



# График порівняння значень для різних геометричних допусків



## ВИСНОВОК

	Dimension Elite	3D Touch
<u>Геометрична точність</u>	+	-
<u>Деталізація</u>	+	-
Прості геометричні фігури	-	+
Складні за конфігурацією фігури	+	-
Час	+	-
Ціна	-	+
Термоусадка	+	-