МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет літакобудування

Кафедра технології виробництва літальних апаратів

# Пояснювальна записка

до дипломної роботи
(тип кваліфікаційної роботи)
магістра
(освітній рівень)

на тему «Підвищення ефективності виробництва оснастки та деталей АКТ з використанням адитивних технологій»
ХАІ.104.163н.24В.134.1901111 ПЗ

Виконав: здобувач 2 курсу, групи № 163н,
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
(код та найменування)
Спеціальність 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»
(код та найменування)
Освітня програма «Технології виробництва та ремонту літальних апаратів»
(найменування)
Цомпель Олександр Олександрович
(прізвище та ініціали здобувача)
Керівник Валерій СІКУЛЬСЬКИЙ
(ім'я та прізвище)
Рецензент Юрій ЧОРНИЙ
(ім'я та прізвище)

Харків – 2024

**Міністерство освіти і науки України**
**Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського**
**«Харківський авіаційний інститут»**

Факультет літакобудування

Кафедра технології виробництва літальних апаратів

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
(код та найменування)

Спеціальність 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»
(код та найменування)

Освітня програма «Технології виробництва та ремонту літальних апаратів»
(найменування)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
**Завідувач кафедри № 104**
_____ Катерина МАЙОРОВА
(підпис) (ім'я та прізвище)
«___» _____ 2024 р.

# З А В Д А Н Н Я
## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Цомпель Олександр Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Підвищення ефективності виробництва оснастки та деталей АКТ з використанням адитивних технологій»,
керівник кваліфікаційної роботи Сікульський Валерій Терентійович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Університету № _____ від « 22 » 04 2024 року

2. Термін подання здобувачем кваліфікаційної роботи 21 червня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи матеріали переддипломної практики, науково-технічної літератури, ресурсів Інтернету.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати) Розділ 1. Аналіз стану питання і постановка задач дослідження: огляд можливих варіантів використання технологій та матеріалів 3D-друку в авіаційній промисловості; основні матеріали для 3D-друку; класифікація

завдань для авіаційної промисловості; порівняльний аналіз матеріалів та визначення відповідних технологій для реалізації основних завдань адитивного виробництва. Розділ 2. Виготовлення адитивними методами формоутворюючої оснастки для виготовлення композитних деталей: опис оснастки, що виготовляється, та деталей; виготовлення оснастки на фрезерних верстатах з ЧПК; виготовлення оснастки адитивними методами; виготовлення засобів технічного оснащення для 3D-друку пористого заповнювача у композиційних панелях літаків. Розділ 3. Виготовлення деталей авіаційних конструкцій методами адитивної технології: завдання технології 3D-друку; 3D-друк металом в авіаційній промисловості; 3D-друк пластмасових деталей в авіації. Розділ 4. Модель оцінки витрат при адитивному виробництві в авіаційної промисловості: потенційні можливості економії та переваги адитивного виробництва; структурна схема моделі оцінки витрат; методичний підхід до оцінки елементів витрат з адитивного виробництву; порівняння вартості сталевого та пластикового оснащення для авіаційного скління.

5. Перелік графічного матеріалу презентація кваліфікаційної роботи.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Розділ 1 Аналіз стану питання і постановка задач дослідження | Сікульський В. Т., професор | 26.04.2024 | 10.06.2024 |
| Розділ 2 Виготовлення адитивними методами формоутворюючої оснастки для виготовлення композитних деталей | Сікульський В. Т., професор | 26.04.2024 | 10.06.2024 |
| Розділ 3 Виготовлення деталей авіаційних конструкцій методами адитивної технології | Сікульський В. Т., професор | 26.04.2024 | 10.06.2024 |
| Розділ 4 Модель оцінки витрат при адитивному виробництві в авіаційної промисловості | Сікульський В. Т., професор | 26.04.2024 | 10.06.2024 |
| Розділ 5 Пропозиції та рекомендації щодо підвищення ефективності виробництва оснастки та деталей акт з використанням | Сікульський В. Т., професор | 26.04.2024 | 10.06.2024 |

Нормоконтроль _____ Валерій СІКУЛЬСЬКИЙ «_10_» __06__ 20_24_ р.

(підпис) (ім’я та прізвище)

7. Дата видачі завдання «_26_» ____04____ 20_24_ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № п/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1 | Розділ 1 Аналіз стану питання і постановка задач дослідження | 04.05.2024 | |
| 2 | Розділ 2 Виготовлення адитивними методами формоутворюючої оснастки для виготовлення композитних деталей | 16.05.2024 | |
| 3 | Розділ 3 Виготовлення деталей авіаційних конструкцій методами адитивної технології | 28.05.2024 | |
| 4 | Розділ 4 Модель оцінки витрат при адитивному виробництві в авіаційної промисловості | 09.06.2024 | |
| 5 | Розділ 5 Пропозиції та рекомендації щодо підвищення ефективності виробництва оснастки та деталей акт з використанням | 10.06.2024 | |

**Здобувач** _____ Цомпель О. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

**Керівник кваліфікаційної роботи** _____ Валерій СІКУЛЬСЬКИЙ
( підпис) (ім'я та прізвище)

# ЗМІСТ

Реферат ..... 7

Вступ ..... 8

Розділ 1 Аналіз стану питання і постановка задач дослідження ..... 9

1.1 Огляд можливих варіантів використання технологій та матеріалів 3D-друку в авіаційній промисловості ..... 10

1.2 Опис видів технологій адитивного виробництва ..... 11

Фотополімеризація у ванні ..... 11

Струминне нанесення матеріалу ..... 12

Струминне нанесення сполучного ..... 12

Синтез на підкладці ..... 13

Екструзія матеріалу ..... 13

Пряме підведення енергії та матеріалу ..... 14

Листова ламінація ..... 15

1.3 Основні матеріали для 3D-друку ..... 16

1.4 Класифікація завдань для авіаційної промисловості ..... 18

1.5 Порівняльний аналіз матеріалів та визначення відповідних технологій для реалізації основних завдань адитивного виробництва ..... 20

1.5.1 Порівняльний аналіз матеріалів, що використовують в адитивному виробництві ..... 20

1.5.2 Створення функціональних прототипів ..... 23

1.5.3 Створення інструментів та оснащення (міцність, температура плавлення) ..... 24

1.5.4 Створення легких компонентів ..... 24

Висновки по розділу 1 ..... 26

Розділ 2 Виготовлення адитивними методами формоутворюючої оснастки для виготовлення композитних деталей ..... 27

2.1 Опис оснастки, що виготовляється, та деталей ..... 29

2.2 Виготовлення оснастки на фрезерних верстатах з ЧПК ..... 31

2.3 Виготовлення оснастки адитивними методами ..... 32

2.4 Порівняння технологій ..... 36
2.5 Виготовлення засобів технічного оснащення для 3D-друку пористого заповнювача у композиційних панелях літаків ..... 38
Особливості виготовлення ..... 42
Висновки по розділу 2 ..... 46
Розділ 3 Виготовлення деталей авіаційних конструкцій методами адитивної технології ..... 48
3.1 Завдання технології 3D-друку ..... 49
3.2 3D-друк металом в авіаційній промисловості ..... 50
3.3 3D-друк пластмасових деталей в авіації ..... 55
Висновки по розділу 3 ..... 56
Розділ 4 Модель оцінки витрат при адитивному виробництві в авіаційної промисловості ..... 57
4.1 Потенційні можливості економії та переваги адитивного виробництва ..... 58
4.2 Структурна схема моделі оцінки витрат ..... 60
4.3 Методичний підхід до оцінки елементів витрат з адитивного виробництву ..... 61
Структурування витрат та підхід до розрахунку критичної програми випуску ..... 64
4.4 Порівняння вартості сталевого та пластикового оснащення для авіаційного скління ..... 65
Висновки по розділу 4 ..... 66
Розділ 5 пропозиції та рекомендації щодо підвищення ефективності виробництва Оснастки та деталей акт з використанням ..... 67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ..... 71

# РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 70 с., 9 табл., 32 рис., 52 джерела.

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ПРОМИСЛОВІСТЬ, АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО, АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, 3D-ДРУК, 3D-ПРИНТЕР, МАТЕРІАЛИ 3D-ДРУКУ, ПОРИСТИЙ ЗАПОВНЮВАЧ, МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ВИТРАТ

Об’єкт дослідження – адитивних технологій виробництва оснастки та деталей авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Мета роботи – генезис, аналіз стану та тенденцій розвитку адитивних технологій 3D-друку, дослідження їхнього впливу на економіку та авіаційно-космічну галузь промисловості у світі і в Україні, проблем впровадження 3D-друку та шляхів їх вирішення.

Методи дослідження – системний та порівняльний аналіз науково-технічної літератури з проблеми впровадження адитивних технологій виробництва оснастки та деталей авіаційної та ракетно-космічної техніки; причинно-наслідкові зв’язки оцінки якості виробів від обраних технологій адитивного виробництва.

Проведено аналіз можливих варіантів використання технологій та матеріалів 3D-друку в авіаційній промисловості.

Проведено порівняльний аналіз матеріалів та визначення відповідних технологій для реалізації основних завдань роботи.

Надано опис формоутворюючої оснастки для композитних деталей: на фрезерних верстатах з ЧПК і адитивними методами. Проведено порівняння технологій.

Розглянуто виготовлення деталей авіаційних конструкцій методами адитивної технології з металу та пластмас.

Розроблено модель оцінки витрат при адитивному виробництві в авіаційної промисловості.

# ВСТУП

Одним з найбільш важливих і дорогих технологічних процесів (далі – ТП) при технологічної підготовці виробництва (далі – ТПВ) авіаційно-космічної техніки (далі – АКТ) є виготовлення формоутворювальної оснастки.

В даний час застосовують два методи відтворення формоутворювальних поверхонь технологічної оснастки: виготовлення фрезеруванням на верстатах з ЧПК та виготовлення за шаблонами.

Застосування ЧПК-верстатів вимагає залучення значних капіталовкладень через високу вартість обладнання, що часто є неприйнятним для компаній з обмеженим бюджетом. Крім того, чистове фрезерування криволінійних поверхонь вимагає значного часу роботи верстата для досягнення заданої шорсткості.

Виготовлення оснастки за шаблонами передбачає використання великої кількості ручної праці та багаторазового перенесення розмірів, що негативно позначається на трудомісткості виготовлення та точності деталей оснастки.

Пропонується використовувати адитивні технології 3D-друку для виготовлення формоутворювальної оснастки. Суть цих технологій у тому, що деталь створюється пошаровим додаванням матеріалу. Існує велика кількість видів адитивних технологій, що відрізняються за застосовуваними матеріалами (метали, термопласти, фотополімери тощо) та фізичним принципом нанесення матеріалу.

Слід зазначити, що вже накопичено досвід з промислового застосування адитивних технологій для виготовлення оснастки в ливарному виробництві. Методами 3D-друку виготовляються моделі, що виплавляються, і клеє-піщані форми. Застосування 3D-друку у ливарному виробництві показало високу ефективність.

Для виготовлення формоутворювальної оснастки доцільно застосовувати 3D-друк пластиком. Для цього підходять технології пошарового наплавлення матеріалу (Fused deposition modeling – FDM), затвердіння рідкого фотополімеру під дією випромінювання (SLA, DPL, MJM та ін.) та лазерного спікання порошку (SLS).

Очікується, що застосування 3D-друку призведе до різкого зниження вартості оснастки та прискорення її виробництва.

# РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Огляд можливих варіантів використання технологій та матеріалів 3D-друку в авіаційній промисловості

На сьогоднішній день, через постійне зростання і розвиток сфери 3D-друку, існує безліч технологій, що може зробити важким визначення того, які саме технології найкраще застосовувати для вирішення того чи іншого завдання.

За відносно короткий відрізок часу відбулась поява поняття і технологій швидкого прототипування (англ. Rapid Prototyping) та їх еволюція у адитивне виробництво (англ. Additive Manufacturing), тобто у той стан, коли застосування таких технологій стає економічно вигідним і вони займають свою нішу серед конвенціональних (традиційних) технологій високотехнологічного авіаційного виробництва [1]. Тому будемо розуміти адитивні процеси не як альтернативу, а як доповнення конвенціональних процесів, сукупність яких може і повинна застосовуватись для досягнення мети сучасного виробництва – забезпечення випуску потрібної на ринку продукції у потрібній кількості, потрібної якості з найменшими витратами.

У зв’язку з цим, у рамках цієї роботи будуть розглянуті групи технологій адитивного виробництва (далі – АВ), визначені у міжнародному стандарті ASTM F2792.1549323-1 визначає адитивні технології так: «Additive Technology – process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies», що в перекладі буде «Адитивні технології – процес з’єднання матеріалів для створення об’єктів заданими тривимірних цифрових моделей, зазвичай шар над шаром, на відміну від субтрактивных технологічних процесів». Зазначимо, шо не можна повністю погодитись з тим, що адитивні технології протиставляються субтрактивним. Мова йде про ге, що адитивні технології органічно доповнюють й розширюють спектр виробничих технологій.

Цей стандарт виділяє сім основних типів адитивних технологій:

1. Material Extrusion – витискування матеріалу;
2. Material Jetting – розбризкування основного матеріалу;
3. Binder Jetting – розбризкування зв’язуючого матеріалу;
4. Sheet Lamination – з’єднання листових матеріалів;
5. Vat Photopolymerization – фотополімеризація у ванні;
6. Powder Bed Fusion – розплавлення матеріалу в наперед сформованому шарі;
7. Directed Energy Deposition – безпосереднє підведення енергії у місце побудови.

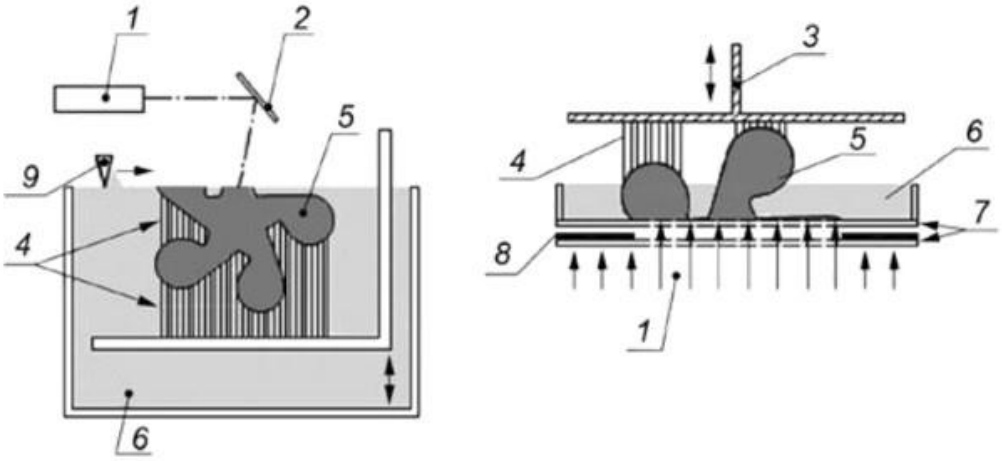
Суть таких технологій достатньо детально розглянута у сучасних підручниках та монографіях, наприклад у [2]. Зазначимо, що при виборі та впровадженні у виробництво будь-якого з перелічених процесів завжди постає перелік таких обов’язкових питань:

1. доступний матеріал та його фізико-механічні властивості;
2. що можна зробити (змінити, удосконалити) з формою деталі;
3. яка ефективність процесу.

## 1.2 Опис видів технологій адитивного виробництва

### Фотополімеризація у ванні

Фотополімеризація у ванні – це процес, при якому попередньо осаджений фотополімер вибірково опромінюється світловим випромінюванням. Під впливом світла сусідні полімерні ланцюги скріплюються один з одним. Процес фотополімеризації у ванні продемонстровано на рисунку 1.1.




а) б)

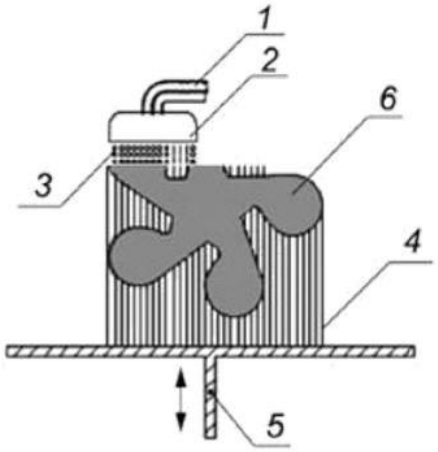
1 – джерело світла; 2 – дзеркало, що фокусує падаюче на нього світло; 3 – будівельна платформа та підйомник; 4 – структури підтримки виробу; 5 – одержуваний виріб; 6 – ванна з фотополімерним складом; 7 – прозорі пластини; 8 – фотошаблон; 9 – механізм, вирівнююча поверхня

Рисунок 1.1 – Схеми фотополімеризуючих процесів, що використовують різні джерела світла: а) фотополімеризація у ванні за допомогою лазера; б) фотополімеризація у ванні за допомогою керованого джерела ультрафіолетового випромінювання

Сировина: рідка або пастоподібна: фотореакційноздатна смола з наповнювачем або без нього.

## Струминне нанесення матеріалу

Струминне нанесення матеріалу – це процес адитивного виробництва, при якому виготовлення виробу здійснюється шляхом нанесення крапель будівельного матеріалу на будівельну платформу. Цей процес представлений на рисунку 1.2.




1 – система подачі сировини для складання та матеріалу підкладки; 2 – дозуючий пристрій (джерело світла або тепла); 3 – краплі будівельного матеріалу; 4 – структури підтримки виробу; 5 – будівельна платформа та підйомник; 6 – одержуваний виріб

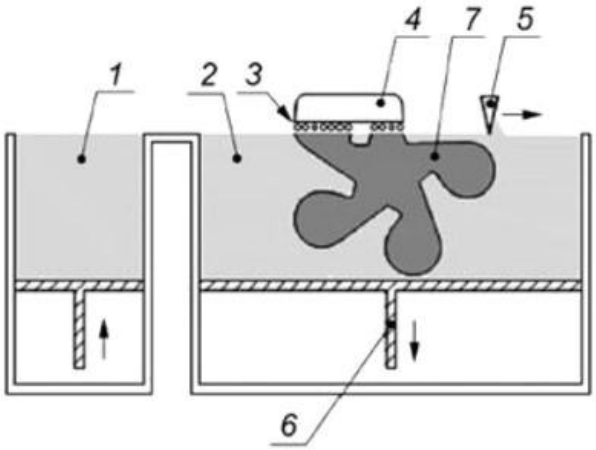
Рисунок 1.2 – Схема процесу струминного нанесення матеріалу

Сировина: рідкий фотополімер або розплавлений віск із наповнювачем або без нього.

## Струминне нанесення сполучного

Струминне нанесення сполучного – це процес адитивного виробництва, в якому рідкий сполучний матеріал вибірково наноситься на порошкові матеріали, що з’єднуються. Схема цього процесу надано на рисунку 1.3.

Сировина: порошки, порошкові суміші або частинки матеріалів, а також рідка адгезійна/зв’язувальна речовина.




1 – система подачі сполучного матеріалу; 2 – сполучний порошкоподібний матеріал, розподілений у ванні; 3 – рідкий сполучний матеріал; 4 – система подачі сполучного матеріалу з дозуючим пристроєм; 5 – пристрій розподілу порошку; 6 – будівельна платформа та підйомник; 7 – одержуваний виріб

Рисунок 1.3 – Схема процесу струминного нанесення сполучного

**Синтез на підкладці**

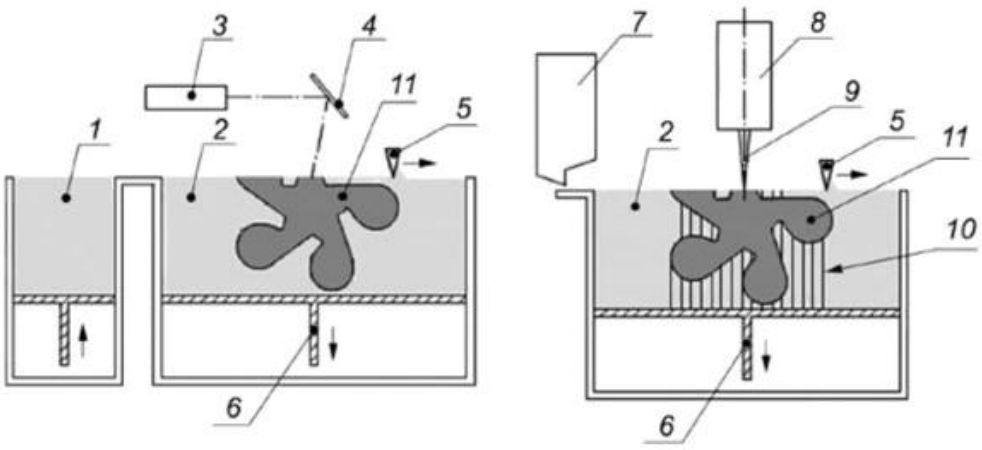
Синтез на підкладці – це процес адитивного виробництва, при якому розподілений по поверхні будівельної платформи сполучаємий порошковий матеріал повністю або вибірково розплавляється тепловою енергією за допомогою лазерного або електронно-променевого спікання. Схема двох типів процесу, залежно від джерела енергії, представлена на рисунку 2.4.

Сировина: різні порошки: термопластичні полімери, чисті метали або метали, структурна або технічна кераміка. Будь-який з порошкових матеріалів може бути використаний як з наповнювачами та сполучними речовинами, так і без них, залежно від конкретного процесу.

**Екструзія матеріалу**

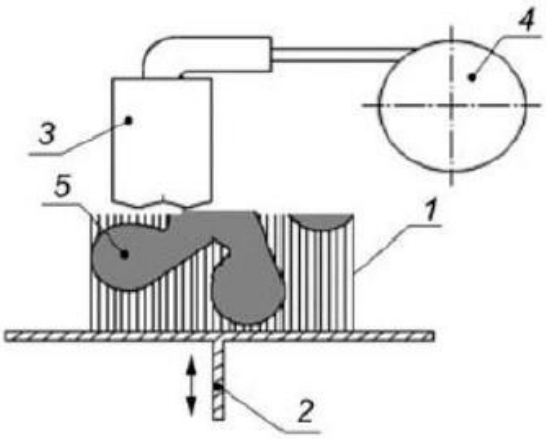
Екструзія матеріалу – це процес адитивного виробництва, у якому матеріал подається через сопло чи жиклер. Схему цього процесу надано на рисунку 1.5.

Сировина: волокно або пасти, як правило, термопласти та структурна кераміка.




1 – система подачі порошку; 2 – порошкоподібний матеріал, що заповнює ванну; 3 – лазер; 4 – дзеркало, що фокусує падаюче на нього світло; 5 – дозуючий пристрій; 6 – будівельна платформа; 7 – контейнер із порошкоподібною сировиною; 8 – електронно-променева гармата; 9 – сфокусований електронний пучок; 10 – структура підтримки виробу; 11 – одержуваний виріб

Рисунок 1.4 – Схема двох типів процесу синтезу на підкладці



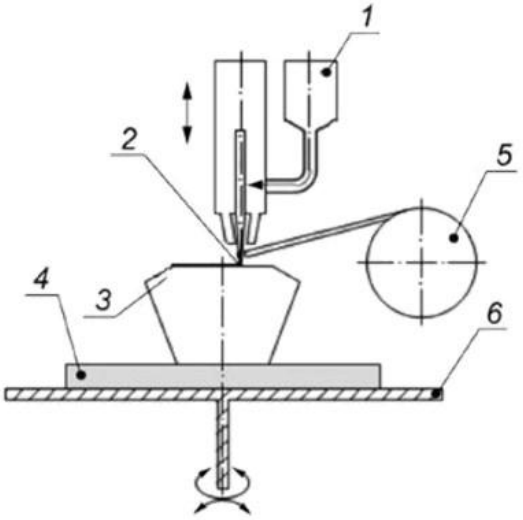

1 – структурні підтримки; 2 – будівельна платформа та підйомник; 3 – підігріваєме сопло; 4 – котушка із сировиною; 5 – одержуваний виріб

Рисунок 1.5 – Схема процесу екструзії матеріалу

**Пряме підведення енергії та матеріалу**

Пряме підведення енергії та матеріалу – це процес адитивного виробництва, при якому одночасно проводиться подача сировини та теплової енергії для його сплавлення у міру нанесення на будівельну платформу. Схема процесу прямого підведення енергії та матеріалу продемонстрована на рисунку 1.6.

Сировина: порошок або дріт, як правило, з металу; для певних застосувань до основної речовини можна додати керамічні частинки.



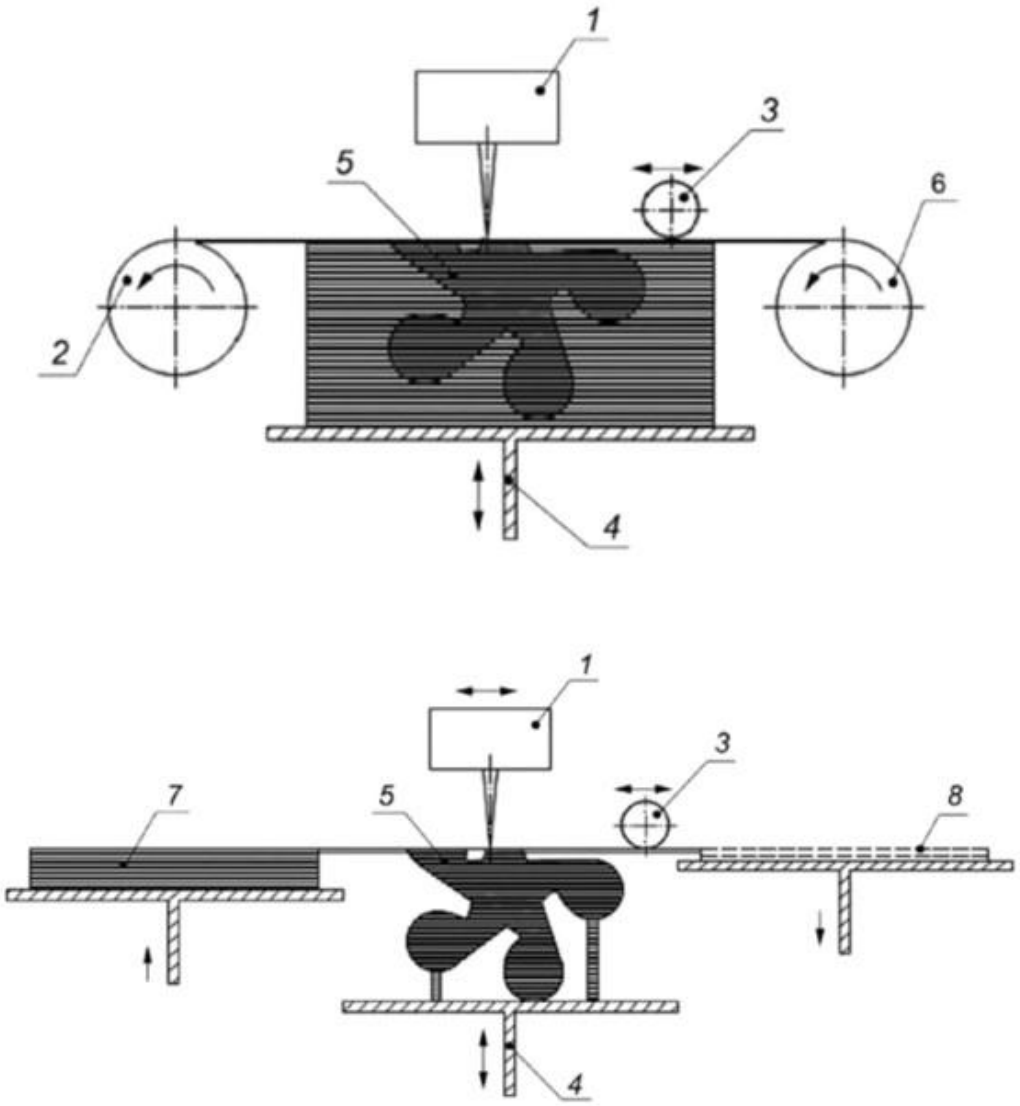

1 – ємність із порошком; 2 – спрямований промінь енергії, наприклад, лазер, електронний або плазмове-дуговий пучок; 3 – одержуваний виріб; 4 – підкладка; 5 – дріт (нитка) котушки; 6 – будівельний стіл

Рисунок 1.6 – Схема процесу прямого підведення енергії та матеріалу

**Листова ламінація**

Листова ламінація – це процес адитивного виробництва, який полягає у виготовленні деталі шляхом скріплення аркушів будівельного матеріалу. Схему цього процесу зображено рисунку 1.7.

Сировина: листовий матеріал, як правило, папір, металева фольга, полімери або композитні листи, які виготовлені переважно з металу або керамічного порошку та скріплені сполучною речовиною.




1 – відрізний механізм; 2 – рулон із надлишками матеріалу; 3 – барабан ламінатора; 4 – будівельна платформа та підйомник; 5 – одержуваний виріб; 6 – рулон з сировиною; 7 – зайвий матеріал; 8 – вихідний матеріал

Рисунок 1.7 – Схема процесу листової ламінації

## 1.3 Основні матеріали для 3D-друку

Зі стрімким розвитком сфери адитивного виробництва ринок матеріалів для 3D-друку також почав зростати. З’являється все більше специфічних для різних сфер матеріалів, так і нових матеріалів широкого використання. Поширена наступна класифікація конструкційних матеріалів [3], яку подано на рисунку 1.8.

Рисунок 1.8 – Класифікація конструкційних матеріалів для 3D-друку

Зараз найбільш популярними та вживаними в процесах АВ є такі матеріали [4; 5]:

1. Метали:
   - алюміній;
   - нержавіюча сталь;
   - титан;
   - тугоплавкі метали (тантал, вольфрам);
   - мідь;
   - бронза;
   - кобальт.

2. Неметали:

2.1. термопластичні нитки:
   - ABS;
   - PLA;
   - PETG, PET, PETT;
   - TPE, TPU, TPC;
   - PC;
   - ULTEM 9085, ULTEM 1010;

2.2. термопластичні порошки:
   - Нейлон 6;
   - Нейлон 11;
   - Нейлон 12;

2.3. фотополімерні смоли:
   - стандартна;
   - литьєва;

– прозора;
– високотемпературна

2.4. харчові матеріали:
– шоколад;
– пастоподібні матеріали.

3. Інші матеріали
– бетон;
– глина;
– гіпс;
– композитні матеріали;
– папір.

Окремо слід зазначити таку категорію матеріалів АВ, як композиційні матеріали (далі – КМ). Вони не включені в даний перелік матеріалів, оскільки повноцінний 3D-друк КМ на сьогоднішній день якщо і доступний, то тільки на стадії розробки. Те, що багато хто видає за 3D-друк композитами, насправді є печаткою все тими ж полімерними матеріалами, але додатково посилені різними армуючими волокнами [6]. При такому підході вихідний матеріал буде міцнішим за звичайні термопластичні полімери, але поступатиметься композиційним матеріалам, шари яких з'єднуються за допомогою спеціальних смол.

### 1.4 Класифікація завдань для авіаційної промисловості

Більшість завдань у межах авіаційної промисловості (далі – АП) має певну загальну специфіку. АВ може бути розглянуто як заміна класичним методам виробництва, що використовують багатоосьові фрезерні та токарні ЧПК-верстати, за більш високої економічної та виробничої ефективності, ніж класичні методи. Також АВ відкриває нові можливості у виробництві: за допомогою технологій АВ стає можливим виробництво виробів із складнішою геометрією, ніж це було можливо раніше; використання нових матеріалів також дозволяє покращити різні фізичні характеристики виробу (вага, міцність, термостійкість та інш.).

Розв’язувані завдання у галузі можна звести до кількох основних категорій [7]:

1. Створення функціональних прототипів.
2. Створення інструментів та оснастки.
3. Створення легких компонентів.
– салонні/бортові елементи;

– вентиляційні канали;
– бортові панелі;
– конструктивні металеві компоненти.

Специфіка завдань авіаційної промисловості [8]:

– дрібносерійне виробництво;
– зниження ваги деталей за збереження інших параметрів;
– збільшення ефективності використання матеріалів;
– виготовлення деталей складної геометрії.

***Дрібносерійне виробництво***

При порівнянні АВ та класичних методів виробництва стає очевидним, що класичні методи виробництва націлені на масове виготовлення виробів за допомогою вибудовування виробничого процесу по їх створенню, у той час як АВ більше націлене на дрібносерійне виробництво, але для більш широкого ряду виробів (деталей).

***Зниження ваги при збереженні інших параметрів***

З точки зору зниження ваги деталей, АВ дозволяє використовувати всілякі матеріали для досягнення потрібних параметрів. Спеціально для авіакосмічної галузі кілька десятків років тому були розроблені багатофункціональні інженерні термопластики – ULTEM 9085 та ULTEM 1010, покликані замінити алюмінієві та магнієві сплави. Також у галузі використовуються й інші матеріали при АВ, такі як інженерний термопласт PAEK (високоефективні полікетони), армований нейлон, кобальт, титан, нержавіюча сталь та багато інших. Це дозволяє вирішити потребу авіаційної промисловості в легких, механічно міцних та жаростійких матеріалах.

***Ефективність використання матеріалів***

Ефективність використання матеріалів під час виробництва також відома як коефіцієнт використання матеріалів (далі – КВМ) значно відрізняється у класичних методів виробництва та методів АВ. Залежно від складності геометрії деталі, що виготовляється, при використанні фрезерних верстатів з ЧПК КВМ може опускатися до 15 %, що вказує на максимально неефективне використання матеріалів. Дане явище обумовлено обмеженістю можливих процесів обробки матеріалів на фрезерних та токарних верстатах, що тягне за собою багатоступінчастість процесу та збільшення відходів при виробництві. При використанні методів АВ КВМ прагне до 100 %, так як вироб створюється шляхом пошарового додавання матеріалу, а не віднімання, як це відбувається у класичних методах.

***Виготовлення деталей складної геометрії***

Філософія методів АВ, що полягає у створенні виробу шляхом додавання матеріалу, дозволяє створювати деталі складної геометричної форми за один виробничий крок, у той час як при використанні інших методів виробництва дані деталі виготовлялися б за більшу кількість кроків, або взагалі не могли б бути виготовлені через складності геометричної форми.

З певних особливостей галузі можна назвати те, що завдання визначають критерії використовуваних матеріалів, а матеріали своєю чергою обмежують вибір групи технологій (рисунок 1.9).

Рисунок 1.9 – Методика визначення відповідної групи технологій залежно від завдання

## 1.5 Порівняльний аналіз матеріалів та визначення відповідних технологій для реалізації основних завдань адитивного виробництва

### 1.5.1 Порівняльний аналіз матеріалів, що використовують в адитивному виробництві

Виходячи з вищеописаних завдань авіаційної промисловості, що використовують АВ, визначимо відповідні множини матеріалів для кожної з них. Основними параметрами порівняння матеріалів будуть: гранична міцність, густина і температура плавлення матеріалу.

***Міцність*** (од. виміру – [Па]) – це властивість матеріалу протистояти деформації та руйнування під дією прикладених навантажень – розтягувальних, стискаючих, згинальних, скручувальних та зрізних.

На гістограмі, що наведена на рисунку 1.10, можна чітко побачити, що існує сильний розкид граничної міцності матеріалу між групою металів (метали і сплави) і матеріалами з групи неметалів (термопластичні полімери, фотополімерні смоли, інженерні термопласти). Візуально можна виділити кілька груп матеріалів за цим параметром (таблиця 1.1).

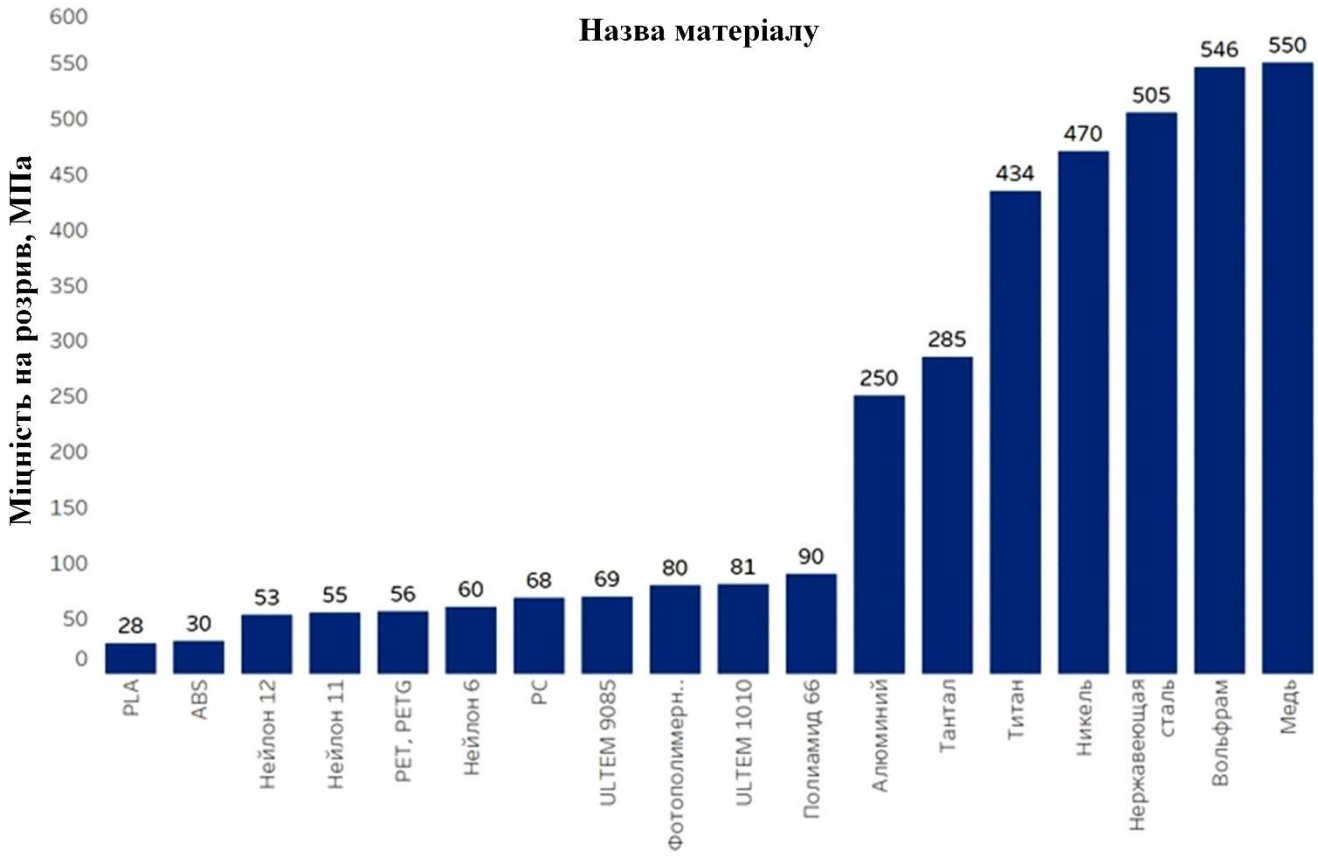



Рисунок 1.10 – Значення граничної міцності матеріалів

Таблиця 1.1 – Вербально-числова оцінка граничної міцності матеріалу

| Числове значення, МПа | Вербально-числова оцінка |
|---|---|
| Менш 50 | Низька |
| Від 50 до 100 | Середня |
| Від 100 до 300 | Висока |
| Понад 300 | Дуже висока |

***Густина*** (од. виміру – [г/см$^3$]) – скалярна фізична величина, що визначається як відношення маси тіла до займаного цим тілом об’єму. Густина матеріалу впливає на кінцеву вагу виробу.

Існує оцінка густини металів, згідно з якою метали із густиною менше 3 г/см$^3$ вважаються легкими, а метали із густиною вище 3 г/см$^3$ – важкими. Дану градацію пропонується застосовувати до всіх матеріалів, що розглядаються, при густині менше 3 г/см$^3$ вважати матеріал легким, а при густині більше 3 г/см$^3$ – важким для розглянутих завдань.

Температура плавлення (од. виміру – [℃]) – температура твердого кристалічного тіла (речовини), за якої воно здійснює перехід у рідкий стан.

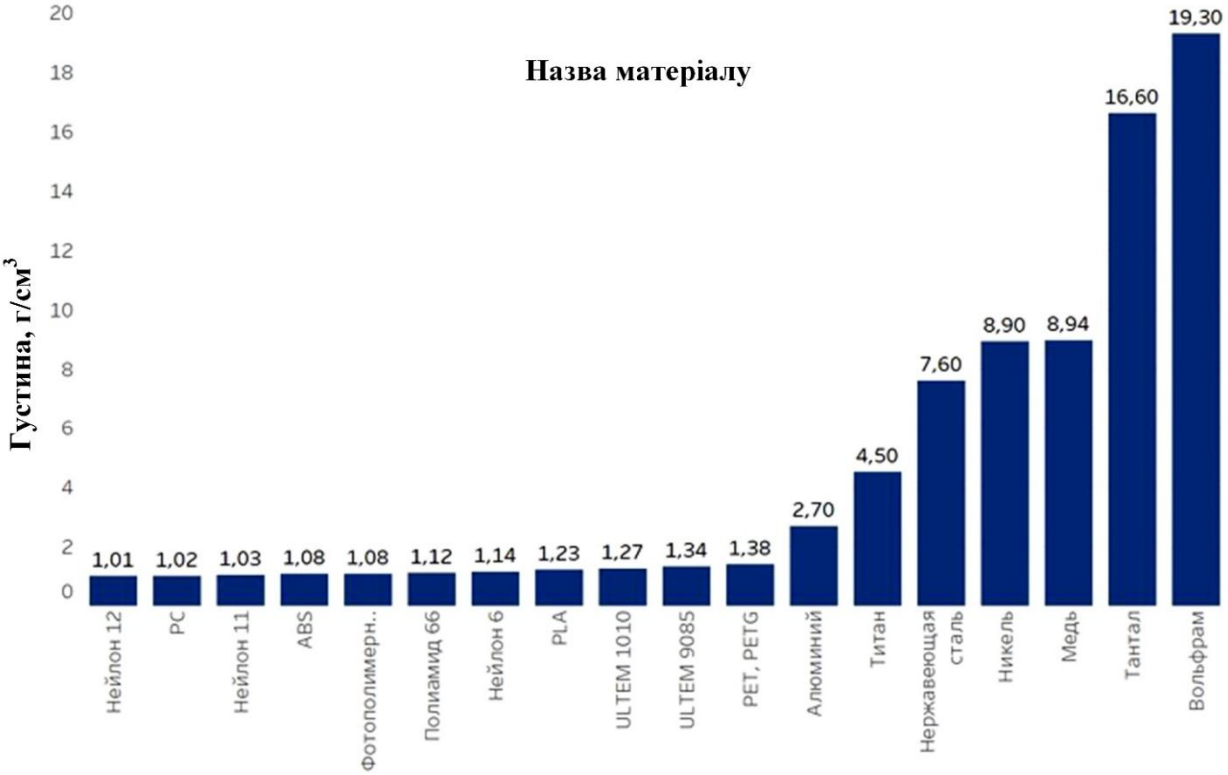



Рисунок 1.11 – Значення густини матеріалів

Температура плавлення прямопропорційна таким показникам як жаростійкість і жароміцність матеріалу, які важливі для вирішення деяких завдань (рисунок 1.12).

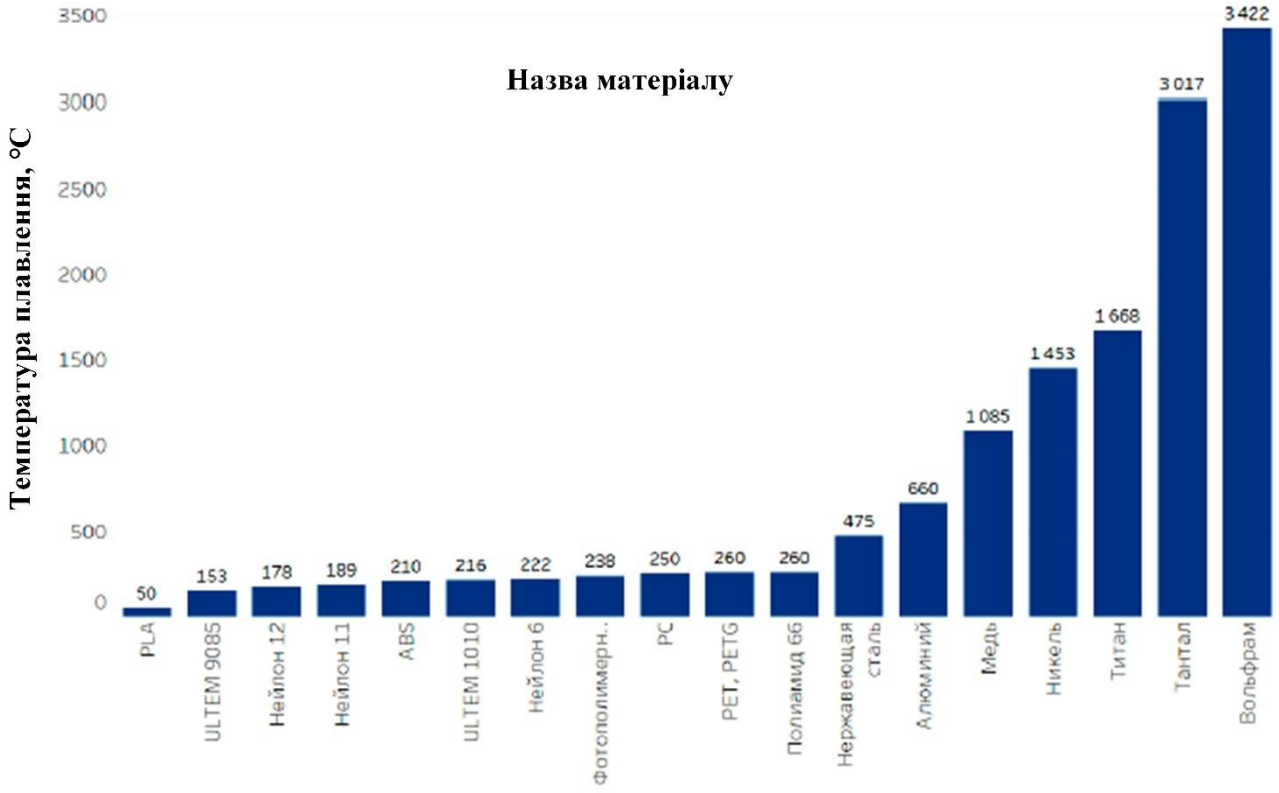



Рисунок 1.12 – Значення температури плавлення матеріалів

Таблиця 1.2 – Вербально-числова оцінка температури плавлення матеріалу

| Вербально-числова оцінка | Числове значення, ℃ |
|---|---|
| Низька | До 300 |
| Середня | Від 300 до 700 |
| Висока | Від 700 до 2000 |
| Дуже висока | Понад 2000 |

Розглянемо детальніше завдання, описані у розділі класифікації завдань для авіаційної промисловості та кожної групи завдань визначимо оптимальні матеріали, групи матеріалів, але в основі вибору матеріалів, визначимо найкращі види технологій АВ для цих завдань.

### 1.5.2 Створення функціональних прототипів

Для створення різних функціональних прототипів в АВ насамперед важливими є міцність матеріалу та його густина, що вплине на кінцеву вагу виробу [7]. Функціональні зразки є прототипами майбутньої деталі. На етапі функціонального прототипування необхідно отримати робочий прототип деталі, який матиме певні механічні показники для проведення тестування, а також повинен бути легким для усунення проблем при необхідності створення кількох прототипів однієї деталі та їх подальшого порівняння.

Виходячи з особливостей, описаних вище, визначимо найбільш підходящі матеріали (класи матеріалів). Обмеження можна сформулювати так: гранична міцність – не нижче середньої (див. таблицю 1.1), густина – легкі матеріали.

Виходячи з рисунку 1.13 можна зробити висновок, що найбільш підходящими матеріалами для створення функціональних прототипів є різні термопласти, фотополімерні смоли та деякі легкі метали. Цей результат зумовлений тим, що функціональне прототипування є дуже широкою областю, що вирішує безліч завдань.

Рисунок 1.13 – Матеріали, які підходять для завдань функціонального прототипування

Підходящими класами технологій для цих завдань будуть всі технології, що підтримують дані матеріали:

– екструзія матеріалу – термопластичні полімери, інженерні термопластичні полімери;
– фотополімеризація у ванні – фотополімерні смоли;
– синтез на підкладці, пряме підведення енергії та матеріалу – метали.

### 1.5.3 Створення інструментів та оснащення (міцність, температура плавлення)

Для створення інструментів та інструментального оснащення матеріали повинні мати досить високу механічну міцність, оскільки будь-які інструменти розраховані на тривале використання при великих механічних навантаженнях. Також такі матеріали повинні мати можливість бути використаними за певних середньо-високих температур на виробництві. Необхідність використання тугоплавких металів відсутня для такого роду завдань. Густина матеріалу для вирішення даної задачі має не таке суттєве значення як для інших завдань і її можна не враховувати під час виборів матеріалу.

Таким чином, можна сформулювати такі обмеження за параметрами:

1) гранична міцність – не нижче високої (див. табл. 1.1); 2) температура плавлення середня / висока (див. табл. 1.2). Список матеріалів, що відповідають цим критеріям: алюміній, мідь, нержавіюча сталь, нікель, кобальт.

Таким чином, найкращими варіантами для створення інструментів та оснастки будуть технології, здатні друкувати різними металами та металевими сплавами, як алюміній та титан. Даними групами технологій є синтез на підкладці та пряме підведення енергії та тепла. Хорошими прикладами технологій даних технологічних груп є SLS (Selective Laser Sintering) та DED (Direct Energy Deposition) відповідно.

### 1.5.4 Створення легких компонентів

***Вентиляційні канали, бортові панелі, салонні елементи.***

Специфіка завдання створення вентиляційних каналів повітряного судна (далі – ПС) полягає в тому, що вони повинні бути виготовлені з легкого, міцного матеріалу. Гранична міцність – не нижче середньої (див. табл. 1.1), оскільки взаємодія персоналу та пасажирів ПС з даними елементами максимізовано. Густина – легкі матеріали, оскільки дані елементи є критичними для конструкції ПС і зменшення ваги всіх таких компонентів при збереженні характеристик міцності незмінними сильно впливає економічну ефективність польоту [8]. Список матеріалів, що відповідають цим критеріям:

PC, PET, PETG, ULTEM 1010, ULTEM 9085, Нейлон 6, Нейлон 11, Нейлон 12, Поліамід 66, фотополімерні смоли тощо. Переважна більшість цих матеріалів є термопластичними полімерами. Виходячи з цього, найкращим вибором для створення вентиляційних каналів, бортових панелей та інших салонних елементів стане екструзія матеріалу.

Хорошим прикладом цієї групи технологій є технологія FDM (Fused Deposition Modeling), принтери на основі якої здатні друкувати усіма вище переліченими термопластами.

***Конструктивні металеві компоненти.***

Завдання цієї групи зводяться до того, що міцність і температура плавлення матеріалів виходять на перше місце, а далі, зазвичай, вибираються найлегші їх. Прикладом виробів, що належать до цієї категорії завдань, є лопаті двигуна ПС та форсунки двигуна. Таким чином, сформулюємо такі обмеження за значеннями параметрів матеріалів: гранична міцність – висока/дуже висока (див. табл. 1.1), температура плавлення – висока/дуже висока (див. табл. 1.2).

На рисунку 1.14 надано матеріали, міцність та температура плавлення яких достатня для вирішення даних задач. Всі ці матеріали є металами. Як видно на гістограмі, за інших рівних, густина титану значно вища за досить високих інших показників, тому даний метал є кращим вибором при створенні конструктивних компонентів ПС.

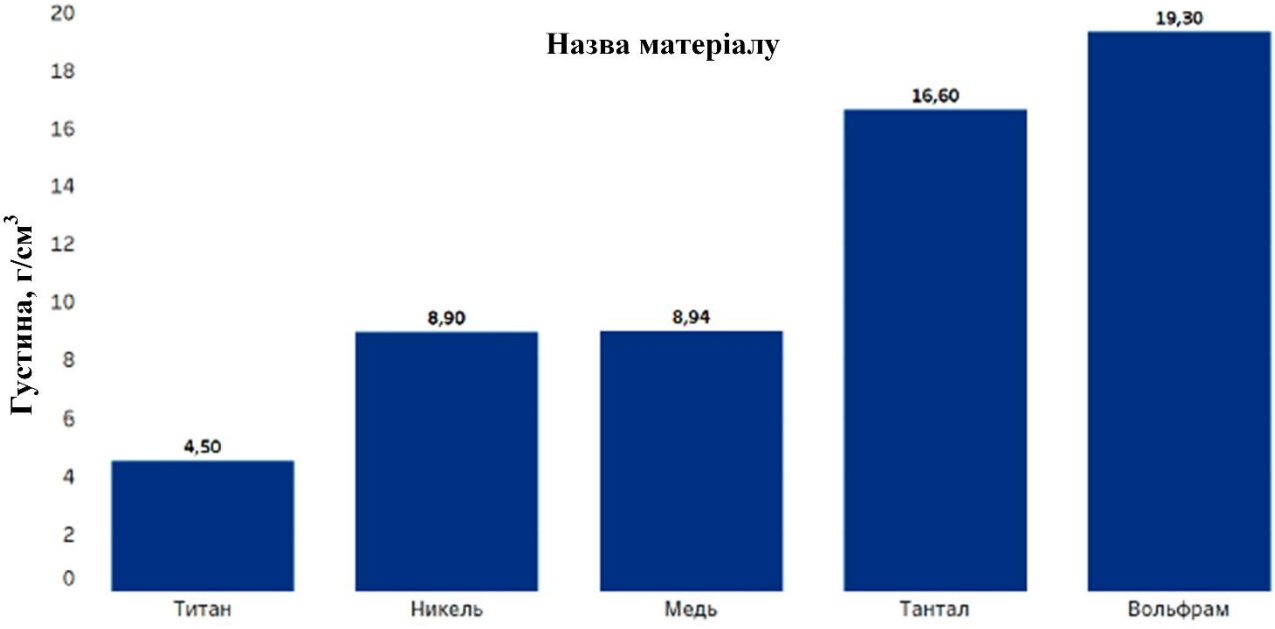



Рисунок 1.14 – Густина матеріалів, що підходять для створення конструктивних металевих компонентів

Пряме підведення енергії та тепла, а також синтез на підкладці є двома видами технологій АВ, що дозволяють використовувати титан як вихідну

сировину. Конкретними прикладами даних технологій можуть бути DED (Direct Energy Deposition) і EMB (Electron Beam Melting) відповідно.

## Висновки по розділу 1

1. Проведено огляд груп технологій АВ, наведено список найпопулярніших матеріалів 3D-друку.

2. Описано специфіку завдань АВ в АП. Виходячи зі специфіки кожного завдання, виведено якісні показники основних параметрів матеріалів для конкретної задачі. На підставі даних параметрів визначено оптимальні набори матеріалів для вирішення згаданих завдань. У відповідність до кожного завдання було запропоновано одну або більше груп технологій АВ, що використовує оптимальні матеріали для даної задачі.

# РОЗДІЛ 2 ВИГОТОВЛЕННЯ АДИТИВНИМИ МЕТОДАМИ ФОРМОУТВОРЮЮЧОЇ ОСНАСТКИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОМПОЗИТНИХ ДЕТАЛЕЙ

У сучасній техніці композити знаходять дедалі більше застосування у галузях авіа-, авто- і суднобудування. Перевага шаруватих композиційних матеріалів (далі – ШКМ) у тому, що можливо виготовляти легкі та міцні деталі подвійної та одинарної кривизни із застосуванням відносно простих ТП. Одним з найбільш важливих і дорогих техпроцесів при підготовці виробництва ШКМ є виготовлення формоутворювальної оснастки.

В даний час застосовують два методи відтворення формоутворювальних поверхонь оснастки: виготовлення фрезеруванням на верстатах з ЧПК та виготовлення за шаблонами.

Застосування ЧПК-верстатів потребує залучення значних капіталовкладень через високу вартість обладнання, що часто є неприйнятним для компаній з обмеженим бюджетом. Крім того, чистове фрезерування криволінійних поверхонь потребує значного часу роботи верстата для досягнення заданої шорсткості.

Виготовлення оснастки за шаблонами передбачає використання великої кількості ручної праці та багаторазового перенесення розмірів, що негативно позначається на трудомісткості виготовлення та точності деталей оснащення, що одержуються.

Пропонується використовувати адитивні технології 3D-друку для виготовлення формоутворювальної оснастки. Суть цих технологій полягає в тому, що деталь створюється пошаровим додаванням матеріалу. Існує велика кількість видів адитивних технологій, що відрізняються за застосовуваними матеріалами (метали, термопласти, фотополімери) та фізичним принципом нанесення матеріалу.

Слід зазначити, що вже накопичено досвід з промислового застосування адитивних технологій для виготовлення оснастки у ливарному виробництві [11, 12]. Методами 3D-друку виготовляються моделі, що виплавляються, і клеєпіщані форми. Застосування 3D-друку у ливарному виробництві показало високу ефективність [13].

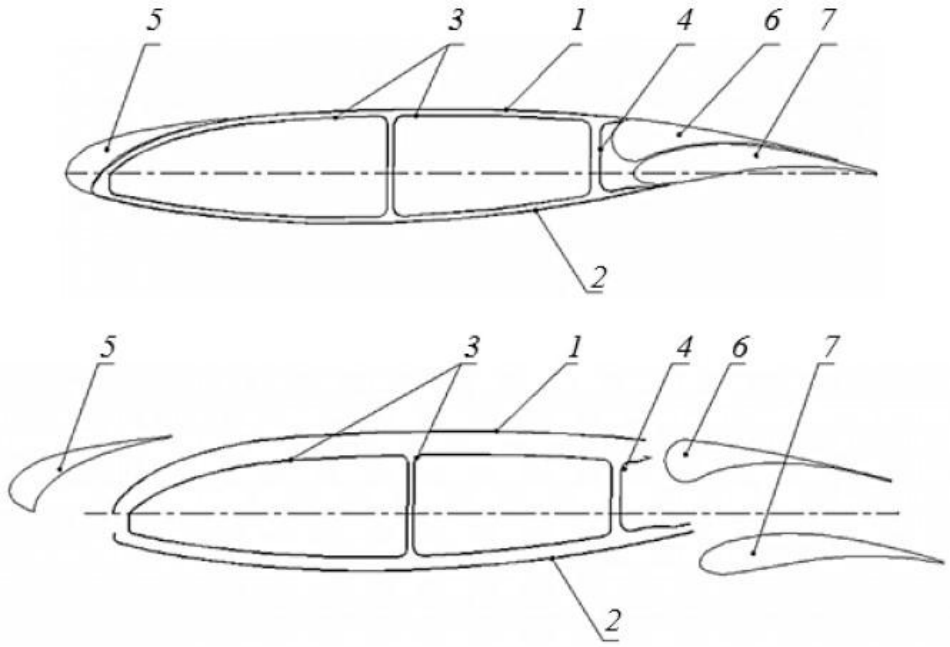
Для виготовлення формоутворювальної оснастки доцільно застосовувати 3D-друк пластиком. Для цього підходять технології пошарового наплавлення матеріалу (Fused deposition modeling – FDM), затвердіння рідкого фотополімеру під дією випромінювання (SLA, DPL, MJM та ін.) та лазерного спікання порошку (SLS).

Очікується, що застосування 3D-друку призведе до різкого зниження вартості оснастки та прискорення її виробництва.

## 2.1 Опис оснастки, що виготовляється, та деталей

Основне застосування ШКМ знайшли у деталях типу обшивок. Далі розглянемо технологію виготовлення оснастки для композитного крила інтегральної конструкції легкого багатоцільового літака [9], оскільки цей клас деталей має найбільший інтерес.

Силовий каркас крила складається з верхньої та нижньої обшивок, двох внутрішніх замкнутих контурів, задньої стінки та заповнювача між ними (рисунок 2.1).




1 – верхня обшивка; 2 – нижня обшивка; 3 – внутрішні силові контури;
4 – задня стінка;5 – передкрилок;6 – інтерцептор;7 – закрилок

Рисунок 2.1 – Перетин композитного крила інтегральної конструкції

Консоль крила є тришаровою конструкцією з габаритами 860×4500 мм (рисунок 2.2). Оснащення буде мати відповідні габарити, отже, для його виготовлення буде потрібно або 3D-принтер з відповідною робочою зоною, або необхідно розділити оснастку на кілька елементів для зменшення потрібних розмірів адитивного обладнання і, як наслідок, зменшення його вартості.

Існує два підходи до виготовлення оснастки. У першому випадку формоутворювальне оснащення виготовляється на 3D-принтері відразу готове до використання після доопрацювання поверхні до необхідної шорсткості. Перевага цієї схеми в тому, що відсутні переноси розмірів; технологічний ланцюжок, трудомісткість і кількість матеріалу, що використовується, мінімальні. Головним недоліком такого оснащення є відмінність температурних коефіцієнтів лінійного розширення (далі – ТКЛР) матеріалів оснастки та

композитної деталі. Як було показано в роботі [10], різна температурна деформація може викликати суттєву напругу та відхилення розмірів одержуваних деталей, особливо якщо вони мають великі габарити. Цей недолік може бути вирішальним під час переходу до другого методу виготовлення оснастки.

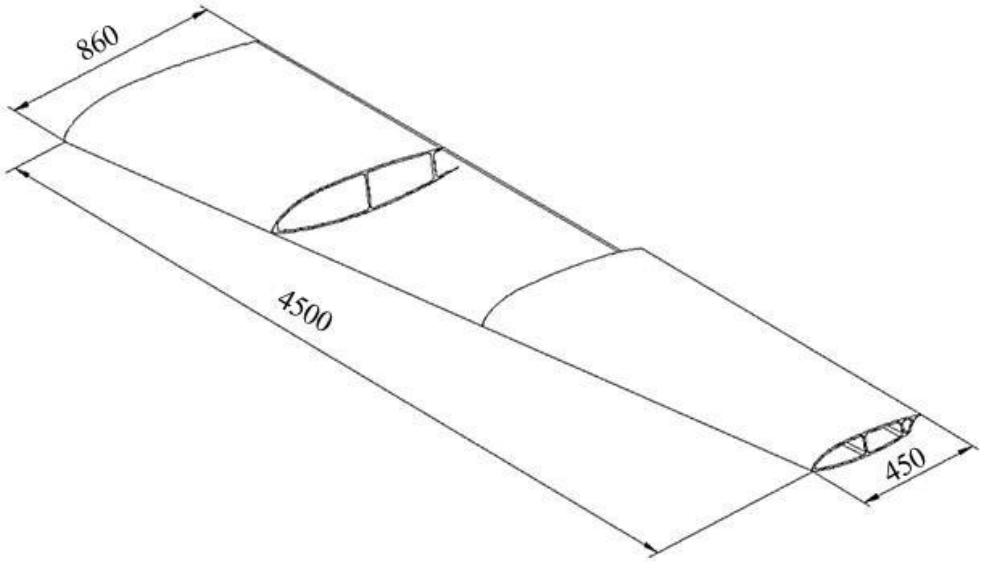



Рисунок 2.2 – Консоль легкого багатоцільового літака

У другому випадку спочатку виготовляється майстер-модель крила, а формоутворювальне оснащення виробляється зняттям зліпків із цієї моделі. У цьому випадку матеріал деталі та оснастки збігаються, всі температурні спотворення зводяться до мінімуму. Становиться також можливим підвищити температуру затвердіння та використовувати більш досконалі сполучні, оскільки матеріал для 3D-друку – це термопластичні полімери з максимальною робочою температурою від 60 °С (PLA-пластик) до 120 °С (полікарбонат PC). При використанні формоутворювальної оснастки з КМ можна збільшувати температуру затвердіння до 200 °С.

Через необхідність виготовляти оснащення другого порядку у вигляді майстер-моделі зростають трудомісткість, матеріаломісткість, тривалість виготовлення і, як наслідок, вартість кінцевого продукту, а через перенесення геометричних розмірів зменшується точність деталей оснастки та погіршується технологія.

Основним критерієм вибору підходу виготовлення оснастки є температура затвердіння сполучного. Якщо сполучне затверджується при кімнатній температурі або при незначному нагріванні, допускається використання оснастки з термопластів. Якщо сполучне затверджується з

витримкою при температурі вище, ніж робоча температура матеріалу для 3D-друку, необхідно використовувати проміжну майстер-модель.

### 2.2 Виготовлення оснастки на фрезерних верстатах з ЧПК

В даний час широко застосовується виготовлення формоутворювальної оснастки на верстатах з ЧПК. Основними етапами цієї технології є написання керуючої програми (далі – Кер.Пр.) для верстата, чорнова та чистова обробка, фінішне доведення поверхні (шліфування та нанесення покриттів).

Основними витратами у технології виготовлення оснастки фрезеруванням становлять витрати на амортизацію фрезерного верстата та матеріал. Вартість фрезерних трьохкоординатних верстатів приблизно пропорційна розмірам оброблюваної області. Отже, чим більші розміри оснастки, тим дорожче вийде обробка однієї одиниці площі формоутворюючої поверхні.

Витрати на виготовлення оснастки, виконаної фрезеруванням, можна оцінити за наступною формулою:

$$A_{\text{фрез}} = P_{\text{верст}} \cdot T_{\text{фрез}} + P_{\text{заг}} \cdot V_{\text{заг}}, \tag{2.1}$$

де $P_{\text{верст}}$ – вартість роботи верстата за 1 год., грн/год.;

$T_{\text{фрез}}$ – тривалість роботи верстата, год.;

$P_{\text{заг}}$ – вартість матеріалу заготівки, грн;

$V_{\text{заг}}$ – об’єм заготівки для виготовлення матриці, м$^3$.

Вартість роботи верстата складається з витрат на електроенергію та амортизацію:

$$P_{\text{верст}} = N \cdot A_{\text{ел}} + \frac{C_{\text{верст}}}{T}, \tag{2.2}$$

де $N$ – потужність, що споживається верстатом, кВт;

$A_{\text{ел}}$ – вартість електроенергії, грн;

$C_{\text{верст}}$ – вартість верстата, грн;

$T$ – амортизаційний період (прийнято 4 роки – 8 000 год.).

Тривалість роботи верстата оцінюється за формулою

$$T_{\text{фрез}} = \frac{V_{\text{заг}} - V_{\text{осн}}}{S_{\text{обр 1}}} + \frac{S_{\text{чист}}}{S_{\text{обр 2}}}, \tag{2.3}$$

де $V_{\text{осн}}$ – об’єм готової оснастки (визначається за CAD-моделі), м$^3$;

$S_{\text{обр 1}}$ – швидкість видалення матеріалу (чорнової обробки), м$^3$/год.;

$S_{\text{обр 2}}$ – швидкість оброблення чистової поверхні, м$^3$/год.;

$S_{\text{чист}}$ – площа чистової поверхні, що обробляється, м$^2$.

Об’єм заготовки для фрезерування $V_{заг}$ і об’єм готової оснастки $V_{осн}$ визначаються множенням об’єму оснастки за габаритами на статистичний емпіричний коефіцієнт. Для заготовок під фрезерування цей коефіцієнт дорівнює 0,8, а готової оснастки 0,6.

Продуктивність фрезерного обладнання залежить від режимів обробки. Для порівняння обрано режим з подачею 1500 мм/хв. і зніманням матеріалу в 45 мм$^2$ для чорнової обробки (продуктивність 0,00405 м$^3$/год.), а також з подачею 1000 мм/хв. і кроком 0,6 мм для чистової обробки (продуктивність 0,036 м$^2$/год.). Таким чином, час, необхідний для обробки 1 м$^2$ криволінійної поверхні склав в середньому 40 год. для оснащення легкого багатоцільового літака [14].

### 2.3 Виготовлення оснастки адитивними методами

Зараз існує велика кількість різних видів адитивних технологій, які відрізняються за застосовуваними матеріалами та фізичним принципом вирощування деталей. Виділяють сім основних технологій:

1) процеси з затвердінням фотополімеру у ємності (SLA, DPL);

2) процеси екструзії (FDM);

3) вибіркове сплавлення порошкового шару (SLS, SLM, EBM, SMS);

4) спрямоване нанесення порошкових матеріалів з подальшим сплавленням (LENS, DMD);

5) з’єднання листових матеріалів (ламінування) (LOM, UC);

6) струминний 3D-друк (MJM, PJ);

7) склеювання порошків (3DP).

Від формоутворювальної оснастки не потребується великої міцності, тому доцільно застосовувати пластик для 3D-друку, оскільки друк пластиком на порядок дешевший, ніж друк металами.

Друк пластиком реалізується в таких технологіях, як моделювання наплавленням, затвердіння фотополімерів, струминний 3D-друк та спікання порошків. Оскільки оснащення є великогабаритною деталлю, то недоцільно використовувати процеси, в яких матеріал заповнює весь об’єм робочої зони через збільшення витрат на матеріал. Тому процеси з затвердінням фотополімерів у ємності та сплавлення порошків надалі не розглядатимуться.

Найбільш перспективними технологіями для виготовлення оснастки є виготовлення екструзією (FDM) і процеси струминної печаті (MJM, PJ).

***FDM-технологія.*** Моделювання методом наплавлення в даний час найбільш поширене. Адитивне обладнання представлене від настільних 3D-

принтерів до промислових апаратів із робочою зоною в кілька метрів. Процес друку являє собою нанесення матеріалу тонкою смужкою по керуючому шаблону відповідно до комп'ютерної моделі деталі. Шари наносяться соплом, що розігріте до температури напіврідкого стану пластику. Пластик подається в сопло у вигляді нитки, що калібрується. Найбільш поширені матеріали, з якими працюють за FDM-технологією, та їх характеристики надано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Пластики, які застосовуються для моделювання методом наплавлення

| Матеріал | Температура друку, °С | Максимальна температура експлуатації, °С | Приблизна вартість, грн/кг | ТКЛР: $\alpha \cdot 10^5$, $K^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|
| PLA | 185–210 | 50 | 570 | 4–5 |
| ABS | 210–250 | 100 | 570 | 8–10 |
| PC | 270–310 | 130 | 870 | 6–7 |
| Nylon | 240–260 | 50–70 | 870 | 4 |
| PETG | 220–250 | 70 | 610 | 6,6 |

Перевагами FDM-технології є низька вартість обладнання та матеріалу, можливість виготовляти обладнання під великогабаритні деталі без суттєвого збільшення вартості. Недоліком цієї технології є груба шорсткість поверхні, яка може досягати значень 20 % від висоти наплавленого шару [15]. Так, при товщині шару 0,254 мм шорсткість вздовж напрямку побудови становить Ra≈20–35, а за товщини шару 0,178 мм – Ra=12–25. Слід зазначити, що шорсткість має спрямований характер і при вимірі паралельно шарам може становити Ra≈0,5–4.

Для отримання гладкої поверхні та використання її як формоутворювальне оснащення необхідно доопрацьовувати поверхню FDM-деталей.

Оскільки в процесі 3D-друку методом FDM існує перепад температур у середньому 200 °С, очікується поява температурних деформацій на великогабаритних деталях. Для компенсації цих деформацій необхідно розробляти математичні моделі FDM-процесу та алгоритми оптимізації вихідної геометричної форми деталей. Певного успіху в цій галузі досягла компанія Ansys при моделюванні лазерного спікання металевих порошків [16, 17], яка запропонувала готовий програмний комплекс. Цей комплекс дозволяє моделювати весь процес 3D-друку методом кінцевих елементів (далі – МКЕ). Для розрахунку використовуються рівняння теплопередачі та статичного аналізу, а

також файл g-коду для моделювання руху лазера. У роботі [18] пропонується математична модель FDM-процесу для розрахунку деформації у вигляді вигину при температурному усаджені твердотільних об'єктів, при цьому моделювання порожнистих деталей зі складною формою не підтримується. У роботі [19] пропонується алгоритм модифікації вихідної моделі для компенсації заданої деформації. У роботі [20] розглядається побудова великогабаритних об'єктів методом FDM і виконується термоміцнісний аналіз МКЕ на основі даних програми друку у вигляді g-коду.

Витрати на виготовлення оснастки, виконаної 3D-друком за технологією FDM, оцінюється за формулою:

$$A_{\text{пр}} = P_{\text{пр}} \cdot T_{\text{пр}} + P_{\text{пласт}} \cdot V_{\text{осн}}, \tag{2.4}$$

де $P_{\text{пр}}$ – вартість роботи принтера за 1 год., грн;

$T_{\text{пр}}$ – тривалість роботи 3D-принтера, год.;

$P_{\text{пласт}}$ – вартість матеріалу для друку, грн/м$^3$;

$V_{\text{осн}}$ – об'єм надрукованої оснастки, м$^3$.

Тривалість роботи 3D-принтера оцінюється за формулою:

$$T_{\text{пр}} = \frac{Z \cdot V_{\text{друк}}}{S_{\text{друк}}}, \tag{2.5}$$

де $Z$ – коефіцієнт заповнення об'єму (цілком достатньо заповнення 30 %);

$V_{\text{друк}}$ – об'єм пластику (визначається за комп'ютерною моделлю), м$^3$;

$S_{\text{друк}}$ – швидкість друку, м$^3$/год.

Продуктивність 3D-друку залежить від розмірів екструдера, товщини шару та швидкості руху екструдера. Для порівняння обрано: екструдер діаметром 3 мм, товщина шару, що наплавляється, 1 мм і швидкість руху екструдера 60 мм/с. Таким чином, швидкість друку $S_{\text{друк}}$ виявилася рівною 0,000648 м$^3$/год.

***Технології MJM та PJ.*** Технологія струминного друку з'явилася відносно нещодавно і застосовується у багатьох галузях – від біодруку до багатокомпонентного виробництва функціональних деталей. Друк фотополімерами реалізують за допомогою технологій MJM (Multi Jet Manufacturing) та PJ (PolyJet). Незважаючи на широкий спектр застосування, ці технології все ще мало поширені, частково за причиною дії патенту та монополії компанії Object Geometries на виготовлення такого обладнання. Тому вартість принтерів для струминного 3D-друку приблизно в 40 разів більша, ніж принтерів FDM, а матеріал для друку (фотополімер) у 10–20 разів дорожчий,

ніж пластик для FDM-принтерів. Однак можливості цієї технології становлять інтерес, і при зниженні вартості на матеріал та обладнання її застосування буде виправданим.

Сутність процесу струменевого друку полягає у нанесенні рідкого фотополімеру на попередній шар (або на підкладку) та затвердінні під ультрафіолетом. Фотополімер наносять з допомогою друкуючої головки з великої кількістю сопел. Завдяки можливості наносити шари завтовшки 0,01 мм, поверхня деталей виходить дуже гладкою, з шорсткістю в діапазоні Ra=0,9–2,2 [21, 22]. Таким чином, відсутня необхідність додаткової обробки одержуваних деталей, достатньо буде провести ґрунтування та фарбування формоутворювальних поверхонь оснастки. Застосовувані фотополімери та їх характеристики надано у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Застосовувані фотополімери для струминного 3D-друку

| Матеріал | Максимальна температура експлуатації, °С | Вартість, грн/л |
|---|---|---|
| Конструкційні – FullCure 720/835/840/850 RGD5160-DM | 45–60 | ~8 950 |
| Для підтримуючих структур – FullCure 705 (водорозчинний) | – | ~4 475 |

Продуктивність принтерів для струминного друку залежить від кількості сопел друкувальної головки і товщини матеріалу, що наноситься. У свою чергу, час, необхідний для виготовлення деталі, залежить переважно від висоти цієї деталі (вздовж напрямку вирощування). За даними роботи [23] швидкість друку за технологією PolyJet становить у середньому 9 мм/год. при товщині шару 28 мкм.

Витрати на виготовлення оснастки, виконаної струменевим 3D-друком, оцінюють за тією ж формулою (2.4), що і для технології FDM.

Тривалість друку можна оцінити за формулою

$$T_{\text{пр}} = \frac{Z_{max}}{S_{\text{друк}}}, \tag{2.6}$$

де $Z_{max}$ – максимальний габаритний розмір у напрямку Z, мм;

$S_{\text{друк}}$ – швидкість друку, м$^3$/год.

Можливою проблемою при використанні фотополімерів може стати поводка деталей через усадку пластику при затвердінні, тому процес друку фотополімерами також потребує математичного моделювання.

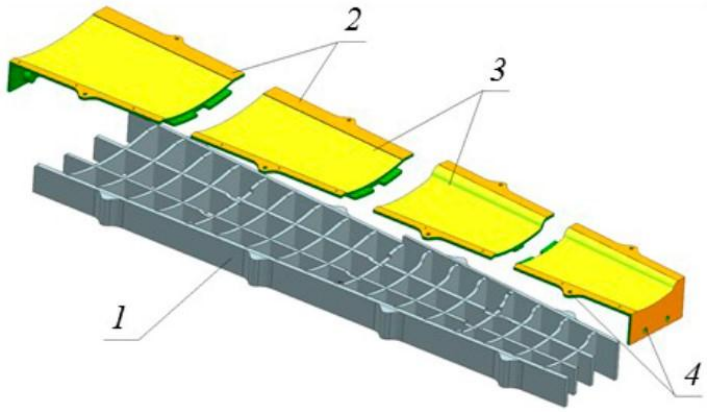
Приклади доступного адитивного обладнання наведено в таблиці 2.3. Слід зазначити, що існує велика кількість 3D-принтерів, що працюють за технологією FDM, тоді як тільки один принтер за технологією PolyJet підходить для виготовлення оснастки (дані про обладнання взяті з відкритих науково-технічних джерел).

Таблиця 2.3 – Приклади адитивного обладнання

| Найменування обладнання | Технологія | Приблизна вартість, USD (грн) | Розміри робочої області (X,Y,Z), м |
|---|---|---|---|
| 3Dpunlimited 3DP1000 | FDM | 17 000 USD (678 650 грн) | 1×1×0,5 |
| SUMPOD MEGA XL Version 2 | FDM | 10 000 USD (399 200 грн) | 1,8×1×1,4 |
| BigRep One.2 | FDM | 36 000 USD (1 437 140 грн.) | 1×1×1,1 |
| Цар 3D-принтер | FDM | 500 000 руб. (223 700 грн) | 1,2×1,2×1,2 |
| Objet1000 | PolyJet | 600 000 USD (23 952 300 грн) | 1×0,8×0,5 |

## 2.4 Порівняння технологій

Для вибору найкращого способу виготовлення оснастки порівняємо ефективність кожного методу. Критеріями ефективності є вартість оснастки та час на її виготовлення. Вартість оснастки складається з вартості матеріалів та роботи обладнання. Витрати на заробітну плату робітникам не враховуються, оскільки вони передбачаються приблизно однаковими для всіх технологій. Як приклад розглянемо матрицю нижньої зовнішньої обшивки крила для легкого багатоцільового літака [14], яка зображена на рисунку 2.3, а також виготовлення формоутворювальних елементів, оскільки силовий каркас виготовляють однаково для кожної технології, що розглядається. Результати розрахунків надано в таблиці 2.4.




1 – силовий каркас; 2 – базові поверхні; 3 – формоутворюючі поверхні; 4 – базові отвори

Рисунок 2.3 – Складена матриця нижньої зовнішньої обшивки крила

Таблиця 2.4 – Вартість виготовлення оснастки за різними технологіями

| Технологія | Час на виготовлення, год. | Вартість виготовлення деталей, тис. грн | | |
|---|---|---|---|---|
| | | за матеріал | за роботу обладнання | Разом |
| Фрезерування | 172 | 117 | 31 | 148 |
| 3D-друк за технологією FDM | 71 | 25 | 4 | 29 |
| 3D-друк за технологією PolyJet | 511 | 317 | 615 | 932 |

Видно, що технологія FDM лідирує за всіма позиціями та становить інтерес для виробництва. У той же час технологія PolyJet виявилася не тільки дуже дорогою, а й низькопродуктивною. Таким чином, технологія FDM найбільше підходить для виготовлення великогабаритної оснастки.

Одним із перспективних є напрямок з постобробкою поверхні за допомогою технології FDM. Існують кілька видів постобробки для отримання гладкої поверхні: шпаклювання та шліфування, хімічне оплавлення, чистове фрезерування.

При шпаклюванні поверхні використовується ручна праця і, як наслідок, якість готової деталі належатиме від кваліфікації робітника. У той же час цей метод збільшує трудомісткість, пропорційну площі чистової поверхні. Так, на доведення 1 м$^2$ поверхні необхідно загалом 1,5 год.

При хімічному оплавленні деталь поміщається в атмосферу, насичену парами розчинника. Ця технологія підходить тільки для пластиків, які можуть бути розчинені будь-якою речовиною. Для PLA-пластику такими розчинниками

є дихлоретан і дихлорметан, які мають помірну токсичність. Для пластику ABS розчинником є ацетон. Нейлон, полікарбонат і пластик PET-G мають хімічну стійкість і не розчиняються. У той же час, при хімічному травленні можлива деформація деталі, тому процес вимагає додаткового контролю та дослідження впливу режимів обробки на точність контуру. Процес також вимагає якомога меншої товщини шару, що наплавляється, відомі випадки якісного застосування при товщині 0,1 мм. Ця вимога значно збільшить час, необхідний для виготовлення деталі.

При фрезеруванні знову виникає потреба у використанні дорогого фрезерного обладнання, що практично зводить до нуля всі переваги адитивної технології. У даному випадку лише підвищений коефіцієнт використання матеріалу може зменшити вартість оснастки. Прикладом такого підходу є компанія Local Motors, яка виготовила корпус автомобіля на 3D-принтері, а потім фрезеруванням було досягнуто гладкої поверхні [20]. Іншим підходом є використання спеціального адитивного обладнання, в якому в одному пристрої суміщені екструдер і фрезер – прикладом розвитку такої технології є SDM-технологія (Shape Deposition Manufacturing) [24].

У той же час існують розробки, спрямовані на зменшення шорсткості надрукованих деталей за допомогою зміни стратегії друку. Так, у роботах [25–27] пропонується під час друку фінішної поверхні спрямовувати сопло екструдера еквідистантно деталі, формуючи тим самим гладку поверхню. При цьому процес поділяється на два етапи: спочатку друкується шар за шаром більша частина деталі – силова (або підтримуючий каркас), потім екструдер оформляє чистову поверхню, здійснюючи трикоординатний рух уздовж утворюючих перерізів поверхні. Цей підхід дозволяє суттєво скоротити тривалість друку з використанням режимів з підвищеною продуктивністю (збільшена товщина шару та діаметр сопла). При цьому шорсткість залежить лише від параметрів друку чистової поверхні. У роботі [25] пропонується математична реалізація цього процесу з алгоритмом генерації керуючої програми. Реалізація цього підходу практично описана роботах [26, 27].

## 2.5 Виготовлення засобів технічного оснащення для 3D-друку пористого заповнювача у композиційних панелях літаків

На сучасних літаках широко застосовується шарувата обшивка, що складається з двох несучих шарів, з’єднаних між собою легким заповнювачем [28]. Матеріалами для нього можуть бути текстоліт, склотекстоліт, металева фольга – частіше з алюмінію, рідше зі сталі.

Така обшивка виходить дуже жорсткою за рахунок спільної роботи заповнювача та зовнішніх шарів. Основні переваги шаруватої обшивки полягають у тому, що погонний момент інерції у неї на порядок вищий, ніж у обшивки товщиною, що дорівнює сумарній товщині зовнішніх її шарів, і критичні напруження стиснення та зсуву при малій масі конструкції досить високі.

До недоліків пористого заповнювача, який виготовляється за класичною технологією, слід віднести

– проблема викладки склотканини;

– високу вартість виготовлення.

Переваги пористого заповнювача безпосередньо пов’язані з багатошаровою обшивкою, а саме:

– не потребує частого стрінгерного набору, що дозволяє значно зменшити число нервюр [29];

– якість поверхні крила з шаруватою обшивкою через відсутність заклепувальних швів виходить вищим;

– шарувата обшивка має гарні теплоізоляційні властивості, що робить вигідним її застосування на схильних до великого аеродинамічного нагрівання крилах надзвукових літаків, внутрішні обсяги яких зайняті пальним;

– звукопоглинання [30].

Конструкторсько-технологічна підготовка виробництва (далі – КТПВ) виробу або його окремих обсягів може проводитися як на самому підприємстві, так і може бути винесена на аутсорсинг повністю або частинами. Цикл тривалості КТПВ [31] значний і може змінюватись в залежності від обсягів продукції, що передбачається до серійного випуску. Для скорочення термінів КТПВ застосовуються адитивні технології, які дозволяють суттєво скоротити витрати на виготовлення засобів технологічного оснащення (далі – ЗТО) з урахуванням можливих змін, що проводяться на етапі конструктивно-технологічного відпрацювання (далі – КТВ).

При виготовленні оснастки на пористі листи стандартним способом, тобто при варіанті, коли ЗТО фрезеруються з алюмінієвих або сталевих заготовок, необхідно написати програмне забезпечення для фрезерного верстата, підібрати інструмент, який відповідає заготівлі, а також витратити верстатний час на виготовлення.

Враховуючи складності рельєфу ЗТО для пористого листа, інструмент може бути дуже різноманітний. На етапі КТВ можуть виникнути питання щодо відпрацювання технології, що потребують переробки ЗТО. У разі застосування

адитивних технологій під час виготовлення ЗТО з допомогою пластиків чи композиту, показаного на рисунку 2.4, інструмент не потрібний.

Не потрібні також дорогі ЗТО [32] для фрезерного верстата та дорогі спеціальні алюмінієві сплави.

Присутність людини під час роботи 3-D принтеру також необов’язково. Знижується вартість полімерів та композитів для 3-D друку в даний час, а також вартість самого обладнання для 3-D друку, тобто можна констатувати, що критична величина вартості виготовлення ЗТО на основі адитивних технологій вже подолана.

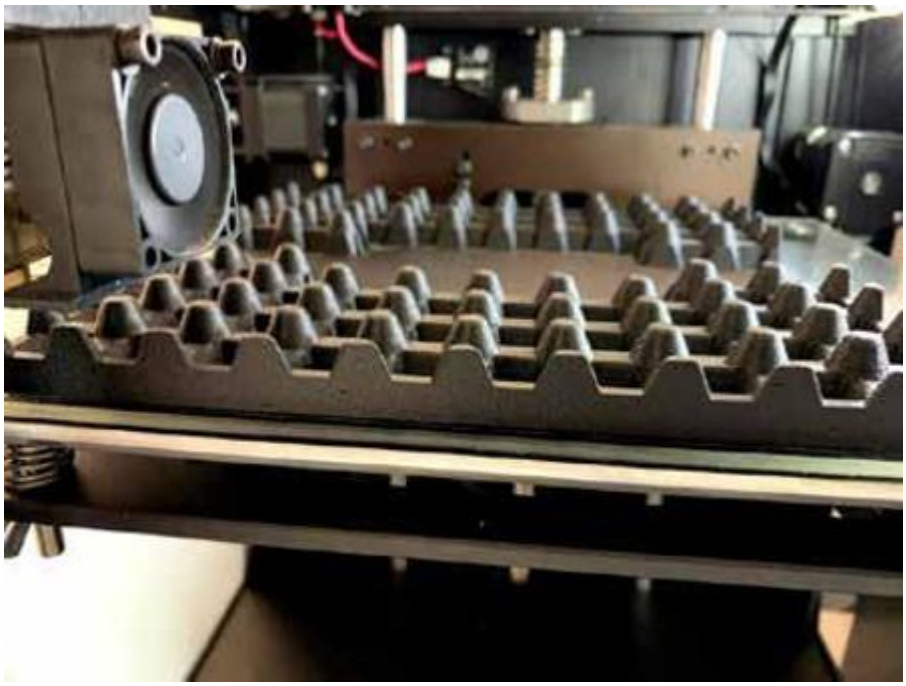


Рисунок 2.4 – Виготовлення ЗТО із інтегрованим кабель-каналом на 3D-принтері

Отриманий пористий комірчастий заповнювач (рисунок 2.5) є легким матеріалом різних габаритів і форми, що забезпечує широкий діапазон механічних властивостей.

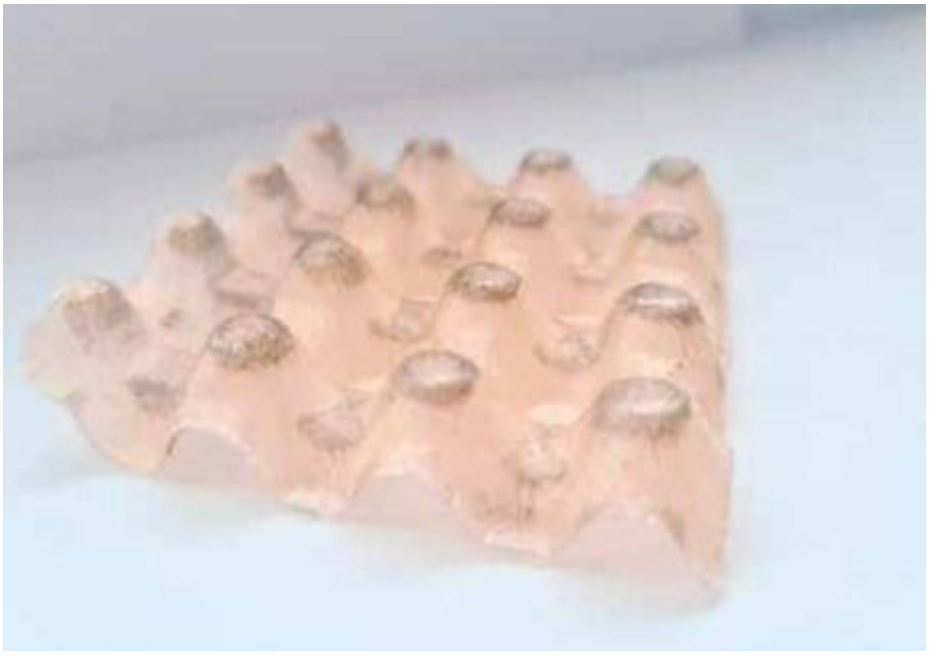


Рисунок 2.5 – Пористий комірчастий заповнювач, виготовлений із застосуванням адитивних технологій

Комірчастий заповнювач, як і інші види заповнювача (гофр, стільники), є не тільки сполучною, а й функціонально значущою частиною багатошарових конструкцій. У даний час в авіабудуванні поширене виготовлення обшивки ЛА з даним видом заповнювача.

Сучасні літаки часто мають обшивку, що нагадує за своїм виглядом сендвіч (зовні два несучі, об'ємні шари, з'єднані один з одним за допомогою легкої основи з осередків, призначення якої змінюється в залежності від призначення даної деталі). Для виготовлення пористого заповнювача є можливість використовувати безліч матеріалів, деякими з яких можуть бути текстоліт, склотекстоліт, металева алюмінієва або трохи рідше сталева фольга.

Даний вид обшивки є дуже міцним виробом завдяки багатошаровості деталі та спільної, злагодженої роботи зовнішніх шарів та заповнювача. Можна відзначити переваги даної обшивки, виражені в тому, що погонний момент інерції у неї значно вищий, ніж у обшивки, що має загальну товщину, що дорівнює двом зовнішнім шарам. Через це можна відзначити, що критичні напруження стиснення та зсуву при малій масі конструкції досить високі.

До основних переваг адитивних технологій при виготовленні ЗТО можна віднести:

– можливість плавної зміни висоти та розміру осередків (без зміни інструменту, необхідного при фрезеруванні);

– можливість друку форм під комунікації;

– можливість друку ЗТО з подвійною кривизною для пористих листів, виготовляємих у кілька шарів (коли конструктивний набір укладатиметься з великої кількості пористих листів, що відрізняються один від одного і пов’язані між собою за суміжним принципом).

**Особливості виготовлення**

Однак при виробництві ЗТО на основі адитивних технологій для виготовлення комірчастого листа виникає низка проблем.

ЗТО, які виготовлено на основі 3D-друку з пластику, повинні тримати температуру 120–180 °С за існуючим ТП, коли комірчастий лист формується в пресі, а потім висушується.

Форма для формування комірчастого листа повинна відповідати температурному режиму затвердіння смоли, що входить до складу препрегу.

У роботі [30] застосовується препрег Т-10-14(92) на сполучному 5-211 Б, температура склування становить 140–150 °С. Отже, матеріал форми повинен мати температуру розм’якшення по ВИКА відповідно до допуску за температурним режимом печі, в якій відбувається склування.

Застосовувалась піч, допуск за температурою якої становить ±10 °С. Придатними до цієї технології матеріалами є наступні:

– ударостійкий, склонаповнений (30 %) пластик на основі термопластичного поліуретану [33] для друку шестерень, міцних корпусів, механічно навантажених деталей, аеродинамічних обважень тощо (рисунок 2.6). Має високу хімічну стійкість до розчинів кислот і лугів, жирів, олій, ксилолу, дизельного палива. Обмежено до бензину, гасу, ацетону, дихлометану. Завдяки низькій усадці (до 0,8 %), хорошій міжшаровій адгезії та високій абразивній стійкості, пластик TOTAL GF-30 стане чудовою альтернативою композитам на основі поліамідів. Відмінно піддається свердлінню, нарізанню різьби;

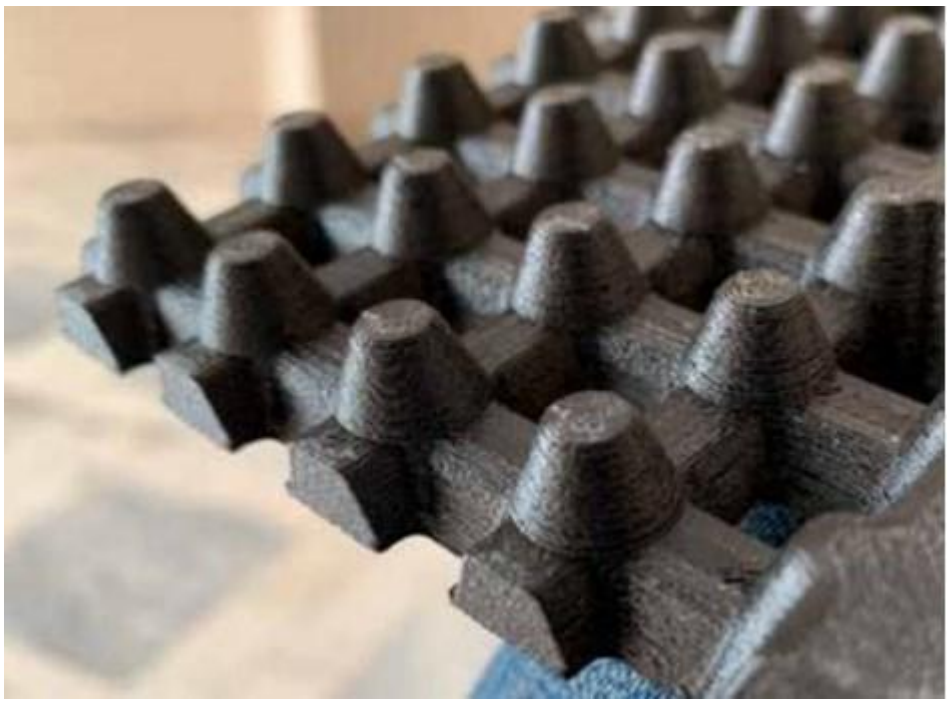


Рисунок 2.6 – Засоби технічного оснащення (форма) із TOTAL GF-30

– склонаповнений (30 %) пластик на основі полібутилентерефталату представляє собою термопластичний конструкційний полімер, що використовується як діелектрик в електротехнічній та електронній промисловості. Він являє собою термопластичний напівкристалічний полімер поліестеру. Стійкий до дії розчинників і має високу механічну міцність. При додаванні скловолокна він витримує температури до 150 °С, короткочасно матеріал витримує нагрівання до 200 °С, при наявності відповідних добавок стає негорючим. Полімер основи стійок до палив, олій та більшості розчинників. Не стійкий до лугів та кислот, а також їх розчинів;

– склонаповнений (30 %) пластик на основі поліаміду 66. Має відмінні міцнісні та жорсткі характеристики при значно більших температурах. Для збільшення механічних властивостей PA66 почали додавати безліч інших матеріалів, одним з яких і найпоширенішим є скло, хоча іноді можна зустріти і домішок синтетичних каучуків, таких як EPDM та SBR, які збільшують ударостійкість готового виробу. PA66 має високі характеристики усадки, які становлять від 1 % до 2 %, але завдяки доданню модифікаторів зі скловолокна можна знизити цю властивість до 0,2…1 %. У комплексі PA66 славиться такими своїми якостями, як високі стійкість до ударів і зносостійкість, а також не менш важливими властивостями, такими як електричні властивості, втомна міцність і гнучкість. При додаванні скловолокна він витримує температури до 200 °С, короткочасно матеріал витримує нагрівання до 250 °С.

Геометрія форми після друку має бути без деформування, відповідно до конструкторської документації (далі – КД) на комірчастий лист.

Деформування форми залежить від усадки матеріалу [34], з якого складається форма, у процесі та після виготовлення. Усадку мають всі типи термопластів (матеріали, перераховані вище), її величина залежить від самого термопласту та відсоткового вмісту рубаної скло-вуглетканини у складі.

Поверхня СТО повинна мати відповідні властивості адгезії.

Процес склування відбувається за високої температури (120–160 °С). За таких значень препрег прагне з'єднатися з формою для викладення та стати єдиним цілим. Щоб запобігти цьому, з метою багаторазового застосування форми, використовується розділовий шар – плівка на основі поліпропілену (рисунок 2.7).

Рисунок 2.7 – Процес виготовлення пористого заповнювача

Адгезія препрегу до матеріалів розподільчого шару після склування (затвердіння) стає мінімальною. Такий самий ефект і у матеріалу форми та розділового шару.

Поверхня ЗТО повинна мати відповідні властивості за коефіцієнтом тертя в парі «пластик – препрег».

Коефіцієнт тертя мінімізується за рахунок режиму друку, який встановлюється інженером у спеціалізованому програмному забезпеченні, виходячи з технічного завдання (далі – ТЗ).

Так як матеріал, з якого складається форма, має у складі 30 % рубаного скловолокна, якість поверхні, від якої залежить коефіцієнт тертя, погіршується, але при цьому забезпечуються вимоги щодо навантаження.

При використанні непросушеного пластику в парі з некоректним режимом друку велика ймовірність отримання поверхні, яка має велику шорсткість через низьку якість поверхні та не відповідає вимогам виготовлення пористого заповнювача (рисунок 2.8).

Рисунок 2.8 – ЗТО з високим показником шорсткості, не придатне для виготовлення пористого заповнювача

ЗТО, зроблені із пластику, мають витримувати ту кількість застосувань, яку задано програмою виробництва.

При дотриманні вимог щодо адгезії, міцнісного та температурного режимів забезпечується багаторазове застосування форми для викладення пористого заповнювача.

При виготовленні пористого заповнювача необхідно виділити такі етапи:

1) проектування в CAD-системі;

2) розрахунок міцності в CAE-системі;

3) створення керуючої програми у «слайсері» для виготовлення на 3D-принтері;

4) виготовлення форм для викладення пористого заповнювача на 3D-принтері;

5) постоброблення форм;

6) процес виготовлення пористого заповнювача;

7) підготовка форм до подальшого застосування.

На рисунку 2.9 наведена багатошарова конструкція з пористим заповнювачем, який був виготовлений із застосуванням адитивних технологій.

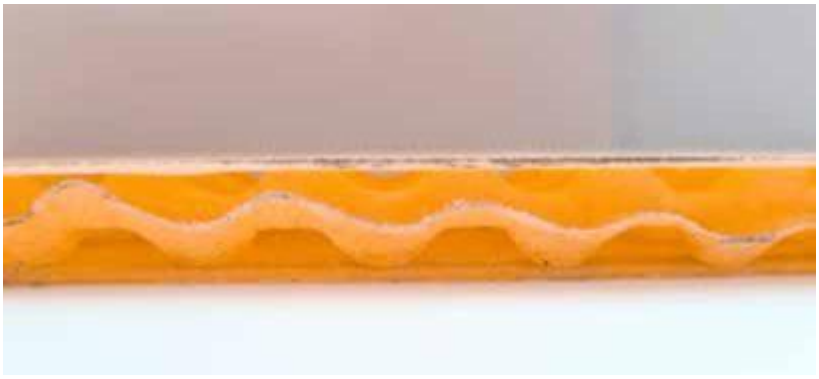


Рисунок 2.9 – Багатошарова конструкція з пористим заповнювачем, який виготовлений із застосуванням адитивних технологій

На рисунку 2.10 надано засоби технологічного оснащення із термопластів ABS та ABS вугленаповненого (ABS + CF15) для подальших випробувань.

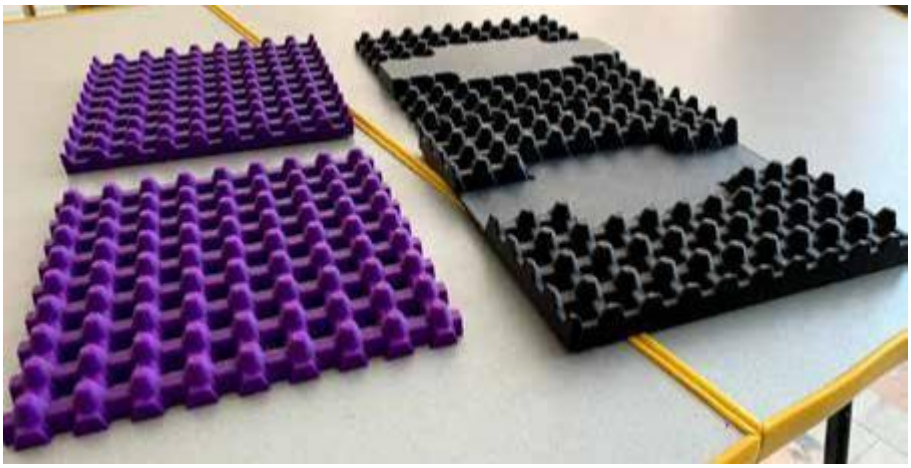


Рисунок 2.10 – ЗТО з ABS (ліворуч) та ABS вугленаповненого (праворуч)

**Висновки по розділу 2**

1. Застосування адитивних технологій при виготовленні формоутворювальної оснастки виправдане і призведе до зниження витрат на її виготовлення. Найбільш перспективною технологією є FDM, при використанні якої витрати на виготовлення оснастки знижуються в 6–7 разів для деталей малої кривизни типу обшивки крила. Час, необхідний виготовлення оснастки, зменшиться в 3–4 разу.

2. Для подальшого розроблення технології виготовлення оснастки адитивними методами необхідно провести математичне моделювання процесу за однією з існуючих методик та надрукувати повнорозмірний дослідний зразок оснастки. Актуальним завданням також є створення FDM-принтера, який міг би автоматично створювати деталі з гладкою поверхнею.

3. Розглянуто процес виготовлення універсального переналагоджуваного модульного обладнання (ЗТО) для виробництва пористого заповнювача, що

використовується при виробництві композиційних панелей різного призначення методом адитивних технологій.

# РОЗДІЛ 3 ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДАМИ АДИТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

## 3.1 Завдання технології 3D-друку

Технологія тривимірного друку (3D), що отримала поширення в другій половині 80-х років минулого століття, зобов'язана досягненням в галузі проектування та моделювання за допомогою цифрових технологій, а також широкої комп'ютеризації. З'являється можливість оперативно вносити зміни до конструкції. Для цього не доводиться заново виготовляти оснастку, ливарні форми або штампи, достатньо змін у цифровій моделі. АВ дозволяє не тільки прискорювати процес виробництва, а й економити метал. За допомогою адитивних технологій можна виготовляти деталі з композицій, наприклад створювати градієнтні конструкції з різних по хімічному складі або структурі металевих порошків для деталей, частини яких працюють у різних умовах.

Розглянемо завдання, в яких адитивні технології знайшли своє застосування.

1. Прототипування. Одним з основних напрямків використання адитивних технологій в АП є створення прототипів. Технології 3D-друку дозволяють інженерам відносно швидко та точно створювати різні деталі та випробовувати їх перед тим, як перейти до серійного виробництва. Такий підхід дозволяє уникнути часових та ресурсних втрат, а також надає можливість швидко внести будь-які зміни та покращення в конструкцію.

2. Альтернатива традиційним методам виробництва. Крім створення прототипів, адитивні технології активно використовуються для виробництва деталей різної складності, які проблематично чи неможливо виготовити за допомогою традиційних методів. Наприклад, 3D-друк металевих компонентів дозволяє створювати легкі та міцні конструкції, що дозволяє знизити масу ЛА і, відповідно, підвищити його ефективність та зменшити споживання палива.

3. Об'єднання кількох функцій в одному виробі. Черговим використанням адитивних технологій в авіабудуванні є створення інтегральних компонентів, що поєднують кілька функцій в одній деталі. В результаті вдається зменшити кількість окремих елементів та кріпильних деталей, що спрощує складання та знижує масу, а також збільшує міцність та надійність конструкції.

4. Широкий простір для випробувань та оптимізації. Крім того, адитивні технології дозволяють випробовувати різні матеріали та структури для оптимізації конструкції та покращення продуктивності. Наприклад, можна створювати та випробовувати різні варіанти лопатей турбіни, щоб визначити оптимальний дизайн для досягнення максимальної ефективності та зниження шуму. Виконання цієї задачі стає можливим за рахунок відносної швидкості та дешевизни виготовлення деталі.

### 3.2 3D-друк металом в авіаційній промисловості

Для 3D-друку металом в авіаційній промисловості в основному застосовуються два процеси:

1. Пошарове сплавлення (спікання) порошку. Цей процес полягає в тому, що шар металевого порошку вибірково сплавляють лазерним променем в єдину деталь. У цьому процесі у свою чергу виділяються дві технології. Це пряме спікання металу лазером (Direct Metal Laser Sinter – DMLS) та вибіркове лазерне плавлення (Selective Laser Melting – SLM). Відмінності між SLM і DMLS зводяться до основ процесу зв'язування частинок: SLM використовує металеві порошки з однаковою температурою плавлення і повністю плавить частинки, тоді як DMLS порошок складається з матеріалів зі змінними точками плавлення [40].

2. Склеювання частинок металу з наступним випалом (Binder Jetting). Виконується склеювання частинок металу (друкована головка пошарово наносить з'єднувальний розчин на порошкову підкладку), далі здійснюється випал у високотемпературній печі, де частинки сплавляються під тиском. Через війну виходить єдине металеве ціле, потім виріб вирушає у випал [41].

Як недоліки застосування адитивних технологій в авіаційній промисловості виділяють:

1) висока вартість для масового виробництва авіаційних компонентів. Цей недолік значною мірою обмежує повсюдне застосування цих технологій в авіабудуванні;

2) обмежений обсяг виробів. Розміри деталей, які можуть бути виготовлені із застосуванням адитивних технологій, обмежені робочою зоною принтера;

3) обмежена номенклатура матеріалів. Далеко не всі матеріали можуть бути використані для АВ. У певних випадках матеріали, які застосовуються для авіабудівних компонентів, можуть бути недоступні або мати неприйнятні властивості для використання в адитивному процесі;

4) якість поверхні. Поверхня 3D-друкованих компонентів може мати високе значення шорсткості і мати нерівності, що може вимагати додаткових операцій оброблення, як правило, механічного оброблення, для досягнення вимог міцності та аеродинаміки, що висуваються. Цей аспект збільшує складність та час виробництва;

5) нерівномірність структури. У процесі друку може виникати нерівномірна структура матеріалу, особливо це актуально у разі використання складних геометричних форм та великих обсягів. Це може негативно вплинути

на міцність і довговічність компонентів, що вкрай небажаним, а іноді і неприпустимим при виробництві критично важливих деталей авіаційного призначення.

Можливе застосування АВ у розробленні методик ремонту шляхом заповнення матеріалом пошкоджених частин конструкцій. Особливо важлива можливість зробити відразу вироб, а не складати його зі складових частин. Менша кількість деталей – це теж один із показників досконалості авіадвигуна. Невід'ємна технічна вимога до будь-якої продукції авіаційної та космічної промисловості – зниження ваги виробу. У вирішенні задачі оптимізації конструкції з метою створення внутрішньої полегшеної структури без втрати функціонального призначення виробу адитивні технології є неперевершеним за можливостями інструментом. Якщо раніше розробники творили, виходячи з жорстко обмежених можливостей традиційних технологій, і виявляли неабияку кмітливість при проектуванні понад складного оснащення для виготовлення непростих за формою і максимально полегшених деталей, то тепер про ці обмеження можна забути.

Центр NASA, Центр космічних польотів ім. Дж. Маршалла (Huntsville) та компанія Directed Manufacturing провели вогневі випробування інжектора, розробленого в рамках американської державної програми створення надважкого ракетоносія для пілотованих польотів Space Launch System. Був представлений виготовлений методом 3D-друку компонент реактивного двигуна, що, по-перше, складається всього з двох частин, у той час як подібні інжектори, виготовлені за традиційними технологіями, включали 115 деталей. По-друге, при екстремальних впливах були перевірені властивості матеріалу інжектора (порошковий сплав нікелю та хрому). Під час випробувань через інжектор в камеру згоряння пропустили рідкий кисень і газоподібний водень, таким чином збільшивши тягу двигуна в 10 разів (до 9,07 кг). У таблиці 3.1 наведено порівняння методів виготовлення інжектора реактивного двигуна.

Таблиця 3.1 – Методи виготовлення інжектора реактивного двигуна [35]

| Параметри | 3D-друк методом SLM | Традиційні способи оброблення |
|---|---|---|
| Витрачений час | 3 тижні, з яких 40 годин на виготовлення | 24 тижні |
| Кількість компонентів деталі | 1 | 4 |
| Кількість зварних з'єднань | 0 | 5 |
| Вартість деталі, USD | 5 000 | 10 000 |

Є речі, які не зробити традиційним способом. Наприклад, з точки зору газодинамічної ефективності вихідні кромки лопаток повинні бути дуже тонкими. Застосування АВ дозволяє одержати кромки товщиною близько 0,15 мм. Литтям цього досягти неможливо. А тонкі кромки – це в результаті більш високий ККД. Це і є нова якість, яка раз розв'язує руки конструкторам [36]. Для максимального виграшу від АВ при проектуванні деталей можна виходити за рамки досвіду конструктора і існуючих підходів до проектування. Наприклад, для деталей авіаційних двигунів одним із завдань є мінімізація маси конструкції при задоволенні міцнісних обмежень в умовах експлуатації, але міцнісні властивості «надрукованої» лопатки відрізнятимуться від властивостей деталі, отриманої традиційними способами. Тому перш ніж «надрукувати» деталь і поставити її на двигун, треба провести дуже багато додаткових досліджень.

Авіадвигунобудівельні фірми в усьому світі зараз займаються вивченням властивостей таких виробів спочатку на зразках, потім у реальних деталях, міцні характеристики яких залежать не тільки від хімічного складу матеріалу, а й від виду напівфабрикату, а також від режимів термообробки. У разі використання АВ параметрів, що впливають на міцність, набагато більше. У порошкового матеріалу це не тільки хімічний склад, а й розміри гранул, розкид розмірів, їх геометрія, включення, спосіб виготовлення тощо. Це демонструє багатоваріантність адитивної технології. У лазерних процесах це і потужність променю, і напрям треків його руху, і величина плями, і час впливу. Структура деталі виходить неоднорідною, а за механічними характеристиками анізотропної: у напрямку вирощування і в поперечному напрямі характеристики, як правило, різні. Таким чином, одночасно з деталлю розробляється, по суті, технологія її виробництва. Тому в разі використання АВ ми говоримо вже не про проектування конструкції, а про пошук конструктивно-технологічного рішення, оскільки фізико-механічні властивості, міцність та інші характеристики деталі встановлюються в процесі її виготовлення.

Компанія Rolls-Royce вже проводить льотні випробування двигуна Trent XWB з виготовленим за допомогою адитивних технологій великогабаритним титановим корпусом передньої опори. Вибудовано цілий завод, на якому вже налагоджено промисловий процес вирощування лопаток з інтерметаліду титану для турбін низького тиску. Фактично вже є якщо не серійне виробництво, то повний виробничий цикл для нього, починаючи від отримання порошку і закінчуючи лабораторними дослідженнями продукції. Причому розмір вирощуваних лопаток з бандажними полицями – до 325 мм заввишки.

Виходить колосальний виграш і в масі, і в швидкості виготування, і у витраті матеріалу. Вага такої форсунки на 25 % менша, при цьому довговічність у 5 разів більша. Ці лопатки призначені для використання на сертифікованих двигунах сімейства LEAP фірми CFMI. Проведено кваліфікацію матеріалу, виробництва, деталей: випробовувалися зразки, які були вирощені вертикально, горизонтально, під кутом 45°. Це робилося, щоб домогтися такого технологічного процесу, коли різниця у властивостях у різних напрямках не перевищувала б допустимої величини, що зайняло близько 7 років.

Компанія Boeing в останні роки значно збільшила номенклатуру деталей, що виготовляються за адитивними технологіями. Зараз таким чином виготовляється понад 22 тис. деталей 300 найменувань для 10 типів військових і комерційних літаків, включаючи Dreamliner.

Лазерна плавка металів набуває все більш важливу роль в авіабудівній галузі за рахунок більш коротких виробничих циклів, підвищеної економічності та практично необмеженої свободи дизайну, а також таких переваг, як можливість виготовлення більш легких деталей на основі біонічного дизайну. Гарним прикладом є 3D-друковані кронштейни для Airbus A350 XWB (рисунок 3.1).

Рисунок 3.1 – Кронштейн, виготовлений методом 3D-друку

Раніше ці компоненти виготовлялися фрезеруванням алюмінієвих заготовок, тепер же стало можливим виготовлення 3D-друкованих титанових деталей. Само собою, це призвело до значної економії ваги. Так, в випадку з титановим кронштейном було досягнуто економія ваги в 30 %. Менша вага

літака при збереженні його аеродинамічних характеристик означає більш високу загальну вантажопідйомність і, як наслідок, підвищену рентабельність [37]. Є також інші фактори, пов'язані не так з експлуатацією, як із самим виробництвом. Витрати на обладнання, необхідне для АВ титанових компонентів, менші, ніж на виробництво за допомогою субтрактивних методів. З іншого боку, скорочується і сам виробничий цикл. Компанія Concept Laser вказує на скорочення витраченого часу на 75 % і вище. Виробництво авіаційних деталей механічною обробкою дає близько 95 % відходів за вагою, в той час як лазерна плавка з використанням технології Laser CUSING скорочує частку відходів до 5 %. Що не менш важливо, будь-які помилки в дизайні можуть бути помічені і виправлені на ранніх стадіях виробництва, а його коригування не вимагає дорогого переналаштування виробничих ліній – достатньо лише змінити цифрову модель [37].

Вибіркова лазерна плавка або спікання дозволяють створювати пористі вироби. У даному випадку дизайнери запозичили ідею будови кісток птахів. Як результат, деталі виходять значно легшими, але при цьому зберігають необхідну міцність. Аналогічним чином можна створювати складні системи внутрішніх каналів для охолодження деталей під час експлуатації. Все це можливо завдяки здатності 3D-друку створювати складні внутрішні структури, чого було б неможливо домогтися за допомогою фрезерування і навіть лиття.

З іншого погляду, застосування 3D-друку в авіабудуванні ставить низку завдань із забезпечення надійності ЛА, оскільки компроміси в конструкції літаків неприпустимі, беручи до уваги, що терміни їх експлуатації становлять 30–50 років. Найпоширеніша технологія при виробництві літаків – це зварювання, яке досить добре вивчено і довело свою здатність створювати конструкції з необхідною міцністю. Інша справа адитивні технології, де поки ще багато невідомого і варто вивчити всі тонкощі створення виробів зі складною внутрішньою архітектурою. У зв'язку з цим належить зробити великий обсяг дослідницької роботи, провести масу випробувань на надійність.

Існуючі межі міцності обмежують витривалість деталей з точки зору механічної втоми, проте мікрохвильове оброблення дозволяє підвищити міцність і стійкість до рівня листового матеріалу. Класичні технології (наприклад, лиття) для виготовлення деталей у стандартному виконанні економічно вигідніші в порівнянні з АВ, особливо при масовому виробництві. З іншого боку, авіабудівники можуть дозволити собі створювати більш дорогі складові частини за умови, що це позитивно позначиться на експлуатаційних характеристиках ЛА, включаючи економічність. А для прототипування і

тестування 3D-друк не знає собі рівних. Крім того, він відкриває можливість виробництва необхідних запасних частин у будь-якій точці світу на вимогу, що робить непотрібним їх випуск і зберігання у великих кількостях [38].

### 3.3 3D-друк пластмасових деталей в авіації

Широке застосування пластмасових деталей в авіації сприяє активному впровадженню технології FDM (Fused deposition modeling) у виробництво деталей салону літаків. Оригінальний термін «Fused Deposition Modeling» та абревіатура FDM є торговими марками компанії Stratasys. Ентузіасти 3D-друку, учасники проекту RepRap, вигадали аналогічний термін «Fused Filament Fabrication» («Виробництво засобом наплавлення ниток»), або FFF, для використання в обхід юридичних обмежень. Терміни FDM і FFF рівнозначні за змістом та призначенням. При переобладнанні повітряних суден істотним фактором є час. Для інтеграції знову розроблених елементів при вдосконаленні сало часто виникає потреба в адаптації або перепроектуванні деяких панелей або розділових секцій, які зазвичай потрібні в невеликих обсягах і в стислі терміни. Компанія Airbus спільно з компанією Materialise успішно використовувала FDM-технологію для швидкого виготовлення розділових панелей для свого літака Airbus A350 XWB завдяки наявності сертифікованого адміністративного виробництва в компанії Materialise.

При використанні технологій тривимірного друку стало можливим, не вдаючись до виготовлення оснастки, одержувати деталі найскладнішої форми і з найменшою вагою (рисунки 3.2, 3.3).

Рисунок 3.2 – Деталі підлокітника крісла пасажирського салону літака EMBRAER

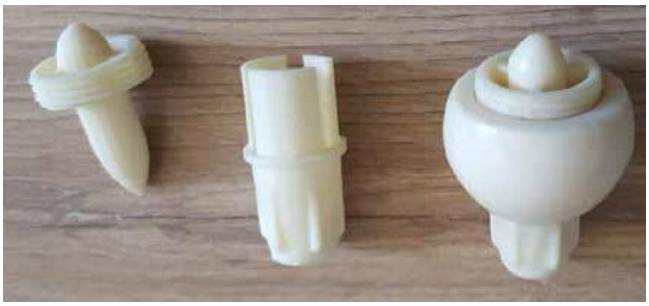


Рисунок 3.3 – Повітряний кран індивідуального обдування (салон літака Як-42)

3D-друк забезпечує наступні переваги для модернізації повітряних суден:

– прискорення виробничого процесу;
– можливість кастомізації;
– економічність дрібносерійного виробництва.

При цьому дотримуються вимоги до якості та льотної придатності.

## Висновки по розділу 3

1. Сформульовано завдання, в яких адитивні технології знайшли своє застосування: прототипування, альтернатива традиційним методам виробництва, об’єднання кількох функцій в одному виробі, широкий простір для випробувань та оптимізації.

2. Надано особливості процесу, переваги та недоліки 3D-друку металевих і пластмасових деталей. Наведено приклади з авіаційно-космічної галузі.

3. Потребує вирішення глобальне завдання стандартизації та сертифікації адитивного виробництва на підприємствах галузі та в Україні загалом.

# РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ВИТРАТ ПРИ АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ В АВІАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Розглянемо побудову моделі оцінки витрат за адитивною технологією Directed energy deposition (англ. *Спрямоване підведення енергії*) (далі – DED) порівняно із витратами на виготовлення кріпильних виробів, які мають широке застосування в авіаційній та ракетно-космічній промисловості, за допомогою традиційної технології кування (далі – ТК). Порівняння витрат дозволить виявити критичну програму випуску виробів із застосуванням адитивних та традиційних технологій.

### 4.1 Потенційні можливості економії та переваги адитивного виробництва

У роботі [39] зазначається, що виробничі витрати в АВ можна класифікувати за двома категоріями:

1) добре структуровані витрати;

2) погано структуровані витрати.

До першої категорії належать, наприклад, витрати на робочу силу, матеріали та обладнання. Друга категорія включає витрати, пов’язані, наприклад, зі збоєм процесу виробництва, налаштуванням машини та створенням запасів. У літературі, як правило, основна увага приділяється добре структурованим витратам в АВ. Однак деякі значні переваги в економії коштів при АВ можуть бути приховані й у погано структурованих витратах.

Розгляд АВ в контексті ощадливого виробництва також може виявитися корисним, тому що до ключових завдань ощадливого виробництва відноситься виявлення втрат, які можна поділити на такі категорії:

– перевиробництво: виникає, коли виробляється більше, ніж зараз потрібно клієнтам;

– транспортування: транспортування не змінює структуру продукту, але є джерелом ризику щодо його втрати чи непостачання вчасно;

– доробки/дефекти: виявлені дефекти призводять до марної витрати ресурсів або додаткових витрат на їх виправлення;

– надмірні витрати на обробку: виникають у тому випадку, коли робиться більше роботи, ніж потрібно;

– рух: зайві рухи наводять до непотрібної витрати часу та ресурсів;

– очікування: це ситуація, коли робітники чекають на матеріали та деталі, що призводить до зниження продуктивності через простої обладнання.

Завдяки АВ можна значно знизити потребу у великих запасах, що суттєво впливає на собівартість виробу та потребу у фінансуванні. Багато витрат приховані в ланцюжку поставок, який є системою переміщення продукту від постачальника до споживача. АВ потенційно може мати істотний вплив на

покращення цієї системи та зниження відповідних витрат.

АВ дозволяє виробляти деталі на вимогу. Наприклад, як запасні частини нечасто замовляють конкретний вид деталі, проте, коли він замовлений, його потрібно швидко поставити, оскільки машини, що простоюють, і обладнання, що чекає на запчастини, потребують зростання фіксованих витрат. Традиційні технології виробництва роблять виробництво деталей на запит дорогим і вимагають значних тимчасових витрат. Зазвичай при традиційному виробництві замовляють значний обсяг запасних деталей, оскільки виробництво малими партіями економічно не доцільно. Внаслідок цього відбувається заморожування фінансів («омертвіння капіталу»), а великі обсяги запасних частин при цьому займають чималі площі. Якщо складські приміщення в оренді, то виникають додаткові витрати у вигляді орендної плати та страховки. При цьому є ймовірність того, що в процесі зберігання запасні деталі можуть псуватися або розкрадатись. Можливість виробляти ці деталі на запит з використанням АВ знижує потребу у підтримці великих запасів та усуває пов’язані з цим витрати.

АВ дозволяє одночасно виробляти деталі як цілісний продукт. Традиційне виробництво часто передбачає виробництво окремих деталей у кількох місцях. Потім деталі вирушають на складальне підприємство. Така схема виробництва призводить до необхідності формування передавальних партій з подальшим транспортуванням до місця складання. Процес подовжується та виникає потреба в оптимізації запасів, а також управлінні кредиторською та дебіторською заборгованістю. Іншими словами, необхідна оптимізація так званого «робочого капіталу», що складається із запасів та дебіторської заборгованості за мінусом кредиторської заборгованості [36]. АВ знижує потребу у доставці деталей точно вчасно. Ці деталі можуть виготовлятися безпосередньо на підприємстві за допомогою 3D-принтерів.

Існує кілька альтернативних варіантів організації АВ [43].

Перший варіант: споживачі придбають системи АВ або 3D-принтери та самі виробляють необхідні деталі за потребою.

Другий варіант: це організація копіювально-виробничої майстерні, яка виконує замовлення клієнтів.

Третій варіант: впровадження АВ на підприємстві, що передбачає зміну технології проектування та виробництва. Таким чином, АВ дозволяє виробляти деякі деталі або готові продукти поруч із місцем їх використання і навіть безпосередньо на місці. Локалізоване виробництво у поєднанні зі спрощеними процесами дозволить стирати межу між виробниками, оптовиками та

роздрібними торговцями, оскільки кожен з них потенційно може виробляти продукцію на своїх об’єктах.

Однією з потенційних переваг АВ може бути виробництво зібраного продукту, а не його окремих компонентів. У роботі [44] наголошується, що в даний час виробництво запасних частин в авіаційній промисловості здійснюється централізовано (на вимогу), проте якщо АВ буде широко поширюватися, то розподілений локалізований підхід стане реальністю вже найближчим часом.

### 4.2 Структурна схема моделі оцінки витрат

На рисунку 4.1 надано структурна схема моделі оцінки витрат в АВ (DED) порівняно з традиційним виробництвом за ТК.

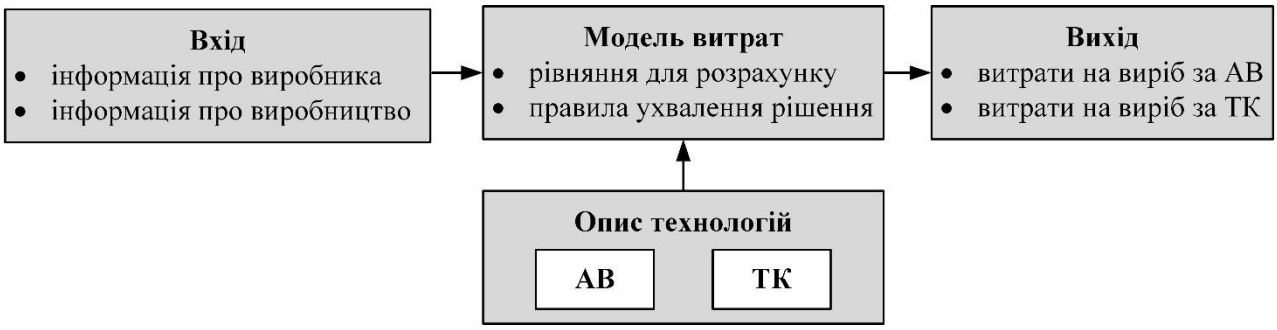



Рисунок 4.1 – Структурна схема моделі оцінки витрат

Як приклад розглянемо та порівняємо вироби одного функціонального призначення куванням (рисунок 4.2), з оптимізованим за масою виробом, отриманим за допомогою адитивної технології (рисунок 4.3). Вироби цього типу мають широке застосування в авіаційній та ракетно-космічній промисловості [45, 46].

Рисунок 4.2 – Кріпильний виріб, отриманий за допомогою традиційної технології кування

Рисунок 4.3 – Оптимізований за масою кріпильний виріб, отриманий за допомогою адитивної технології

На рисунку 4.4 схематично у вигляді послідовності операцій

представлена технологія кування.

Рисунок 4.4 – Технологія кування

Технологія кування добре відома і широко представлена в публікаціях вітчизняних та зарубіжних авторів, тому немає потреби її докладному розгляді. Слід лише зазначити, що, як і більшість технологій обробки тиском, кування має наступні переваги:

– низькою собівартістю одиниці виробленої продукції;
– малими витратами часу на обробку (секунди);
– економічною доцільністю в умовах віях великосерійного та масового виробництва;
– порівняно невисокі витрати енергії;
– високий коефіцієнт використання матеріалу;
– відходи можна пустити на переплавлення.

AT (DED) – пряме підведення енергії безпосередньо до місця побудови та пошарового формування виробу методом внесення будівельного матеріалу безпосередньо до місця підведення енергії.

В якості будівельних матеріалів у технології DED застосовуються акрилові (епоксидні) полімери та фотополімери, полімери у вигляді поліаміду полістиролу, піски кварцові та цирконієві, метали у вигляді прутка або дроту, металопорошки з алюмінію, міді, сплавів титану та алюмінію, срібла, залізо-нікелевих сплавів тощо [47].

Укрупнена схема технологічного процесу DED надано на рисунку 4.5.

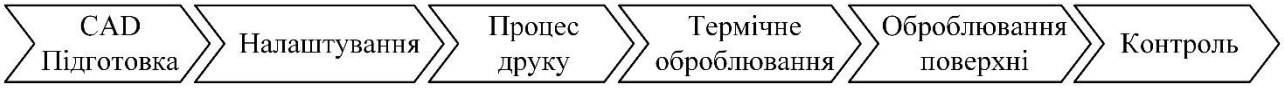



Рисунок 4.5 – Укрупнена схема технологічного процесу адитивної технології

## 4.3 Методичний підхід до оцінки елементів витрат з адитивного виробництву

Розглянемо підходи до оцінки елементів витрат за кожним етапом реалізації технології DED.

Перший етап – «CAD-підготовка» здійснюється із застосуванням систем автоматизованого проектування (Computer Aided Design – CAD), починаючи зі збору всієї інформації про деталі з метою побудови 3D-моделі. Ця модель створюється за допомогою програмного забезпечення, яке містить необхідну інформацію для 3D-принтера. Реалізація цього етапу передбачає витрати на організацію робочого місця, включаючи комп’ютер та ліцензію на програмне

забезпечення. Ці витрати можна віднести до умовно-постійних і не враховувати в розрахунках при порівнянні варіантів адитивних та традиційних технологій. Справа в тому, що підготовка в технології кування в даний час, як правило, також здійснюється за допомогою систем автоматизованого проектування. Також необхідно враховувати витрати часу проектувальника, які виражаються у вигляді заробітної плати ($З_{зп}$).

На етапі «Налаштування» оператор машини перевіряє всі компоненти 3D-принтера, щоб вони відповідали вимогам конструкції виробу. Проводиться калібрування лазера ($t_{калібр}$), готується будівельний матеріал ($t_{підгот.\ пор}$) та інертний газ ($t_{підгот.\ газу}$), а також встановлюється та фіксується платформа для здійснення друку ($t_{вст.\ платф}$).

Таким чином, сумарні витрати часу на налаштування ($T_{налашт}$) рівні

$$T_{налашт} = t_{вст.\ платф} + t_{калібр} + t_{підгот.\ пор} + t_{підгот.\ газу}. \quad (4.1)$$

Витрати на налаштування ($З_{налашт}$) можна розрахувати за формулою

$$З_{налашт} = T_{налашт} \times C_{год}, \quad (4.2)$$

де $C_{год}$ – вартість нормо-години оператора, що включає годинну тарифну ставку та всі соціальні виплати.

«Процес друку» виробу є основним у технології DED, він характеризується такими параметрами, що впливають на витрати:

– час друку;
– витрата газу;
– споживання електроенергії;
– витрати на технічне обслуговування та ремонт (ТОтаР).

Для оцінки витрат часу на друк ($t_{друк\ DED}$) необхідно знати масу виробу ($m_{вироб}$) та швидкість осадження будівельного матеріалу ($V_{буд.\ матер}$), а також розмір партії виробів ($N$):

$$t_{друк\ DED} = m_{вироб}/V_{буд.\ матер} \times N. \quad (4.3)$$

Витрата газу ($G_{газ}$), як правило, аргону, становить згідно з емпіричними даними [48] приблизно 10 л/хв. або близько 600 л/год. Помноживши ціну газу ($Ц_{газ}$) на витрату, отримаємо витрати на газ ($З_{газ}$). Таким чином

$$З_{газ} = G_{газ} \times Ц_{газ}, \quad (4.4)$$

Розрахунки щодо споживання електроенергії можна проводити, спираючись на дані досліджень [48]. Дослідження проводилися на устаткуванні американської фірми Optomec моделі LENS 750. Це обладнання призначене в

основному для науково-дослідних цілей. Його показники представлені у роботі [49]. Витрати на електроенергію ($З_{ел}$) у розрахунку на масу виробу можна визначити за формулою:

$$З_{ел} = m_{вироб} \times P_{ел} \times Ц_{ел}, \quad (4.5)$$

де $m_{вироб}$ – маса виробу (кг);

$P_{ел}$ – питома витрата електроенергії (кВт×год./кг);

$Ц_{ел}$ – ціна 1 кВт×год. (грн).

Витрати на термічну та фінішну обробку поверхні, а також контроль ($З_{фініш}$) для технології DED становлять, згідно з даними [50], близько 20 % від сумарних витрат. Таким чином, суму попередніх витрат помножимо на 0,2.

Витрати на ТОтаР оцінюються експертами, як правило, у частках від ціни обладнання DED. Зазвичай це 1 % на рік від ціни:

$$З_{ТОтаР} = 0{,}01 \times Ц_{DED}. \quad (4.6)$$

Витрати на матеріали ($З_{матер}$) визначаються шляхом помноження $m_{вироб}$ на ціну матеріалу $Ц_{матер}$. Масу готового виробу необхідно помножити на коефіцієнт втрат матеріалу $k_{втрат}$, що виникають у процесі виробництва. Для адитивних технологій втрати будівельного матеріали, як правило, невеликі, а в деяких вони практично відсутні, тому коефіцієнт втрат може становити $k_{втрат}$=1,05…1,1. Таким чином

$$З_{матер} = m_{вироб} \times Ц_{матер} \times k_{втрат}. \quad (4.7)$$

У таблиці 4.1 зведено основні елементи витрат для адитивної технології DED, а також формули для їх розрахунку.

Таблиця 4.1 – Вартість виготовлення оснастки за різними технологіями

| Елементи витрат | Формула |
|---|---|
| Витрати на налаштування | $З_{налашт} = T_{налашт} \times C_{год}$ |
| Витрати на газ | $З_{газ} = G_{газ} \times Ц_{газ}$ |
| Витрати електроенергію | $З_{ел} = m_{вироб} \times P_{ел} \times Ц_{ел}$ |
| Витрати на матеріали | $З_{матер} = m_{вироб} \times Ц_{матер} \times k_{втрат}$ |
| Витрати на ТОтаР | $З_{ТОтаР} = 0{,}01 \times Ц_{DED}$ |
| Витрати на та фінішну обробку | $З_{фініш} = 0{,}2 \times (З_{налашт} + З_{газ} + З_{ел} + З_{матер} + З_{ТОтаР})$ |

## Структурування витрат та підхід до розрахунку критичної програми випуску

Як уже зазначалося вище, виробничі витрати в АВ поділяються на добре структуровані та погано структуровані витрати. Еквівалентом добре структурованих витрат можна вважати змінні витрати ($V_{var}$), а до еквіваленту погано структурованих витрат доцільно віднести так звані фіксовані (постійні) витрати ($F_{fix}$).

На підставі даних таблиці 4.1 можна структурувати витрати на змінні та фіксовані (постійні). Як відомо, змінні витрати більшою мірою залежать від обсягу випуску чи розміру партії виробів ($N$). Хоча, заради справедливості, слід зазначити, що змінні витрати не завжди лінійно залежать від розміру партії. Наприклад, при збільшенні обсягу випуску будівельні та допоміжні матеріали, що закуповуються, можуть бути придбані з дисконтом за обсяг. Тому змінні витрати іноді називають «умовно змінними», проте для простоти викладу називатимемо їх змінними.

До змінних витрат, згідно з таблиці 4.1, віднесемо $З_{газ}$, $З_{ел}$, $З_{матер}$ і $З_{фініш}$. Таким чином,

$$V_{var} = З_{газ} + З_{ел} + З_{матер} + З_{фініш}. \quad (4.8)$$

Фіксовані (змінні) витрати малою мірою залежать від обсягу випуску, хоча можливе певне зростання витрат при значному перевищенні обсягів випуску. Наприклад, для забезпечення виробництва виробів збільшеної партії може знадобитися додаткове оснащення або перехід на двозмінну роботу тощо. Тому фіксовані (постійні) витрати також часто називають «умовно постійними (фіксованими)». Далі використовуватимемо термін постійні (фіксовані).

До постійних витрат, згідно з таблиці 4.1, віднесемо $З_{налашт}$ і $З_{ТОтаР}$.

В результаті маємо

$$F_{fix} = З_{налашт} + З_{ТОтаР}. \quad (4.9)$$

Теоретико-методичні основи розрахунку критичної програми випуску виробів розглянуто у численних публікаціях вітчизняних та зарубіжних авторів з контролю та управлінського обліку. Зупинимося на розгляді найбільш простого методичного підходу до розрахунку критичної програми: розглядається випуск одного найменування виробу.

Під критичною програмою випуску $N_{крит}$ розуміється такий обсяг випуску, при якому прибуток дорівнює нулю, тобто доходи від продажу виробу

дорівнюють сумі змінних та постійних витрат. Вихідна формула для розрахунку критичної програми випуску має такий вигляд:

$$П = Ц_{вироб} \times N - V_{var} \times N - F_{fix}, \quad (4.10)$$

де П – прибуток;

$Ц_{вироб}$ – Ціна одиниці виробу;

$N$ – обсяг випуску виробів;

$V_{var}$ – змінні витрати;

$F_{fix}$ – gостійні (фіксовані) витрати.

Вирішуючи рівняння щодо $N$, отримаємо такий вираз для критичної програми:

$$N_{крит} = F_{fix}/(Ц_{вироб} - V_{var}). \quad (4.11)$$

Для традиційної технології кування формула для розрахунку критичної програми буде такою самою. Проте структура та динаміка витрат для порівнюваних технологій буде різною [51].

## 4.4 Порівняння вартості сталевого та пластикового оснащення для авіаційного скління

Існуючі технології виготовлення формувальної оснастки передбачають використання великогабаритних заготовок з алюмінієвих сплавів, з подальшою тривалою механообробкою для отримання необхідної форми та шорсткості робочої поверхні.

Застосування неметалічного оснащення, що отримується за допомогою сучасних адитивних технологій, дозволяє значно скоротити витрату матеріалу, істотно знизити кінцеву вагу оснастки і зменшити час її виготовлення.

Для порівняння наведемо розрахунок за ключовими параметрами виготовлення формувальної оснастки для авіаційного скління (таблиця 4.2).

Таблиця 2.4 – Вартість виготовлення формувальної оснастки для авіаційного скління за різними технологіями

| Найменування | Двері кабіни пілота | | Вікно пасажирське | |
|---|---|---|---|---|
| Матеріал | Ал-9 або Д16Т | Ultem 1010 | Ал-9 або Д16Т | Ultem 1010 |
| Маса заготівлі, кг | 500,0 | 164,6 | 119,6 | 39,4 |
| Маса деталі, кг | 380,0 | 148,2 | 78,0 | 35,4 |
| Витрати на матеріал, грн | 49 850 | 94 750 | 11 920 | 22 670 |
| Вартість нормо-год., грн | 590 | 590 | 590 | 590 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Собівартість виготовлення, грн | 638 960 | 103 130 | 424 300 | 103 130 |
| Різниця, грн | 535 830 | | 399 630 | |

З цієї таблиці видно, що перехід від традиційних способів виготовлення оснастки, на виготовлення пластиком дозволить знизити витрати більш ніж в 3 разу і знизивши масу готової деталі в 2 разу.

Тому можна зробити висновок, що для розвитку авіапромислової галузі, як і всього вітчизняного машинобудування, необхідно розвивати адитивні технології, а для цього потрібно:

1. провести масштабну програму з навчання та перекваліфікації фахівців галузі адитивних технологій, яка допоможе збільшити кадровий потенціал та кваліфікацію фахівців у цій галузі;

2. створити сприяння та залучати великі інвестиції в авіаційну промисловість для імпорту та використання нових адитивних матеріалів та обладнання;

3. забезпечити підтримку з боку держави та галузевих організацій, яка включала б професійний супровід та консультації щодо впровадження адитивних технологій;

4. вжити заходів, що забезпечують безпеку та надійність адитивних виробів, такі як проведення досліджень та атестації нових матеріалів та методів;

5. здійснювати партнерство між провідними підприємствами, розробниками та постачальниками послуг із різних галузей, наприклад, авіаційної та металургійної промисловості, для просування адитивних технологій на ринок ВР-систем;

6. створити інноваційні центри за адитивними технологіями та проводити наукові дослідження у цій галузі.

7. визначити стандарти якості та принципи інноваційного розвитку виробництва виробів з допомогою адитивних технологій.

8. вести тісне співробітництво із зарубіжними компаніями, досвід яких може бути використаний при впровадженні сучасних адитивних технологій в Україні.

Дані заходи підтримки дозволять виробництвам знизити витрати на виготовлення готових деталей, знизити їх вагу та час оброблення, зберігши при цьому всі необхідні вимоги з міцності та експлуатаційні вимоги. У сукупності, це дозволить збільшити обсяг випуску продукції і відіграє значну роль у розвитку машинобудівних виробництв.

## Висновки по розділу 4

1. На основі розробленої моделі оцінки витрат, а також структурування витрат на змінні та постійні, що дозволяють розраховувати критичну програму випуску, можна вирішувати цілу низку завдань управлінського характеру щодо вибору варіанта технології виробництва виробів. Наприклад:

– за якої ціни за виріб та заданої програми випуску доцільно застосування традиційної чи адитивної технології;

– як зміна цін на матеріали, газ та електроенергію вплинуть на доцільність застосування адитивної технології за наявності традиційної технології;

– як зміна постійних витрат, спричинених застосуванням різних варіантів організації адитивного виробництва вплине на критичну програму випуску;

– як зміна маси (габаритів) виробу впливає на вибір технології виробництва з погляду економії витрат тощо.

2. Як подальший напрямок розвитку моделі оцінки витрат на вироби в адитивному виробництві слід розглянути варіант випуску кількох типів виробів у рамках обраної технології.

# РОЗДІЛ 5 ПРОПОЗИЦІЇ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ОСНАСТКИ ТА ДЕТАЛЕЙ АКТ З ВИКОРИСТАННЯМ

Проведені роботи з аналізу сучасного стану впровадження адитивних технологій для виробництва технологічної оснастки та деталей авіаційної та ракетно-космічної техніки за вітчизняними та закордонними науково-технічними публікаціями, а також роботами колективу дослідників кафедри технології виробництва літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського дозволяє надати наступні пропозиції та рекомендації.

1. Необхідність ретельних досліджень властивостей (механічних, фізичних) виробів з різних порошкових матеріалів, залежно від таких факторів як вплив фракційного складу і форми самих частинок. Це є дуже важливим у таких відповідальних галузях виробництва, як авіабудування. Також необхідність відпрацювання технологічних режимів процесу спікання під конкретні порошкові матеріали та вироби.

2. Дослідження технології (і відпрацювання режимів) одержання виробів методами 3D-друку з використанням не сферичних порошків зарубіжного виробництва, а порошків неправильної форми, одержуваних на вітчизняних підприємствах. Це дозволить у кілька разів знизити вартість готових виробів, завдяки чому стане можливим впровадження адитивних технологій на вітчизняних підприємствах.

3. Розроблення технології гібридного виготовлення виробів з металу, наприклад: «плазмове наплавлення + пошарове деформаційне зміцнення + фрезерне оброблення». Ця технологія поєднує найкращі характеристики адитивного формування заготовки та подальшого механічного видалення, що особливо актуально при виготовленні великогабаритних деталей.

4. Дослідження можливостей адитивних технологій для використання як методу відновлення деталей з різною конфігурацією, а також для формування закритих порожнин при пошаровій побудові.

5. Подолання бар’єрів запровадження адитивних технологій: низький рівень грамотності спеціалістів; недостатня кількість фахівців з адитивних технологій; нерівність на ринку та відсутність розвиненої інфраструктури за межами великих міст; низький рівень довіри підприємств до нових технологій; довіра до іноземних постачальників за повної недовіри до вітчизняних; недостатнє вдосконалення нормативно-правового регулювання у галузі адитивних технологій; страх придбання обладнання серед перших.

6. Необхідно стандартизувати матеріали для адитивних технологій. Тут також необхідна велика дослідницька робота, оскільки сучасні методи, що застосовуються для оцінки властивостей матеріалів для традиційних технологій, не можуть бути застосовані до адитивних технологій через наявність анізотропії властивостей матеріалів і деталей.

7. Для впровадження нових адитивних технологій необхідний комплексний підхід, при якому під час виготовлення деталі створюється закінчене рішення, готове до впровадження та тиражування. Головними стовпами при цьому є стандартизація та нормування.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Groover M. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 4rd ed. John Wiley & Sons, 2010. – 1011 p.
2. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. / Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. Springer, 2015. – 510 p.
3. Ковалевская Ж. Г., Безбородов В .П. Основы материаловедения. Конструкционные материалы: учебное пособие / Ж. Г. Ковалевская, В. П. Безбородов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 110 с.
4. От воска до металла: обзор основных материалов для 3D-печати [Електронний ресурс]. – URL: http://blog.iqb.ru/3d-printing-materials/ (дата звернення: 02.05.2024).
5. 25 самых популярных материалов для 3D печати [Електронний ресурс]. URL: http://3dprintstory.org/25-samih-populyarnih-materialov-dlya-3d-pechati/ (дата звернення: 02.05.2024).
6. Anisoprint Composer: 3D-печать высокой прочности [Електронний ресурс]. URL: http://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/anisoprint-composter-3d-printing-high-strength/ (дата звернення: 02.05.2024).
7. Применение 3D-печати в авиакосмической и оборонной промышленности [Електронний ресурс]. URL: http://i3d.ru/blog/dlya_mozayki/3d_printery/aviatsionno-kosmicheskaya-otrasl/ (дата звернення: 09.05.2024).
8. 3D-печать в аэрокосмической отрасли [Електронний ресурс]. URL: http://innovax.info/additivnoe-proizvodstvo-v-aerokosmicheskoj-otrasli/ (дата звернення: 09.05.2024).
9. CTLS 2020. The Airplane [Електронний ресурс]. URL: https://flightdesign.com/ctls/ (дата звернення: 13.05.2024).
10. Wisnom M. R., Gigliotti M., Ersoy N. et. al. Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer-matrix composite structures // Composites: Part A. 2006. Vol. 37. P. 522–529.
11. Яблочников Е. И., Грибовский А. А., Пирогов А. В. Эффективность применения адитивных технологий для изготовления литьевых форм и при подготовке производства изделий из термопластичных полимерных материалов // Металлообработка. 2013. №5–6. С. 74–80.
12. Рыбкин В. А., Щербаков А. В., Шерышев М. А. Применение адитивных технологий в технологической подготовке производства для литья термопластичных полимерных материалов // Успехи в химии и химической технологии. 2017. №11. С. 99–101.

13. Лунев А. С., Бушуев Д. В., Горб Ю. Ю., Батина Н. А. Внедрение адитивных технологий в литейном производстве авиационной компании «Прогресс» // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2016. №3 (28). С. 99–105.
14. Лопатин А. Н. Модернизация производства легкого летательного аппарата: дис. … магистр. – Новосибирск, НГТУ, 2018. – 71 с.
15. Ahna D., Kweona J.-H., Kwonb S. et al. Representation of surface roughness in fused deposition modeling // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209. P. 5593–5600.
16. ANSYS Additive Print [Електронний ресурс]. URL: https://www.ansys.com/products/structures/ansys-additive-print (дата звернення: 20.05.2024).
17. ANSYS Additive Suite [Електронний ресурс]. URL: https://www.ansys.com/products/structures/ansys-additive-suite (дата звернення: 20.05.2024).
18. Wang T.-M., Xi J.-T., Jin Y. A model research for prototype warp deformation in the FDM process // Journal of Additive Manufacturing Technology. 2007. Vol. 33. P. 1087–1096.
19. Huang Q., Marshall G. S., Epstein D. J. An Analytical Foundation for Optimal Compensation of Three-Dimensional Shape Deformation in Additive Manufacturing // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2016. Vol. 138. P. 061010-1.
20. Kunc V., Compton B., Simunovic S., Duty C. et al. Numerical Simulation of Big Area Additive Manufacturing (3D Printing) of a Full Size Car // SAMPE Journal. 2015. Vol. 51 (4) P. 27–36.
21. Cazo A., Morer P., Matey L. PolyJet technology for product prototyping: Tensile strength and surface roughness properties // Proc. IMechE Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2014. Vol. 228 (12). P. 1664–1675.
22. Rupinder Singh Process capability study of PolyJet printing for plastic components // Journal of Mechanical Science and Technology. 2011. Vol. 25 (4). P. 1011–1015.
23. Rimašauskas M., Rimašauskienė R., Balevičius G. Development of the intelligent forecasting model for manufacturing cost estimation in PolyJet process // Materials of 9th International DAAAM Baltic Conference «Industrial Engineering» (Tallinn, Estonia. April 24–26, 2014). 2014. P. 175–180.
24. Vaezi M., Chianrabutra S., Mellor B., Yang S. Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review // Virtual and Physical Prototyping. 2013. Vol. 8 (1). P. 19–50.
25. Jin Y., Du J., He Y., Fu G. Modeling and process planning for curved layer fused deposition // Journal of Additive Manufacturing Technology. 2016. Vol. 33. P. 78–87.
26. Allen R. J. A., Trask R. S. An experimental demonstration of effective Curved

Layer Fused Filament Fabrication utilizing a parallel deposition robot // Additive Manufacturing. 2015. Vol. 8. P. 78–87.
27. Chakraborty D., Reddy B. A., Choudhury A. R. Extruder path generation for Curved Layer Fused Deposition Modeling // Computer-Aided Design. 2008. Vol. 40. P. 235–243.
28. Mayatskaya, I. A. Three-layer composite panel with discrete layer and bionic principles / I. A. Mayatskaya, B. M. Yazyev, V. D. Eremin. – DOI: 10.1088/1757-899X/1083/1/012027. – Text: electronic // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. – 2021. – Volume 1083. – P. 12–27.
29. Технология ускоренного формования трехслойных сотовых панелей интерьера самолета [Електронний ресурс]. URL: www.cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-uskorennogo-formovaniya-tryohsloynyh-sotovyh-paneley-interiera-samolyota.ru (дата звернення: 02.06.2024).
30. Захаров, А. Г. Исследование новых видов заполнителей из полимерных композиционных материалов для многослойных звукопоглощающих конструкций / А. Г. Захаров, А. Н. Аношкин, В. Ф. Копьев // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 51. – С. 95–103.
31. Говорков, А. С. Управление параметрами объектов производственной среды при разработке технологического процесса сборки изделия / А. С. Говорков // Труды МАИ. – 2011. – № 48. – С. 1–8.
32. Тигнибидин, А. В. Использование адитивных технологий при прототипировании. Контроль геометрических характеристик деталей из пластика для определения исходных размеров для печати / А. В. Тигнибидин, С. В. Такаюк // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Том 6. – № 2. – С. 1–9.
33. FILAMENTARNO. Новый композит TOTAL GF-30 // 3D Today [Електронний ресурс]. – URL: www.3dtoday.ru/blogs/filamentarno/new-total-gf30 (дата звернення: 02.06.2024).
34. Усадка пластика при 3D-печати // 3D Today. – URL: www.3dtoday.ru/blogs/sergeyengineer/usadka-plastika-pri-3d-pecati (дата звернення: 02.06.2024).
35. Перспективы развития адитивных технологий в Республике Беларусь: зб. докл. Междунар. науч.-практ. симп. (Минск, 24 мая 2017 г.) / Нац. акад. наук Беларуси. – Минск, 2017.
36. Адитивные технологии – индикатор развития государства / Исследовательская группа «Инфомайн» // Редкие земли. 2016. №2(7). С. 92–102.
37. Airbus впервые устанавливает 3D печатные титановые кронштейны на серийные коммерческие самолеты [Електронний ресурс]. URL: https://on-v.com.ua/novosti/biznes/airbus-vpervye-ustanavlivaet-3d-pechatnye-titanovye-

kronshtejny-na-serijnye-kommercheskie-samolety/ (дата звернення: 02.06.2024).
38. Перспективы использования адитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники [Електронний ресурс]. URL: www.mai.ru/science/trudy/ (дата звернення: 03.06.2024).
39. Young, Son K. A Cost Estimation Model for Advanced Manufacturing Systems // International Journal of Production Research. 1991. № 29 (3), P. 441–452.
40. В чем различие между slm и dmls технологиями 3d печати [Електронний ресурс]. URL: https://mbambino.ru/articles/v-chem-razlichie-mezhdu-slm-i-dmls-tehnologiyami-3dpechati.html (дата звернення: 03.06.2024).
41. Binder Jetting: обзор технологии 3D-печати [Електронний ресурс]. URL: https://top3dshop.ru/blog/binder-jetting-3d-printing-technology-review.html (дата звернення: 03.06.2024).
42. Управление рабочим капиталом: руководство по эффективной оптимизации запасов, дебиторской и кредиторской задолженности / Х. Фатер, Е. Бейл, Х. Клепциг, Х. Лосбихлер, М. Мессельхойзер, С. Фалько. – М.: Изд-во НП «Объединение контроллеров», 2016. – 94 с.
43. Douglas S., Stanley W. Cost and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. A Literature Review and Discussion. Gaithersburg: USA, National Institute of Standards and Technology, 2014. – 77 p.
44. Holmström J., Partanen J., Tuomi J., Walter M. 2010. Rapid Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain: Alternative Approache to Capacity Deployment // Journal of Manufacturing Technology Management. 2010. №21 (6) P. 687–697.
45. Lindemann U. Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser Verlag, 2016. – 1036 p.
46. Schmutzler Ch., Teufelhart S., Reinhart G., Z h M. Neue Produktiontechnologien am Beispiel der additiven Verfahren / Im Sammelband «Handbuch Produktentwicklung». Herausgeber Udo Lindemann. München: Carl Hanser Verlag, 2016. P. 953–977.
47. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Адитивные технологии в машиностроении: Пособие для инженеров. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НВМИ», 2015. – 220 с.
48. Liu Z., Li C., Fang X., Guo Y. Energy consumption in additive manufacturing of metal parts. Procedia Manufacturing, 26:834-845, 2018.
49. Старцев В. А. Оценка затрат на проектируемые изделия из композитных материалов // Контроллинг. 2021. № 3 (81). С. 68–71.
50. Remedios S. Cost model for additive manufacturing of metal in aeronautics // Materials Science, Business. January 2021. P.1–9.
51. Старцев В. А., Фалько С. Г. Сравнение структуры и динамики затрат при

производстве изделий традиционными и адитивными технологиями // Контроллинг. 2022. № 3 (85). С. 64–69.
52. Воробйов, Ю. А. Правила оформлення навчальних і науково-дослідних документів [Текст] : навч. посіб. / Ю. А. Воробйов, Ю. О. Сисоєв. – 4-те вид., випр. і доп. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2019. – 88 с.