



**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий видавничо-поліграфічний інститут
Кафедра машин і агрегатів поліграфічного виробництва**

До захисту допущено:

в. о. завідувача кафедри

_____ Андрій ІВАНКО

«___» _____ 2026 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
освітня програма «Комп'ютеризовані поліграфічні системи»

на тему «Застосування 3D-друку для виготовлення змінних деталей вузлів
поліграфічних машин»

Виконала:

студентка 4 курсу гр. СМ-21

Шкляренко Аліса Миколаївна

Керівник:

к.т.н., доц.

Кохановський Василь Олександрович

Рецензент:

к.т.н., доц.

Коротенко Олена Володимирівна

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студентка Шкляренко А. М.

Київ – 2026

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Навчально-науковий видавничо-поліграфічний інститут
Кафедра машин та агрегатів поліграфічного виробництва

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
 Спеціальність – 133 Галузеве машинобудування (G11 Машинобудування)
 Освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані поліграфічні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

в. о. завідувача кафедри

_____ Андрій ІВАНКО

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

_____ Шклярєнко Алісі Миколаївні _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту: «Застосування 3D-друку для виготовлення змінних деталей вузлів поліграфічних машин»,

керівник проєкту Кохановський Василь Олександрович, к.т.н., доц _____,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 25 » квітня 2026 р. № 1860-с

2. Термін подання студентом проєкту « 05 » червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту: результати переддипломної практики; підручники (в електронному вигляді); друковані видання; статті (в електронному вигляді); державні та міжнародні стандарти; ПЗ Autodesk Inventor та Solid Works та література з його використання.

4. Зміст дипломного проєкту (перелік питань, які потрібно розробити):

Проаналізувати сучасний стан адитивного виробництва та проблему забезпечення поліграфічних машин змінними деталями; виконати огляд технологій і конструкційних матеріалів 3D-друку. Сформулювати критерії придатності змінних деталей до адитивного виготовлення та обґрунтувати вибір об'єктів розроблення ножового апарату. Обґрунтувати вибір конструкційних матеріалів.

Побудувати тривимірні моделі деталей, розробити робочу конструкторську документацію та обґрунтувати технологічні режими друку. Виконати техніко-економічне обґрунтування заміни оригінальних деталей адитивними аналогами; розробити заходи з охорони праці для ділянки 3D-друку.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): 3D модель збірки, складальні креслення 2 аркуша формату A0 та 1 аркуш формату A1, креслення деталей 1 аркуш формату A1, 2 аркуша специфікації формату A4, схеми для розрахунку механізмів.

6. Дата видачі завдання « 20 » квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз проблеми, огляд технологій і матеріалів, формулювання критеріїв	15.05 – 21.05.2026	виконано
2	Вибір об'єктів розроблення та обґрунтування матеріалів	22.05 – 24.05.2026	виконано
3	Інженерні розрахунки, топологічна оптимізація, побудова моделей	25.05 – 03.06.2026	виконано
4	Техніко-економічне обґрунтування та охорона праці	03.06 – 04.06.2026	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу, підготовка до захисту	04.06 – 05.06.2026	виконано

Студент

Аліса ШКЛЯРЕНКО

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту

Василь КОХАНОВСЬКИЙ

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Шкляренко А. М. : Застосування 3D-друку для виготовлення змінних деталей вузлів поліграфічних машин.

Дипломна робота для здобуття наукового ступеня бакалавра за спеціальністю 133 (G11) – Галузеве машинобудування. – Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», кафедра машин та агрегатів поліграфічного виробництва, 2026,

76 стор., 17 рис., 16 табл., бібліогр.: 28 назв, додатки – 1 стор.

Дипломна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі застосування адитивних методів для створення вузлів деталей поліграфічних машин.

Проведено аналіз конструкції та умов експлуатації вузлів поліграфічних машин, визначено номенклатуру змінних швидкозношуваних деталей і характер їх зношування, що дозволило виокремити групу деталей, придатних до виготовлення методами адитивного виробництва.

Систематизовано технології 3D-друку та конструкційні матеріали за механічними характеристиками, сформульовано критерії придатності змінних деталей до виготовлення адитивними методами за геометричними, технологічними та експлуатаційними ознаками.

На прикладі різального обладнання галузевого виробництва обґрунтовано відбір придатних деталей, побудовано їх тривимірні моделі та виконано перевірочні розрахунки і функціональну придатність для заданих умов експлуатації.

Здійснено техніко-економічне обґрунтування доцільності заміни оригінальних деталей виготовленими методом 3D-друку, запропоновано підхід до відновлення номенклатури змінних деталей власними засобами підприємства.

Ключові слова: 3D-друк, адитивне виробництво, поліграфічні машини, модулі, змінні деталі, знос, ремонтпридатність, конструкційні матеріали.

ABSTRACT

Shkliarenko A. M. Application of 3D Printing for Manufacturing Replacement Parts of Printing Machine Assemblies.

Bachelor's Qualification Thesis in Specialty 133 (G11) – Industrial Mechanical Engineering. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Department of Machines and Units, Faculty of Publishing & Printing 2026.

76 pages, 17 figures, 16 tables, bibliography: 28 references, appendices – 1 page.

The qualification thesis is devoted to solving the scientific and engineering problem of applying additive manufacturing methods to the production of component parts for printing machines.

An analysis of the design features and operating conditions of printing machine assemblies was carried out. The range of replaceable wear-prone parts and the nature of their wear mechanisms were identified, which made it possible to determine a group of components suitable for manufacturing by additive technologies.

3D printing technologies and engineering materials were classified according to their mechanical properties. Criteria for assessing the suitability of replacement parts for additive manufacturing were developed based on geometric, technological, and operational characteristics.

Using cutting equipment as a case study, suitable components were selected and substantiated, three-dimensional models were developed, and verification calculations were performed to evaluate their functional suitability under specified operating conditions.

A technical and economic feasibility assessment of replacing original components with parts manufactured by 3D printing was conducted. An approach for restoring the range of replacement parts using the enterprise's own production capabilities was proposed.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, printing machines, modules, replacement parts, wear, maintainability, engineering materials.

ЗМІСТ

<u>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ</u>	8
<u>ВСТУП</u>	10
<u>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН</u>	12
<u>1.1. Становлення та сучасний стан адитивного виробництва</u>	12
<u>1.2. Проблема забезпечення машин змінними деталями</u>	15
<u>1.3. Огляд технологій та матеріалів адитивного виробництва</u>	17
<u>1.4. Адитивне виробництво як напрям забезпечення змінними деталями</u>	22
<u>1.5. Огляд існуючих підходів до виготовлення змінних деталей</u>	23
<u>1.6. Критерії придатності та вибір об'єкта розробки</u>	24
<u>Висновки до розділу 1</u>	34
<u>РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВО-ТЕОРЕТИЧНЕ ТА КОНСТРУКТОРСЬКЕ РОЗРОБЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ</u>	36
<u>2.1. Постановка задачі конструкторського розроблення та вихідні дані</u>	36
<u>2.2. Обґрунтування вибору матеріалів за багатокритеріальною методикою</u>	39
<u>2.3. Аналіз різальної голівки та розрахунки</u>	40
<u>2.4. Зведені показники різальної голівки</u>	48
<u>2.5 Розрахунок фланця-тримача рулону плівки</u>	49
<u>2.6. Технологічні режими друку та точність виготовлення</u>	50
<u>Висновки до розділу 2</u>	53
<u>РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ</u>	54
<u>3.1. Методика техніко-економічного оцінювання</u>	54
<u>3.2. Собівартість адитивного виготовлення обраних деталей</u>	56
<u>3.3. Вплив адитивного відновлення на ремонтпридатність</u>	60
<u>3.4. Забезпечення якості адитивно виготовлених деталей</u>	62

<u>3.5. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих чинників</u>	63
<u>3.6. Заходи з електро- та пожежної безпеки</u>	66
<u>Висновки до розділу 3</u>	67
<u>ВИСНОВОК</u>	69
<u>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</u>	73
<u>ДОДАТКИ</u>	77

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AB — адитивне виробництво

ЧПК — числове програмне керування

МСЕ — метод скінченних елементів

ДБН — державні будівельні норми

ДСН — державні санітарні норми

ДСТУ — національний стандарт України

ЛОС — леткі органічні сполуки

ABS — акрилонітрилбутадієнстирол (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

ASA — акрилонітрилстиренакрилат (Acrylonitrile Styrene Acrylate)

DED — спрямоване енергетичне осадження (Directed Energy Deposition)

DLP — цифрова обробка світлом (Digital Light Processing)

EBM — електронно-променеве плавлення (Electron Beam Melting)

FDM — моделювання методом наплавлення (Fused Deposition Modeling)

FFF — виготовлення плавленою ниткою (Fused Filament Fabrication)

HEPA — вискоєфективний фільтр очищення повітря (High-Efficiency Particulate Air)

LCD — рідкокристалічна засвітка (Liquid Crystal Display)

LENS — лазерне формування сітки (Laser Engineered Net Shaping)

LOM — виготовлення об'єктів ламінуванням (Laminated Object Manufacturing)

MMAM — багатоматеріальне адитивне виробництво (Multi-Material Additive Manufacturing)

MSLA — масковий стереолітографічний друк (Masked Stereolithography)

PA — поліамід (Polyamide)

PA12 — поліамід-12

PA12-CF — поліамід-12, армований вуглецевим волокном (Carbon Fiber)

PETG — поліетилентерефталат-гліколь (Polyethylene Terephthalate Glycol)

PLA — полілактид (Polylactic Acid)

SIMP — модель ізотропного матеріалу зі штрафуванням густини (Solid Isotropic

Material with Penalization)

SLA — стереолітографія (Stereolithography)

SLS — селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering)

SLM — селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting)

DMLS — пряме лазерне спікання металу (Direct Metal Laser Sintering)

STL — формат файлу стереолітографії (Standard Tessellation Language)

TPU — термопластичний поліуретан (Thermoplastic Polyurethane)

VOC — леткі органічні сполуки (Volatile Organic Compounds)

ВСТУП

Поліграфічні машини належать до складних технологічних агрегатів, безперервність і точність роботи яких залежать від технічного стану значної кількості деталей у складі їхніх робочих вузлів. Внаслідок абразивної, втомної та ударної дії й тертя об матеріал ці деталі поступово втрачають початкову геометрію та функціональні властивості. Таке зношування має закономірний, плановий характер: певна група деталей потребує періодичної заміни протягом усього строку служби машини.

Усталеним способом відновлення працездатності є заміна зношених елементів оригінальними деталями виробника, що має суттєву залежність від єдиного постачальника, тривалі строки постачання, відносно високу вартість окремих позицій та простій обладнання на час очікування. Особливої гостроти ця залежність набуває в кризові періоди, коли скорочення обсягів виробництва й порушення логістичних ланцюгів унеможливають своєчасне постачання окремих деталей, а геополітична напруженість і збройні конфлікти роблять його нерегулярним і важкопрогнозованим. Для деталей, що замінюються регулярно, ці обмеження накопичуються й помітно впливають на сукупні експлуатаційні витрати та коефіцієнт використання обладнання.

Технологічну альтернативу традиційному постачанню формує застосування адитивного виробництва за допомогою 3D-друку для виготовлення змінних деталей безпосередньо за потребою. Керованість геометрії деталі та вибір матеріалу під конкретні умови роботи знімають частину зазначених обмежень, а сучасна номенклатура полімерних і композиційних матеріалів за механічними характеристиками та зносостійкістю наближається до вимог, які висуваються до значної частини змінних деталей поліграфічних машин. Варіативність технологій адитивного виробництва, своєю чергою, дозволяє узгоджувати спосіб виготовлення з функціональним призначенням деталі.

Водночас застосування 3D-друку в цій сфері потребує обґрунтування, оскільки не кожна деталь придатна до виготовлення таким способом за

геометричними, навантажувальними та ресурсними ознаками. Потрібні критерії відбору придатних позицій, узгодження матеріалу й технології з умовами експлуатації, перевірка міцності та функціональної відповідності, а також зіставлення з традиційним постачанням за техніко-економічними показниками. Сукупність цих питань визначає прикладну інженерну задачу, що постає на перетині технічного обслуговування поліграфічних машин та адитивного виробництва, і зумовлює актуальність обраної теми.

У дипломному проєкті запропонований підхід реалізовано на прикладі ножового апарату. Його вузли містять безліч швидкозношуваних деталей різного функціонального призначення, що є зручним об'єктом для відпрацювання методики відбору деталей, побудови їх тривимірних моделей та виготовлення аддитивними методами.

Актуальність одержаних результатів полягає в тому, що удосконалення підходу до відновлення номенклатури змінних деталей вузлів поліграфічних машин, який, на відміну від орієнтованого виключно на оригінальні деталі виробника, ґрунтується на сформульованих критеріях придатності деталей до виготовлення методами 3D-друку та на узгодженні матеріалу й технології виготовлення з функціональним призначенням і умовами роботи деталі, що дозволяє розширити коло деталей, придатних до виготовлення власними засобами підприємства.

Метою дипломного проєкту є підвищення взаємозамінності вузлів поліграфічних машин зі зниженням пов'язаних із заміною експлуатаційних витрат та простоїв обладнання шляхом застосування технологій 3D-друку для їх виготовлення.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

1.1. Становлення та сучасний стан адитивного виробництва

Адитивне виробництво (далі - АВ) — сукупність технологій формоутворення виробів пошаровим приєднанням матеріалу за даними тривимірної цифрової моделі, на противагу субтрактивним методам. Сьогодні АВ є самостійним напрямом сучасного машинобудування зі сформованою нормативною базою, проте його становлення тривало майже чотири десятиліття.

Зародження галузі припадає на 1980-ті роки. Переломним став кінець 2000-х років, коли вплив час базових патентів на метод екструзії спричинив появу недорогих настільних принтерів і відкритих проєктів, що зробило адитивне виробництво масово доступним і дало поштовх його промислового застосування.

Сучасну номенклатуру адитивних процесів унормовано міжнародним стандартом ISO/ASTM 52900, що поділяє їх на сім категорій: фотополімеризацію у ванні, екструзію матеріалу, синтез на порошковому шарі, струменеве нанесення матеріалу, струменеве нанесення зв'язувального, спрямоване енергетичне осадження та з'єднання листових матеріалів. Для виготовлення функціональних деталей машин практичне значення мають перші три категорії, що різняться фізичним принципом формоутворення та комплексом властивостей одержуваних виробів (рис. 1.1) [1].

Визначальною рисою сучасного етапу розвитку галузі є зміщення сфери застосування технології від прототипування до виробництва відповідальних функціональних виробів. Як зазначають дослідники, «кілька десятиліть тому адитивні технології застосовувалися виключно для прототипування, а нині використовуються під час виробництва високоточних надсучасних приладів і систем» [2, с. 114].



Рис. 1.1 - Класифікація технологій адитивного виробництва за ISO/ASTM 52900

Унаслідок цього точність відтворення геометрії та номенклатура конструкційних матеріалів зросли настільки, що низку процесів АВ вважають придатними для дрібносерійного промислового виробництва, зокрема для виготовлення запасних і змінних деталей машинобудівного устаткування.

Зрілість галузі підтверджується й динамікою світового ринку: за даними аналітичного звіту Wohlers Report 2026, у 2025 році глобальний обсяг ринку адитивного виробництва досяг 24,2 млрд доларів США, зростаючи на 10,9 % порівняно з попереднім роком, причому найбільшу частку ринку (близько 48 %) формують саме виробничі послуги, а не продаж обладнання, що свідчить про зміщення створення вартості у бік безпосереднього виготовлення деталей [3].

Показовим є перехід до адитивного виробництва навіть у масовій електроніці. У 2025 році корпорація Apple вперше офіційно застосувала

металевий 3D-друк для серійного виготовлення мільйонів титанових корпусів годинників Apple Watch Series 11 та Ultra 3, а також корпусу роз'єму USB-C у смартфоні iPhone Air. Друк корпусу годинника здійснюється методом селективного лазерного плавлення з титанового порошку, а застосування адитивного процесу замість субтрактивного оброблення дозволило вдвічі скоротити витрату сировини на корпус [7]. Цей приклад показовий не масштабом, а принципом: адитивний процес підтверджує придатність до виготовлення повнофункціональних деталей у реальних умовах експлуатації, тобто й тих змінних деталей, що є предметом цього дослідження.



Рис. 1.2 - Модель корпусів Apple Watch для друку з титану

Розвиток технології зумовлений сукупністю техніко-економічних переваг, що вигідно вирізняють її в умовах одиничного й дрібносерійного виробництва.

По-перше, це здатність формувати вироби складної геометрії, зокрема структури з внутрішніми порожнинами та топологічно оптимізованими елементами, які неможливо виготовити субтрактивними методами. По-друге, це ресурсо- та енергоощадність процесу, оскільки матеріал додається лише в межах геометрії виробу, без утворення значної кількості відходів. По-третє, це короткий цикл підготовки виробництва, за який відсутня потреба у виготовленні прес-форм

та іншого оснащення розширює потенціал застосування технології для дрібносерійного та індивідуалізованого виробництва [5, с. 178].

Водночас на шляху масового впровадження АВ у серійне виробництво залишається низка невирішених проблем, головними з яких є анізотропія механічних властивостей друкованих виробів, обмежена точність і шорсткість поверхонь без додаткового оброблення, а також залежність якості від стабільності технологічного процесу [2, с. 118]. Саме ці властивості визначають коло деталей, для яких адитивне виготовлення є технічно й економічно доцільним, і відмежовують його від деталей, що залишаються предметом класичних технологій. Окреслені можливості й обмеження роблять адитивне виробництво потенційно ефективним інструментом вирішення проблеми забезпечення змінними деталями технологічного обладнання, передусім імпортного, розгляду якої присвячено наступний підрозділ.

1.2. Проблема забезпечення машин змінними деталями

Експлуатація поліграфічного обладнання супроводжується закономірним зношуванням та виходом із ладу окремих деталей, що потребує їх періодичної заміни. Особливо гостро проблема забезпечення змінними деталями постає для імпортного устаткування в кризові часи, парк якого переважає в багатьох галузях вітчизняного виробництва. Типовим представником такого обладнання, обраним за об'єкт цього дослідження, є поліграфічні машини. Аналіз конструкції машин цього класу дозволяє виокремити групи деталей, що становлять інтерес з погляду адитивного виготовлення та дослідження їх економічної доцільності. Спільними ознаками цих деталей є помірний рівень навантаження, відносна геометрична складність та належність до конкретної моделі обладнання, що зумовлює їхню малосерійність та практичну недоцільність організації класичного виробництва для одиначної заміни.

Вартість оригінального змінного елемента може багатократно перевищувати

його собівартість у класичному виробництві, тоді як простій обладнання в очікуванні постачання спричиняє прямі економічні втрати. Масштаб цих втрат підтверджується статистикою і за оцінками, незаплановані простої поглинають близько 11 % річної виручки найбільших промислових підприємств, а середня вартість години простою для виробничого об'єкта сягає сотень тисяч доларів [8]. Оскільки значну частку простоїв становить саме очікування недоступної деталі, а середній час відновлення працездатності обладнання має тенденцію до зростання, скорочення строку отримання змінної деталі набуває першочергового техніко-економічного значення [8; 9]. Особливо відчутним цей чинник є для підприємств із потоковою організацією будь-якого поліграфічного виробництва, де обладнання вбудоване в єдину технологічну ланку. Для об'єкту дослідження було доцільно обрано одне з таких критично важливих для великого серійного швейного виробництва.

Причини виходу деталей з ладу доцільно систематизувати за характером діючого чинника. Першу групу становить абразивне та фрикційне зношування деталей, що перебувають у постійному контакті з рухомими елементами або оброблюваним матеріалом, — напрямних роликів, тримачів абразивного інструменту, притискних елементів. Другу групу утворюють локальні механічні пошкодження, спричинені циклічним силовим впливом, — зокрема проколювання модульних елементів робочих поверхонь у зонах концентрації навантаження. Третю групу складають поломки кріпильних та допоміжних елементів (кронштейнів, кожухів, фланців), що виникають унаслідок випадкових ударних навантажень під час обслуговування й транспортування.

Спільною рисою більшості змінних деталей є невідповідність між конструктивною простотою деталі та високою вартістю й тривалістю її заміни через офіційні канали постачання. Окреслена невідповідність формує технічний та економічний розрив, заповнення якого засобами власного дрібносерійного виготовлення є об'єктивно доцільним. АВ з його коротким циклом підготовки, низькою собівартістю одиничної деталі та гнучкістю щодо геометрії є технологією, потенційно здатною закрити цей розрив для широкої номенклатури

деталей машин обладнання на схожих підприємствах, особливо в кризові часи.

Отже, об'єктивна оцінка доцільності АВ для конкретної деталі потребує попереднього аналізу наявних технологій та конструкційних матеріалів, але загальний економіко-технічний ефект переходу на технології адитивні, попередньо, дуже реальний.

1.3. Огляд технологій та матеріалів адитивного виробництва

Процедура 3D-друку зводиться до трьох базових кроків: визначення плоских зрізів майбутнього виробу, їх почергової генерації та фінального скріплення у цілісну форму. Завдяки такому принципу для створення реального об'єкта необхідні лише просторові координати його шарів, що допомагає обійти багато типових перешкод стандартного промислового виробництва. На рис. 1.3 показано як це виконується поетапно.

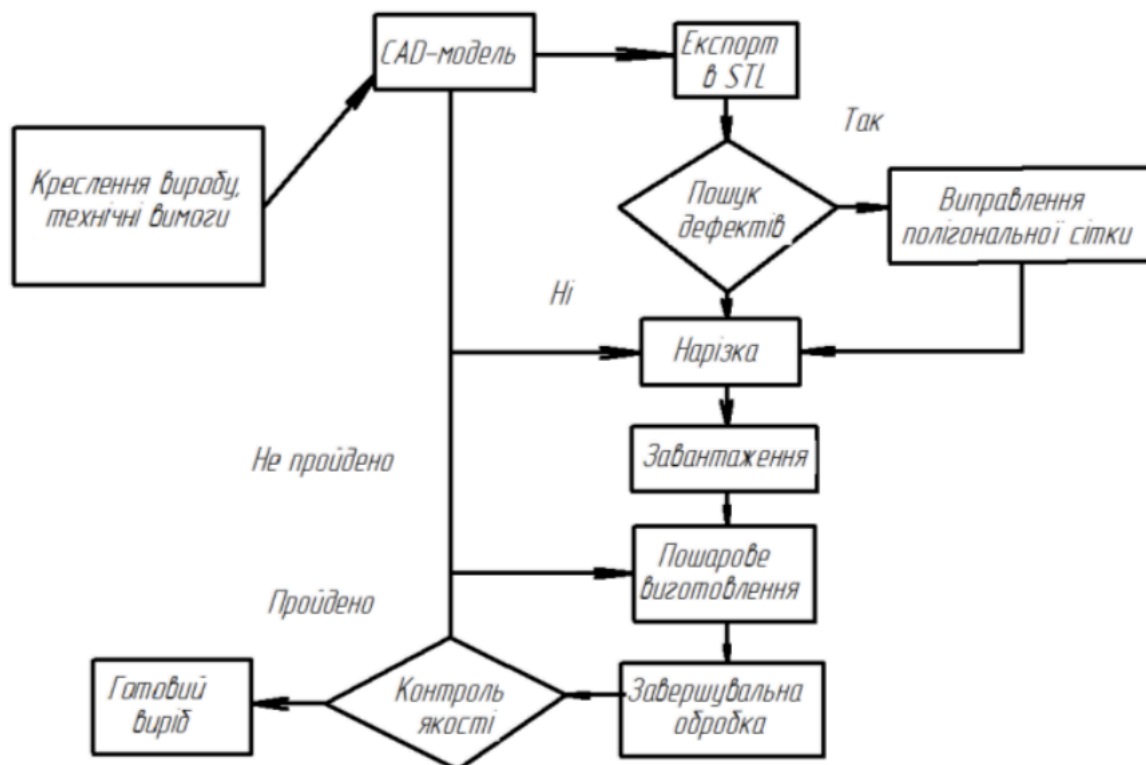


Рис. 1.3 - Алгоритм створення деталі АВ

Для виготовлення функціональних змінних деталей машин практичне застосування мають три групи з семи адитивних технологій, що різняться фізичним принципом формоутворення, точністю та комплексом механічних властивостей одержуваних виробів.

Екструзія матеріалу (FDM/FFF) — пошарове наплавлення термопластичного філаменту, що розігрівається до в'язкоплинного стану та осаджується екструдером за заданою траєкторією з подальшим твердненням під час охолодження (рис. 1.4). За наявними оцінками, екструзія матеріалу є найбільш поширеною на сьогодні технологією 3D-друку. Технологія забезпечує точність розмірів порядку 0,1-0,3 мм. Принциповим її обмеженням є анізотропія механічних властивостей, а саме знижена міцність у напрямку, перпендикулярному до площини друку, зумовлена характером міжшарової адгезії. Експериментально встановлено також, що зниження внутрішнього заповнення матеріалу пропорційно зменшує межу міцності зразка [6], що робить ступінь заповнення керованим параметром під час проєктування навантажених деталей.

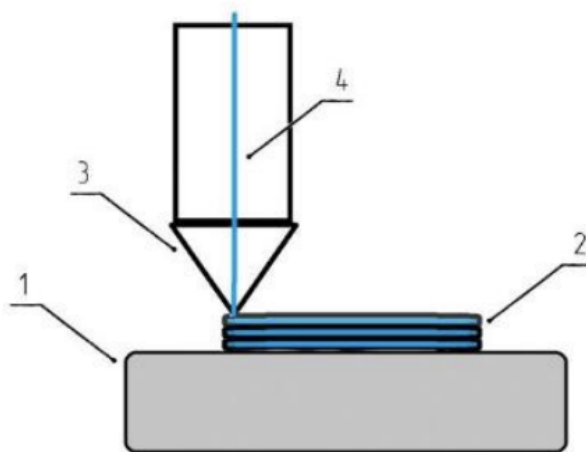


Рис. 1.4 - Ілюстрація пошарового процесу екструзії матеріалу:

1 - стіл з нагрівом; 2 - виріб; 3 - головка екструдера; 4 - матеріал друку.

Фотополімеризація у ванні (SLA, MSLA/DLP) — вибіркова зміна

агрегатного стану з рідкої фотополімерної (термореактивної) смоли в тверду джерелом ультрафіолетового випромінювання, наприклад точковим лазером у SLA або матричним засвічуванням шару у MSLA/DLP (рис. 1.5). Технологія забезпечує найвищу серед розглянутих точність (до 0,025-0,05 мм) і якість поверхні. Матеріали для SLA-друку мають найширший вибір серед усіх адитивних технологій і за функціональним призначенням поділяються на макетні, воскові, технічні та декоративні, а за експлуатаційними властивостями — на тверді, гнучкі, високотемпературні та міцні смоли [5]. Це дозволяє підбирати смолу під конкретні вимоги до точності, жорсткості чи термостійкості, проте загальним обмеженням фотополімерних виробів залишається понижена ударна в'язкість, що визначає доцільність їх застосування для прецизійних, але слабконавантажених деталей — оптичних тримачів, шаблонів, адаптерів з точними посадковими розмірами.

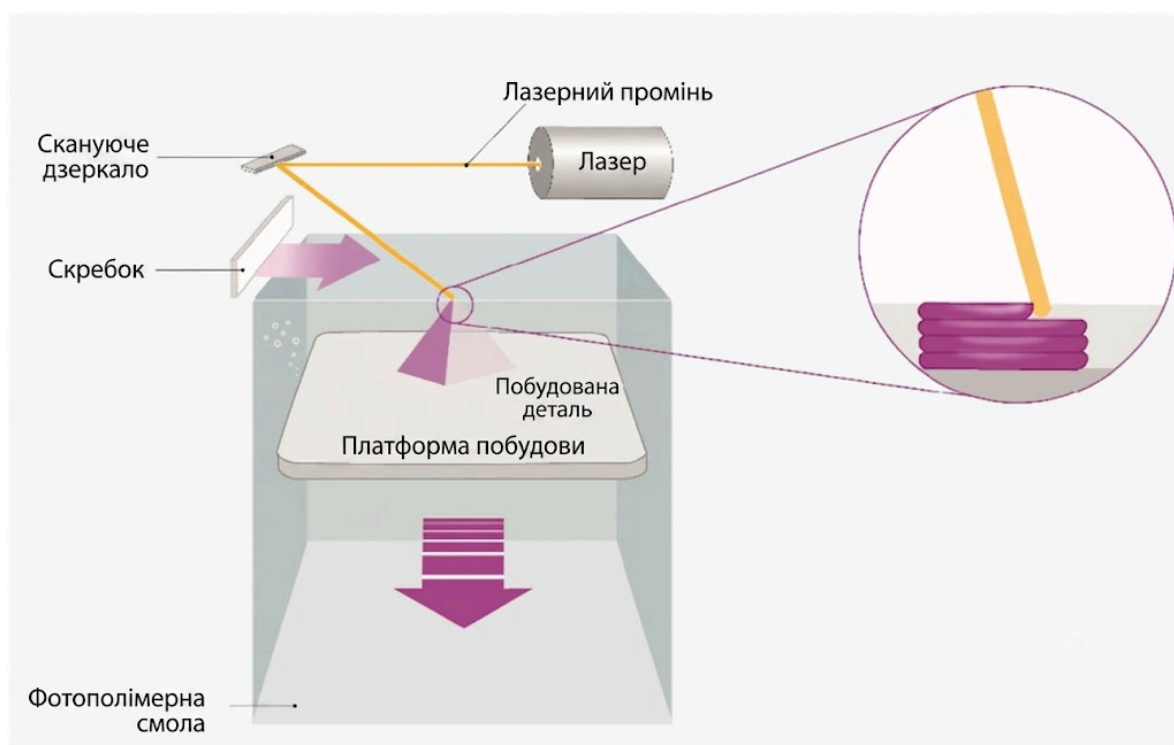


Рис. 1.5 - Принципова схема методу фотополімеризації смоли

Синтез на порошковому шарі (SLS) — спікання порошкового полімеру (переважно поліаміду PA12) лазерним променем. На відміну від FDM, технологія

забезпечує практично ізотропні механічні властивості виробів та формування складної геометрії без потреби в підтримуючих структурах, оскільки роль підтримки виконує неспечений порошок. Точність становить 0,1-0,2 мм. Поєднання ізотропності, стійкості до олій і вологи та задовільної зносостійкості робить SLS оптимальним вибором.

У межах сучасного адитивного виробництва матеріал еволюціонує з базового технологічного компонента в основний вектор інноваційного розвитку 3D-друку, що робить систематизацію матеріалів фундаментальною умовою для коректного визначення методу виготовлення відповідно до функціональних вимог до виробу.

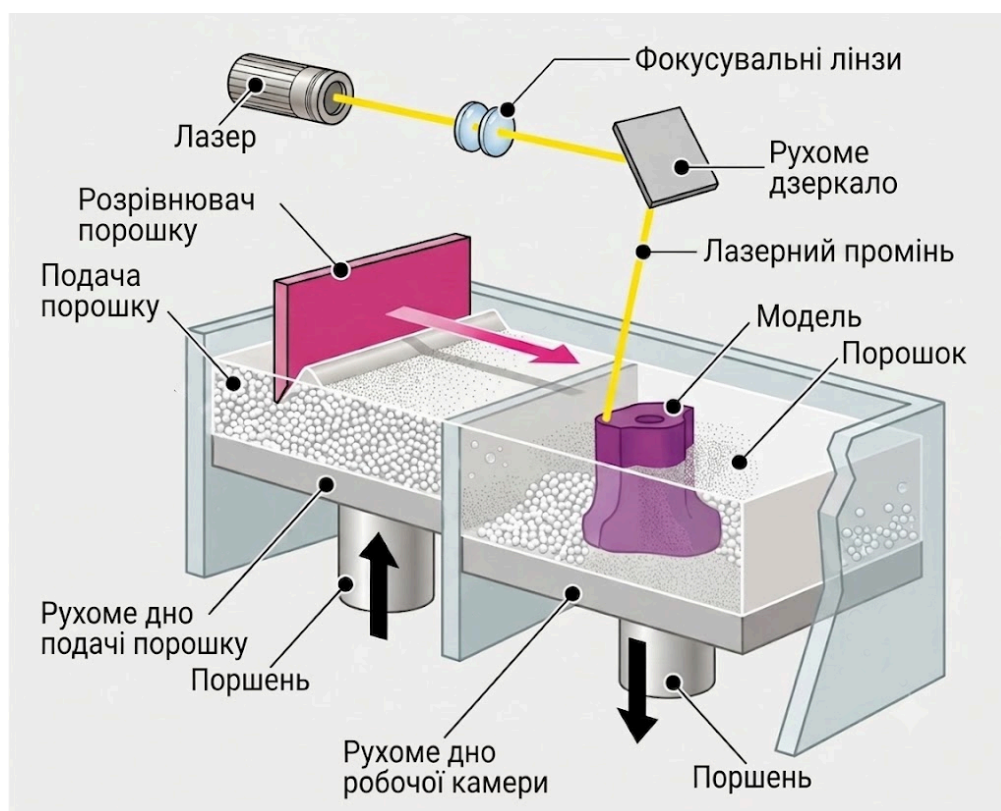


Рис. 1.6 - Схема друку методом лазерного спікання порошку

Зіставлення розглянутих технологій за визначальними характеристиками наведено в табл. 1.1.

Стосовно деталей розглянутого обладнання це означає диференційований підбір матеріалу за функцією деталі: PETG як універсальний матеріал допоміжних

деталей із доброю міжшаровою адгезією та ударною в'язкістю; ABS/ASA для деталей, що працюють за підвищених температур; поліаміди (PA12, PA6) і композити, армовані вуглецевим волокном (PA-CF, PETG-CF), для зносостійких і конструкційних деталей; TPU для гнучких ущільнювальних елементів. Згідно з експериментальними даними, виявлено суттєві відмінності у механізмах руйнування матеріалів: для CoPET (PETG) характерна пластична деформація, тоді як зразки з ABS руйнуються крихко. Водночас за результатами випробувань на тертя найвищий рівень зносостійкості продемонструвала комбінація ABS та CoPET, де показник зносу склав 30 мкм. [6].

Таблиця 1.1 — Порівняльний аналіз технологій адитивного виробництва функціональних деталей

Характеристика	FDM/FFF	SLA / MSLA	SLS
Фізичний принцип	Екструзія розплаву	Фотополімеризація смоли	Лазерне спікання порошку
Точність розмірів, мм	0,1–0,3	0,025–0,05	0,1–0,2
Механічні властивості	Анізотропні	Понижена в'язкість	Ізотропні
Необхідні супорти	Так	Так	Ні
Відносна вартість	Низька	Середня	Висока
Типове призначення	Корпусні, допоміжні деталі	Високоточні слабконавантажені деталі	Конструкційні, зносостійкі деталі

Можливості одноматеріальних технологій стають обмежувальними у разі потреби поєднати в одній деталі жорсткі та еластичні зони, градієнт механічних властивостей або локальні функціональні елементи. Для таких випадків

застосовують багатоматеріальне адитивне виробництво (Multi-Material Additive Manufacturing, MMAM). Ця технологія дозволяє створювати вироби шляхом одночасного нанесення шарів двох або більше матеріалів з відмінними властивостями. Цей підхід безпосередньо застосовний до деталей розглянутого обладнання, що поєднують функціонально різні зони, — зокрема до модульних елементів робочих поверхонь із жорсткою основою (PA12) та еластичним робочим шаром (TPU). Водночас використання різних матеріалів висуває вимоги до міжфазної взаємодії: проектування багатоматеріальних конструкцій потребує врахування узгодженості коефіцієнтів теплового розширення, достатньої адгезії на межі поділу фаз і відповідності температур плавлення або отвердіння компонентів, оскільки недотримання цих умов спричиняє локальні напруження, мікротріщини або розшарування й знижує ресурс виробу навіть за достатньої початкової міцності [5, 10].

1.4. Адитивне виробництво як напрям забезпечення змінними деталями

Розглянуті технології визначають адитивне виробництво як гнучкий інструмент дрібносерійного й одиничного виготовлення, що за сукупністю властивостей відповідає характеру проблеми забезпечення змінними деталями. Короткий цикл підготовки виробництва, відсутність потреби в дорогому оснащенні (прес-формах, штампах) та низька собівартість одиничної деталі усувають саме ті чинники, що роблять класичне виготовлення поодиноких змінних деталей економічно невиправданим. Сукупність цих переваг найповніше реалізується в моделі виготовлення запасних деталей на вимогу, за якої деталь виготовляють безпосередньо за потреби й, за можливості, у місці експлуатації, а не зберігають на складі. Замість фізичного запасу підприємство підтримує запас цифровий — бібліотеку перевірених тривимірних моделей, з якої деталь може бути надрукована в будь-який момент. Як свідчать систематичні огляди, такий підхід значно скоротить час постачання, обсяги складських запасів та простої

обладнання під час технічного обслуговування [4].

Окремого значення для імпортного обладнання набуває можливість відтворення деталей, оригінальне постачання яких ускладнене або припинене. За відсутності конструкторської документації геометрію зношеної чи пошкодженої деталі відновлюють методами зворотного інжинірингу — обмірюванням або тривимірним скануванням наявного зразка з подальшою побудовою параметричної моделі, придатної до друку та подальшого вдосконалення.

Практика машинобудування підтверджує доцільність такого підходу насамперед для корпусних і допоміжних деталей, що не мають відповідальних з'єднань, точних посадок та жорстких вимог щодо взаємного розташування поверхонь і тому придатні до експлуатації безпосередньо після друку [6]. Водночас адитивне виробництво не є універсальною заміною класичних технологій: для високонавантажених, прецизійних та інтенсивно зношуваних деталей його застосування обмежене властивостями полімерних виробів. Це зумовлює потребу у формалізованих критеріях, за якими з усієї номенклатури деталей обладнання вирізняють придатні до адитивного виготовлення.

1.5. Огляд існуючих підходів до виготовлення змінних деталей

З метою встановлення сучасного рівня техніки та виявлення незайнятої ніші для теми дослідження виконано огляд існуючих підходів до адитивного виготовлення й відновлення змінних деталей машин, що охопив патентну, науково-технічну та практичну складові.

Аналіз патентного масиву свідчить, що основний обсяг охоронних документів у рубриках стосується вдосконалення самих адитивних процесів — конструкцій екструдерів, систем подачі філаменту, методів керування міжшаровою адгезією та усунення дефектів друку, — а не застосування цих процесів для відновлення конкретних вузлів технологічного устаткування [6]. Значний масив рішень присвячено матеріалознавчим аспектам: розширенню номенклатури

полімерів і композитів, а також багатоматеріальному формуванню, де ключовою не вирішеною проблемою залишається забезпечення сумісності матеріалів і міжфазної адгезії. Водночас документів, що захищали б конкретні конструкції змінних деталей поліграфічних чи різальних машин з ЧПК, виготовлених адитивними методами, у проаналізованому масиві практично не виявлено, що вказує на слабку патентну зайнятість саме цього прикладного напрямку.

На рівні інженерної практики поширеним підходом є використання відкритих (бібліотека Autodesk Fusion, Thingiverse) і корпоративних бібліотек тривимірних моделей та відтворення деталей методами зворотного інжинірингу. Проте такі рішення мають здебільшого несистемний, прикладний характер і, як правило, не супроводжуються інженерним обґрунтуванням вибору деталі, технології та матеріалу під конкретні умови експлуатації, що відрізняє їх від мети цього дослідження.

Таким чином, огляд засвідчив наявність незайнятої прикладної ніші: за розвиненої теоретичної бази адитивних технологій і матеріалознавства бракує робіт, що системно доводять інженерну та економічну доцільність адитивного відновлення конкретних змінних деталей поліграфічних машин. Це обґрунтовує наукову новизну й практичну спрямованість дослідження.

1.6. Критерії придатності та вибір об'єкта розробки

Номенклатура змінних деталей розглянутого обладнання неоднорідна за умовами роботи, тому вибір об'єкта адитивного розроблення не може спиратися на інтуїтивні міркування й потребує формалізованої системи критеріїв, що пов'язує конструктивно-експлуатаційні ознаки деталі з можливостями та обмеженнями адитивних процесів. Призначення такої системи подвійне: вона має визначити, які деталі взагалі допускають адитивне виготовлення, і встановити, яку роль воно відіграє для кожної з них — відновлення доступності недоступного оригіналу чи поліпшення характеристик самого виробу.

Критерії оцінювання утворюють дві родини. Першу становлять критерії експлуатаційної допустимості, що визначають принципову здатність адитивно виготовленого виробу виконувати функцію деталі. До них належить характер і рівень навантаження: адитивне виготовлення доцільне за помірних статичних і малоциклових навантажень, тоді як елементи, що сприймають значні знакозмінні зусилля, обмежені анізотропією та пониженою втомною міцністю полімерів. Другим у цій родині є чинник зношування й абразивного впливу: деталі тривалого фрикційного контакту потребують зносостійких матеріалів і відповідних процесів — синтезу на порошковому шарі або армованих композитів, — а ріжучі кромки залишаються поза межами адитивного відтворення. Третім є термічне та хімічне середовище: робота поблизу нагрівних елементів або в контакті з оливами та чорнилами зумовлює добір стійкого матеріалу (ABS/ASA, поліаміди) [5, с. 179].

Другу родину утворюють критерії технологічної раціональності, що визначають не допустимість, а економічну й виробничу доцільність адитивного виготовлення вже допустимої деталі. Перший із них — вимоги до точності та посадок: деталі без відповідальних посадкових поверхонь придатні до експлуатації безпосередньо після друку, тоді як точні посадки потребують додаткового механічного оброблення, що знижує економічний виграш [6]. Другий — геометрична технологічність друку, за якою перевагу мають форми, відтворювані з мінімальною кількістю підтримок і сприятливою орієнтацією шарів відносно діючих зусиль.

Сформовану систему критеріїв застосовано до конкретної номенклатури змінних деталей, установлені під час переддипломної практики на автоматизованому різальному комплексі з ЧПК Lectra Vector Fashion Q25 (рис. 1.7), який за конструктивно-кінематичними рішеннями (несуча рама, портал із координатним приводом, рухома різальна головка, система фіксації матеріалу, тракт подачі плівки) є конструктивним аналогом планшетних оздоблювально-різальних поліграфічних машин.



Рис. 1.7 - Автоматизована різально-розкрійна система Vector Fashion Q25

Основні технічні характеристики системи (модель VT-FU-Q25-72):

- ефективна ширина робочої зони — близько 1,83 м (72 дюйми);
- максимальна висота настилу — до 2,5 см низькоплиточного розкрою, що дозволяє швидко переналагоджуватися між різними замовленнями;
- швидкість роботи ножа — до 8 м/хв;
- потужність вакуумної турбіни — близько 22 кВт;

Конструктивно Lectra Vector Fashion Q25 складається з п'яти основних функціональних вузлів, схематично показаних на рис. 1.8.

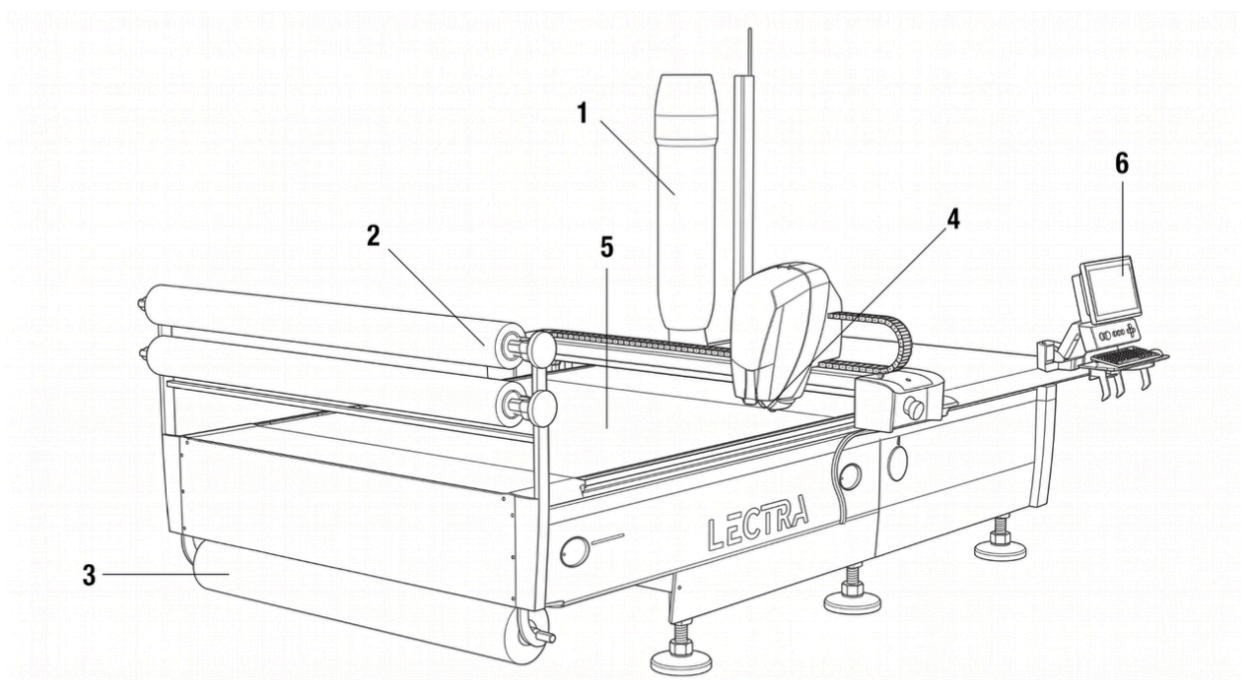


Рис. 1.8 - Схема основних елементів Lectra Vector Fashion Q25:

1 - вакуумна магістраль; 2 - вал подачі ізоляційної плівки; 3 - вал подачі підстилкового паперу; 4 - рухома каретка з різальною головкою; 5 - робоча поверхня з модульним покриттям; 6 - електронна панель керування

Технологічний цикл різання на Lectra Vector Fashion Q25 складається з кількох послідовних етапів. Конструктор надає лекала деталей, після чого програма автоматичної розкладки Diamino розміщує їх на віртуальному полотні так, щоб мінімізувати відходи. Витрати мінімізуються до 5 % порівняно з ручною розкладкою. Готовий файл передається на машину. На вакуумний стіл укладається настил тканини потрібної довжини, один або декілька шарів загальною висотою до 2,5 см для цієї моделі, а зверху накривається тонкою поліетиленовою плівкою.

Турбіна під столом відсмоктує повітря крізь щетинну поверхню. Атмосферний тиск через плівку щільно притискає настил до столу, через що матеріал стає фактично нерухомим і додатково ущільнюється, що покращує якість різку.



Рис. 1.9 - Різальна головка автоматизованої
різальної системи

За командами системи ЧПК серводвигуни переміщують ріжучу каретку по осі X (уздовж столу) і головку по осі Y (упоперек), забезпечуючи рух у горизонтальній площині над столом. Оператор має змогу перевірити стартову точку за допомогою лазерного або камерного позиціонування. Притискна п'ятка опускається на матеріал, ніж занурюється на потрібну глибину (вісь Z) і починає осциляційний рух угору-вниз із високою частотою, ріжучи багат шарову тканину. Одночасно головка рухається траєкторією контуру деталі. Програмний драйвер у реальному часі підлаштовує швидкість подачі, кут повороту ножа й силу притиску залежно від характеристик тканини та геометрії деталі, корегує різкість руху на гострих кутах, плавно на дугах. Періодичне автоматичне дозаточування виконується без зупинення циклу; одночасно ніж охолоджується струменем стисненого повітря, щоб уникнути плавлення синтетики й підгорання тканини.



Рис. 1.10 - Процес автоматизованого різання матеріалу за ЧПУ

Після завершення крою вакуум перестають подавати, плівка знімається, а готові деталі знімаються зі столу для подальшого комплектування й передачі на швейний потік. Завдяки поєднанню вакуумної фіксації, осциляційного ножа з адаптивним керуванням система забезпечує високу точність крою, повторюваність результатів і мінімальні відходи матеріалу, що й робить Lectra Vector Fashion Q25 одним із галузевих стандартів модної індустрії. Це устаткування утворює завершений автоматизований різальний комплекс підприємства, від ефективності якого напряму залежать продуктивність і якість усього подальшого швейного виробництва. Все устаткування гарно і енергоефективно працює навіть під час відключень при роботі від генератора.

Обстеження Lectra Vector Fashion Q25 виявило близько тридцяти — сорока позицій змінних і швидкозношуваних деталей, з яких щонайменше половина за геометричними, технологічними та експлуатаційними ознаками придатна до адитивного виготовлення. Послідовне застосування критеріїв до номенклатури деталей машини розподіляє її на три категорії придатності, наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Класифікація змінних деталей обладнання за придатністю до адитивного виготовлення

Категорія	Характерні деталі машини	Визначальний критерій	Роль адитивного виробництва	Технологія та матеріал
Придатні без застережень	Тримачі й адаптери, кронштейни датчиків і камер позиціонування, фланці рулонотримачів, неприводні напрямні елементи, захисні кожухи	Помірне навантаження, відсутність відповідальних посадок	Відтворення (заміщення оригіналу)	FDM/FFF; PETG
Умовно придатні	Притискні елементи зі змінною жорсткістю, модульні елементи робочих поверхонь, рухомі несучі елементи різальної голівки	Потреба у спеціальному матеріалі, багатоматеріальному формуванні або оптимізації форми	Поліпшення характеристики виробу	SLS (PA12, PA-CF); MMAM; метал-AB
Непридатні	Леза й ножі, вали, підшипники, зубчасті колеса, деталі з герметичними каналами	Знакозмінне високе навантаження, ріжучі кромки, прецизійні посадки	-	Класичні технології

Аналіз розподілу засвідчив, що найбільший сукупний економічний ефект серед усієї номенклатури має модульна плита щетинного покриття вакуумного столу. Плити (понад 80 шт. на столі) періодично виходять з ладу внаслідок багаторазового проколювання ножом в одних і тих самих зонах, що знижує розрідження в зоні притиску й погіршує точність крою; за даними, зібраними під

час практики, оригінальний модуль коштує близько 90-120 євро за строку постачання 2-4 тижні, тоді як вартість матеріалу для адитивного аналога становить орієнтовно 8-12 доларів США. Попри найвищу економічну привабливість, ця деталь поєднує жорстку несучу основу (РА12) та еластичний робочий шар зі щетинок (TPU), тобто належить до категорії умовно придатних і потребує багатоматеріального формування. З огляду на це модульну плиту визначено як перспективний напрям подальших досліджень, що задає змістовний зв'язок з виявленою науковою новизною.

Безпосереднім об'єктом розробки доцільно обрати деталь з категорії повністю придатних, що задовольняє всі п'ять критеріїв і не потребує спеціальних матеріалів, точного оброблення чи багатоматеріального формування.

Наведена класифікація виявляє, що адитивне виробництво реалізується в обладнанні цього класу у двох якісно відмінних ролях, спільний розгляд яких окреслює повний діапазон його застосовності. Перша роль — відтворення простих допоміжних деталей; її цінність полягає у відновленні доступності недоступного або непропорційно дорогого оригіналу за мінімальної собівартості та строку виготовлення, причому адитивна деталь функціонально еквівалентна серійній і лише заміщує її. Друга роль — поліпшення функціональних, насамперед рухомих, деталей; її цінність полягає в наданні виробу властивостей, недосяжних для серійного аналога: для зворотно-поступального елемента таким є зниження інерційної маси, що зменшує динамічні навантаження приводу й вібрацію та підвищує досяжні швидкість і точність різання. У цій ролі адитивна технологія в поєднанні з топологічною оптимізацією дає не заміну, а перевагу над вихідною конструкцією.

Для дослідження обох ролей за об'єкти розробки обрано репрезентативну пару деталей — по одній з категорій, у яких ці ролі виявляються найвиразніше. Основним об'єктом, що репрезентує роль поліпшення, обрано тримач ножа рухомої різальної голівки автоматизованого різального комплексу з числовим програмним керуванням (рис. 1.11). Тримач утримує лезо в напрямних і передає

йому зворотно-поступальний рух від кривошипно-важільного приводу, унаслідок чого зазнає високочастотного знакозмінного навантаження зі значною інерційною складовою. Саме для деталей такого роду маса є не пасивною характеристикою, а керованим чинником працездатності вузла: її зниження безпосередньо зменшує інерційні зусилля у приводі, послаблює вібрацію та підвищує граничні швидкість і точність різання. Перерозподіл матеріалу за траєкторіями силового потоку засобами топологічної оптимізації забезпечує таке зниження маси за збереження жорсткості й міцності конструкції [12], що зумовлює застосування повноцінного інженерного апарату — розрахунку напружено-деформованого стану, втомного аналізу за знакозмінного циклу та оптимізації форми з мінімізацією маси [6]. Рациональною технологією виготовлення такої деталі обрано синтез на порошковому шарі з армованого поліаміду, що забезпечує практично ізотропні властивості та відтворення оптимізованої геометрії без підтримок, з можливістю переходу до металевого адитивного процесу для найвідповідальнішого виконання.

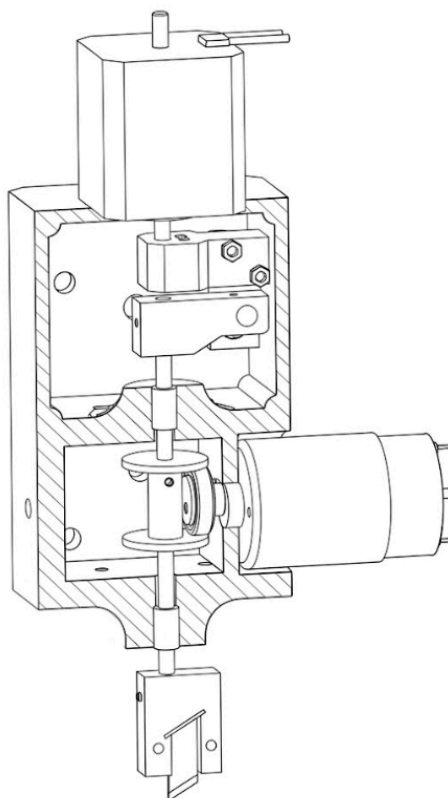


Рис. 1.11 - Загальна схема осциляційної різальної голівки

Допоміжним об'єктом, що репрезентує роль відтворення, обрано фланець-тримач (адаптер торця) рулону поліетиленової плівки різального комплексу (рис. 1.12). Деталь відповідає всім критеріям придатності без застережень: сприймає лише вагу рулону та незначний натяг полотна, не містить відповідальних посадок і придатна до експлуатації безпосередньо після друку [6], а як тіло обертання (опорний диск, центрувальна втулка, посадковий бурт) відтворюється з мінімальною кількістю підтримок. Технологією її виготовлення обрано екструзію матеріалу як найдоступнішу для деталей цієї категорії [2, с. 118], а матеріалом — поліетилентерефталат-гліколь (PETG), що поєднує достатню міцність, добру міжшарову адгезію та пластичний характер руйнування [6]. Ця деталь окреслює нижню межу складності адитивного відтворення й слугує практичним підтвердженням моделі забезпечення змінними деталями на вимогу.



Рис. 1.12 - Допоміжний об'єкт розробки - фланець-тримач рулону поліетиленової плівки

Обрана пара — оптимізований тримач ножа та відтворюваний фланець-тримач — у сукупності охоплює діапазон застосувань адитивного виробництва від найпростішої заміни недоступної деталі до інженерного

вдосконалення відповідального рухомого вузла й становить предмет конструкторського розроблення, інженерних розрахунків та дослідного виготовлення.

Висновки до розділу 1

Сучасний етап розвитку адитивного виробництва характеризується зміщенням сфери застосування від прототипування до виготовлення повнофункціональних деталей машин, що підтверджується стійким зростанням світового ринку та поширенням моделі виготовлення деталей. Здатність формувати складну геометрію, ресурсощадність і короткий цикл підготовки виробництва визначають принципову придатність технології для дрібносерійного виготовлення змінних деталей технологічного устаткування.

Забезпечення вузлів імпортного поліграфічного обладнання широкого формату та споріднених різальних систем з числовим програмним керуванням змінними деталями ускладнене тривалими строками постачання й непропорційно високою вартістю оригінальних запчастин; ці машини конструктивно споріднені й містять типову номенклатуру змінних деталей помірного навантаження, малосерійність яких ускладнює економічне виготовлення класичними методами та формує техніко-економічний «розрив» між реальною вартістю деталі та витратами на її офіційну заміну.

Порівняльний аналіз технологій FDM, SLA/MSLA та SLS і огляд матеріальної бази засвідчили відсутність універсального рішення: раціональний вибір визначається співвідношенням вимог до точності, навантаження та собівартості деталі, а ключовим чинником функціональності виробу є обґрунтований підбір матеріалу, причому для деталей із функціонально різнорідними зонами перспективним є багатоматеріальне виробництво за умови дотримання критеріїв сумісності матеріалів.

Адитивне виробництво доцільно розглядати як напрям забезпечення

змінними деталями через модель виготовлення на вимогу та відтворення деталей методами зворотного інжинірингу, що скорочує час постачання, складські запаси й простої обладнання, причому безпосередньо придатними до експлуатації після друку є передусім допоміжні деталі без відповідальних посадок.

Огляд патентної, науково-технічної та практичної інформації виявив незайняту прикладну нішу: за розвиненої теоретичної бази адитивних технологій і матеріалознавства бракує робіт, що системно доводять інженерну та економічну доцільність адитивного відтворення конкретних змінних деталей машин розглянутого класу, що визначає наукову новизну дослідження.

За системою критеріїв придатності розподілено номенклатуру деталей на придатні, умовно придатні та непридатні. Адитивне виробництво реалізується в обладнанні цього класу у двох якісно відмінних ролях, відтворення недоступного оригіналу та поліпшення характеристик відповідального виробу, спільний розгляд яких окреслює повний діапазон застосовності технології.

Відповідно до обох ролей обрано репрезентативну пару об'єктів розробки: тримач ножа рухомої різальної голівки, що як інерційно навантажений елемент розробляється засобами топологічної оптимізації форми з розрахунком напружено-деформованого стану та втомної міцності й виготовляється синтезом на порошковому шарі, і фланець-тримач рулону плівки, що як деталь без відповідальних посадок відтворюється екструзією матеріалу з PETG; обидва становлять предмет подальшого конструкторського розроблення, інженерних розрахунків і дослідного виготовлення.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВО-ТЕОРЕТИЧНЕ ТА КОНСТРУКТОРСЬКЕ РОЗРОБЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ

2.1. Постановка задачі конструкторського розроблення та вихідні дані

Відповідно до результатів першого розділу безпосередньому розробленню підлягає репрезентативна пара деталей автоматизованого різального комплексу Lectra Vector Fashion Q25, що охоплює два якісно відмінні застосування адитивного виробництва — поліпшення характеристик відповідального рухомого вузла та відтворення слабконавантаженої допоміжної деталі. Для кожного об'єкта задачу розроблення формалізовано окремо, оскільки роль адитивної технології визначає як склад інженерних розрахунків, так і вибір технології та матеріалу виготовлення.

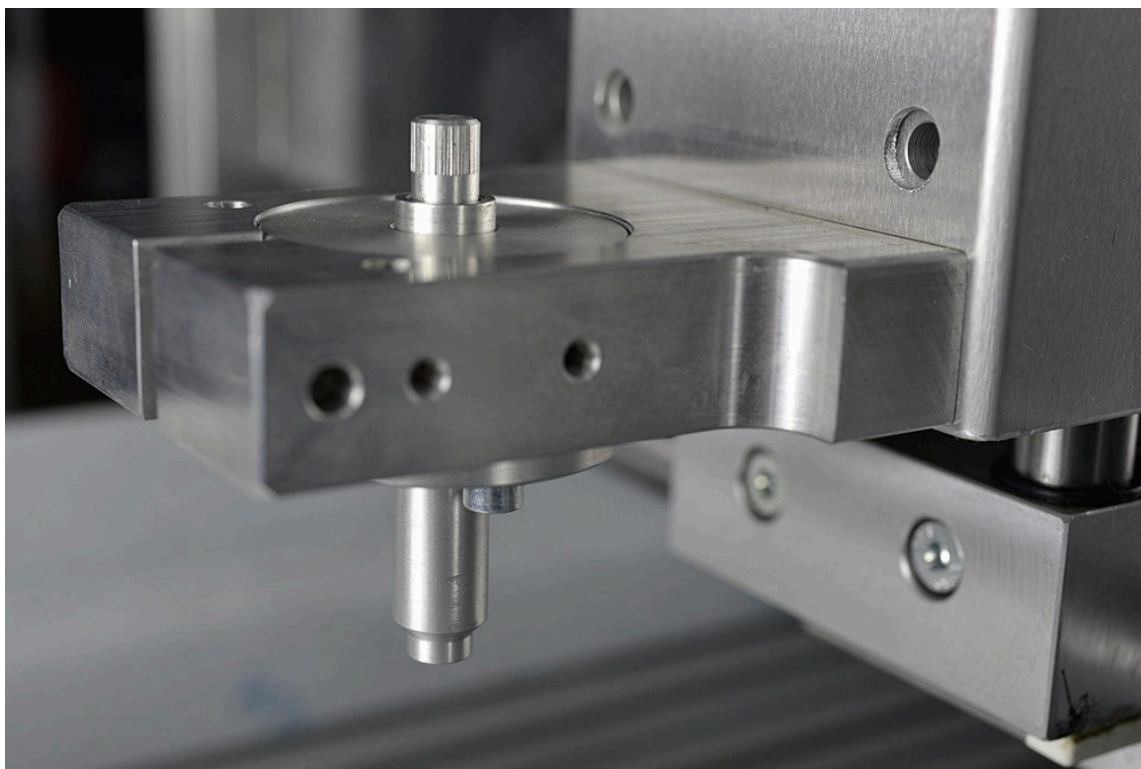


Рис. 2.1 - Зображення головки тримаючої ніж

Для тримача ножа осциляційної різальної голівки, що репрезентує роль

поліпшення, задача полягає у зниженні маси рухомої деталі засобами топологічної оптимізації за збереження жорсткості та міцності з подальшою перевіркою напружено-деформованого стану, втомної міцності за знакозмінного циклу та вібростійкості. Раціональною технологією виготовлення прийнято синтез на порошковому шарі (SLS) з армованого вуглецевим волокном поліаміду PA12-CF, що забезпечує практично ізотропні властивості та відтворення оптимізованої геометрії без підтримувальних структур [10; 15].



Рис. 2.2 - Фото фланців для рулонів матеріалу

Для фланця-тримача (адаптера торця) рулону поліетиленової плівки, що репрезентує роль відтворення, задача зводиться до побудови параметричної моделі-аналога та перевірного розрахунку статичної міцності, жорсткості, тривалої повзучості й контактної несучої здатності. Технологією виготовлення прийнято екструзію матеріалу (FDM/FFF) з поліетилентерефталат-гліколю (PETG) як найдоступнішу для деталей цієї категорії [2, с. 118; 5, с. 179].

Послідовність розв'язання задачі для тримача охоплює обґрунтування матеріалу, кінематичний і динамічний аналіз приводу для визначення навантажень, топологічну оптимізацію форми, скінченно-елементну перевірку

напружено-деформованого стану, розрахунок втомної міцності та модальний аналіз; для фланця — обґрунтування матеріалу, перевірку міцності, жорсткості й повзучості та визначення технологічних режимів друку. Вихідні дані наведено в табл. 2.1, механічні характеристики прийнятих матеріалів — у табл. 2.2.

Таблиця 2.1 - Вихідні дані для конструкторських розрахунків

Параметр	Позначення	Значення	Од.
Хід осциляції ножа	S	30	мм
Частота приводу голівки	n	3500	об/хв
Маса вихідного тримача ножа	m_0	0,120	кг
Маса леза із затиском	m_l	0,050	кг
Зусилля різання настилу	F_p	60	Н
Маса рулону плівки	m_p	16	кг
Натяг полотна на один торець	T	35	Н
Посадковий діаметр вала рулонотримача	d	20	мм

Таблиця 2.2 - Механічні характеристики прийнятих конструкційних матеріалів

Характеристика	PA12-CF (SLS)	PETG (FDM)
Границя міцності σ_b , МПа	75	47
Модуль пружності E, ГПа	4,0	2,0
Густина ρ , г/см ³	1,1	1,27
Границя витривалості σ_{-1} , МПа	≈ 19	≈ 12
Характер руйнування	в'язкий	пластичний

2.2. Обґрунтування вибору матеріалів за багатокритеріальною методикою

Вибір конструкційного матеріалу для кожної деталі виконано за зваженою багатокритеріальною методикою, що узгоджується із системою критеріїв придатності, сформульованою в розділі 1. Сутність методики полягає в оцінюванні кожного матеріалу-кандидата за низкою критеріїв за п'ятибальною шкалою з подальшим обчисленням інтегрального показника як суми добутків вагових коефіцієнтів на бали:

$$S = \sum w_i \cdot b_i, \quad \sum w_i = 1, \quad (2.1)$$

де w_i — ваговий коефіцієнт i -го критерію; b_i — бал матеріалу за цим критерієм. Вагові коефіцієнти призначено за функціональним призначенням деталі.

Для тримача ножа, що зазнає знакозмінного інерційного навантаження, найвищі ваги надано міцності й витривалості, питомій міцності (масі) та ізотропності властивостей. Результати оцінювання матеріалів-кандидатів наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 — Багатокритеріальний вибір матеріалу тримача ножа

Критерій	Вага(кг)	PETG	ABS	PA12	PA12-CF
Міцність і витривалість	0,30	2	2	3	5
Питома міцність (маса)	0,20	3	3	4	5
Ізотропність властивостей	0,20	2	2	5	4
Зносо- та термостійкість	0,10	2	3	4	4
Технологічність (без підтримок)	0,10	3	3	5	5
Доступність і вартість	0,10	5	5	3	2
Інтегральний показник S	1,00	2,6	2,7	3,9	4,4

Інтегральний показник для PA12-CF є найвищим, наприклад:

$$S(\text{PA12-CF}) = 0,30 \cdot 5 + 0,20 \cdot 5 + 0,20 \cdot 4 + 0,10 \cdot 4 + 0,10 \cdot 5 + 0,10 \cdot 2 = 4,4,$$

що кількісно обґрунтовує вибір армованого поліаміду як матеріалу тримача попри нижчу доступність порівняно з універсальними філаментами [15].

Для фланця-тримача, що належить до слабконавантажених допоміжних деталей, ваги перерозподілено на користь технологічності FDM-друку, доступності та ударної в'язкості; результати оцінювання наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 — Багатокритеріальний вибір матеріалу фланця-тримача

Критерій	Вага(кг)	PLA	ABS	PETG	TPU
Достатня міцність	0,15	3	3	4	2
Технологічність FDM / адгезія шарів	0,25	5	3	5	2
Ударна в'язкість, пластичність	0,20	2	3	4	5
Доступність і вартість	0,25	5	4	4	3
Волого- та хімістійкість	0,15	2	3	4	4
Інтегральний показник S	1,00	3,65	3,25	4,25	3,15

Найвищий інтегральний показник має PETG, що поєднує достатню міцність, добру міжшарову адгезію, пластичний характер руйнування та доступність, унаслідок чого його прийнято матеріалом фланця-тримача [5, с. 179; 6].

2.3. Аналіз різальної голівки та розрахунки

Тримач ножа утримує лезо в напрямних і передає йому зворотно-поступальний рух від ексцентрикового приводу, який за конструкцією наближається до механізму типу «синусний повзун» і забезпечує закон руху,

близький до простого гармонічного. Перевагою такого приводу є відсутність вторинних гармонік інерційної сили, властивих кривошипно-повзунному механізму, що сприятливо для високочастотної роботи. Кутову швидкість кривошипа визначають за частотою приводу:

$$\omega = \pi \cdot n / 30 = 3,14 \cdot 3500 / 30 = 366,5 \text{ рад/с.} \quad (2.2)$$

Закони переміщення, швидкості та прискорення ножа за кутом повороту $\varphi = \omega t$ (амплітуда руху дорівнює радіусу ексцентрика $r = S/2 = 15 \text{ мм}$):

$$x(\varphi) = r \cdot \cos\varphi; \quad (2.3)$$

$$v(\varphi) = -r \cdot \omega \cdot \sin\varphi, \quad v_{\max} = r \cdot \omega = 0,015 \cdot 366,5 = 5,50 \text{ м/с}; \quad (2.4)$$

$$a(\varphi) = -r \cdot \omega^2 \cdot \cos\varphi, \quad a_{\max} = r \cdot \omega^2 = 0,015 \cdot 366,5^2 = 2015 \text{ м/с}^2. \quad (2.5)$$

Максимальне прискорення відповідає близько 205 g і досягається у мертвих точках траєкторії, що підтверджує визначальний характер інерційного навантаження. Графіки переміщення, швидкості та прискорення за один оберт наведено на рис. 2.3.

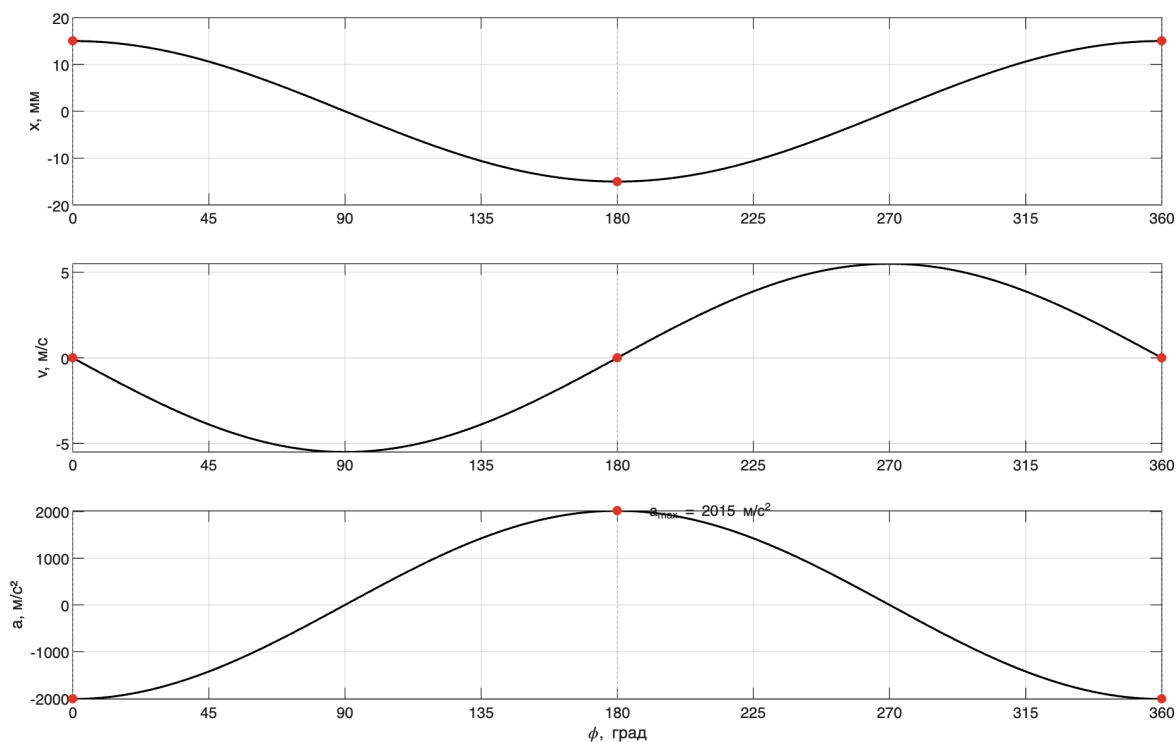


Рис. 2.3 - Графіки $x(\varphi)$, $v(\varphi)$, $a(\varphi)$ з позначенням мертвих точок

Інерційна сила рухомої маси (тримач разом із лезом) змінюється за гармонічним законом $F_{in}(\varphi) = m \cdot a(\varphi)$; її амплітуда до оптимізації конструкції:

$$F_{in0} = (m_0 + m_{л}) \cdot a_{max} = (0,120 + 0,050) \cdot 2015 = 343 \text{ Н.} \quad (2.6)$$

Окрім інерційної складової, на вістря леза діє зусилля різання багат шарового настилу $F_p = 60 \text{ Н}$, що порівняно невелике, але враховується як додаткова складова навантаження. Цикл навантаження є симетричним знакозмінним (коефіцієнт асиметрії $R = -1$).

Динамічний аналіз приводу полягає у визначенні крутного моменту, потрібного для подолання інерції рухомої маси. Для синусного механізму момент на валу від інерційної сили:

$$M_{in}(\theta) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega^2 \cdot \sin^2 \theta, \quad M_{in,max} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega^2. \quad (2.7)$$

До оптимізації ($m = 0,170 \text{ кг}$)

$$M_{in,max} = \frac{1}{2} \cdot 0,170 \cdot 0,015^2 \cdot 366,5^2 = 2,57 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

а пікова реактивна потужність приводу

$$P = M_{in,max} \cdot \omega = 2,57 \cdot 366,5 = 942 \text{ Вт.}$$

Середня потужність різання

$$P_p = F_p \cdot v_{сер} = 60 \cdot 3,50 = 210 \text{ Вт},$$

$$\text{де } v_{сер} = (2/\pi) \cdot v_{max}.$$

Оскільки інерційна сила та момент приводу прямо пропорційні масі рухомої деталі (формули 2.6, 2.7), маса розглядається не як пасивна характеристика, а як керований чинник працездатності вузла. Зниження маси тримача за збереження жорсткості й міцності одночасно зменшує навантаження на привід, вібрацію та підвищує граничні швидкість і точність різання.

Перерозподіл матеріалу виконано методом топологічної оптимізації на основі моделі ізотропного матеріалу зі штрафуванням проміжної густини (SIMP).

Цільовою функцією прийнято мінімізацію піддатливості конструкції (максимізацію жорсткості) за обмеженням на частку збереженого об'єму:

$$\min c(x) = UTKU = \sum x_e p \cdot u_e T k_0 u_e, \quad (2.8)$$

$$\text{за умови } V(x)/V_0 = f, \quad 0 < x_{\min} \leq x_e \leq 1, \quad (2.9)$$

де c — піддатливість; x_e — відносна густина елемента; $p = 3$ — коефіцієнт штрафування; f — задана частка об'єму. Розрахункову область задано габаритним об'ємом тримача з виділенням зон з'єднання з приводом і посадки леза як незмінних (non-design space). Накладено технологічні обмеження адитивного виготовлення: мінімальний розмір елемента структури 2 мм, площинну симетрію та обмеження кута звисання, що забезпечує друк без надмірної кількості підтримок. Параметри оптимізації зведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 — Параметри топологічної оптимізації

Параметр	Значення
Метод	SIMP (штраф $p = 3$)
Цільова функція	мінімізація піддатливості
Цільова частка об'єму f	0,40
Мінімальний розмір структури	2 мм
Технологічні обмеження	симетрія; кут звисання $\leq 45^\circ$
Поріг густини для реконструкції	0,30
Кількість ітерацій до збіжності	≈ 35

За результатами оптимізації прийнято консервативне зниження маси тримача на 38 %, що узгоджується з діапазоном 30-60 %, який забезпечує топологічна оптимізація для несучих елементів подібного класу [12; 15], і не перевищує його. Маса оптимізованого тримача та рухома маса вузла:

$$m_{\text{опт}} = 0,62 \cdot m_0 = 0,62 \cdot 0,120 = 0,075 \text{ кг}; \quad (2.10)$$

$$m = m_{\text{опт}} + m_{\text{л}} = 0,075 + 0,050 = 0,125 \text{ кг}. \quad (2.11)$$

Відповідні інерційна сила, момент приводу та розрахункове пікове навантаження після оптимізації:

$$F_{\text{ін}} = m \cdot a_{\text{max}} = 0,125 \cdot 2015 = 252 \text{ Н}; \quad (2.12)$$

$$M_{\text{ін, max}} = \frac{1}{2} \cdot 0,125 \cdot 0,015^2 \cdot 366,5^2 = 1,89 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.13)$$

$$F_{\text{розр}} = F_{\text{ін}} + F_p = 252 + 60 = 312 \text{ Н}. \quad (2.14)$$

Таким чином, оптимізація знижує інерційну силу з 343 до 252 Н, а піковий момент приводу — з 2,57 до 1,89 Н·м, тобто на 27 %; пікова реактивна потужність зменшується з 942 до 693 Вт. Це підтверджує, що зниження маси дає не лише міцніший, а й безпосередній динамічний ефект для роботи вузла.

Перевірний розрахунок оптимізованої конструкції виконано методом скінченних елементів. Тривимірну модель імпортовано у форматі STL, матеріалу призначено характеристики PA12-CF (табл. 2.2), скінченно-елементну модель побудовано на квадратичних тетраедричних елементах (десятивузлових). Закріплення задано за поверхнею з'єднання з приводом, навантаження — об'ємним полем інерційних сил та зусиллям різання на вістрі леза; бічна реакція напрямних, що сприймає поперечну складову, знята із шийки тримача.

Для забезпечення вірогідності результату виконано дослідження збіжності розв'язку за згущенням сітки; результати наведено в табл. 2.6. Зі зменшенням характерного розміру елемента максимальне напруження стабілізується, що свідчить про збіжність розв'язку за розміру елемента 0,3 мм.

Таблиця 2.6 — Дослідження збіжності скінченно-елементної сітки

Розмір елемента, мм	Кількість елементів, тис.	σ_{max} , МПа
2,0	18	8,6
1,0	61	9,1
0,5	194	9,3
0,3	412	9,4
0,25	640	9,4

Аналітичну оцінку для контролю результату МСЕ виконано для найбільш навантаженого перетину — шийки тримача.

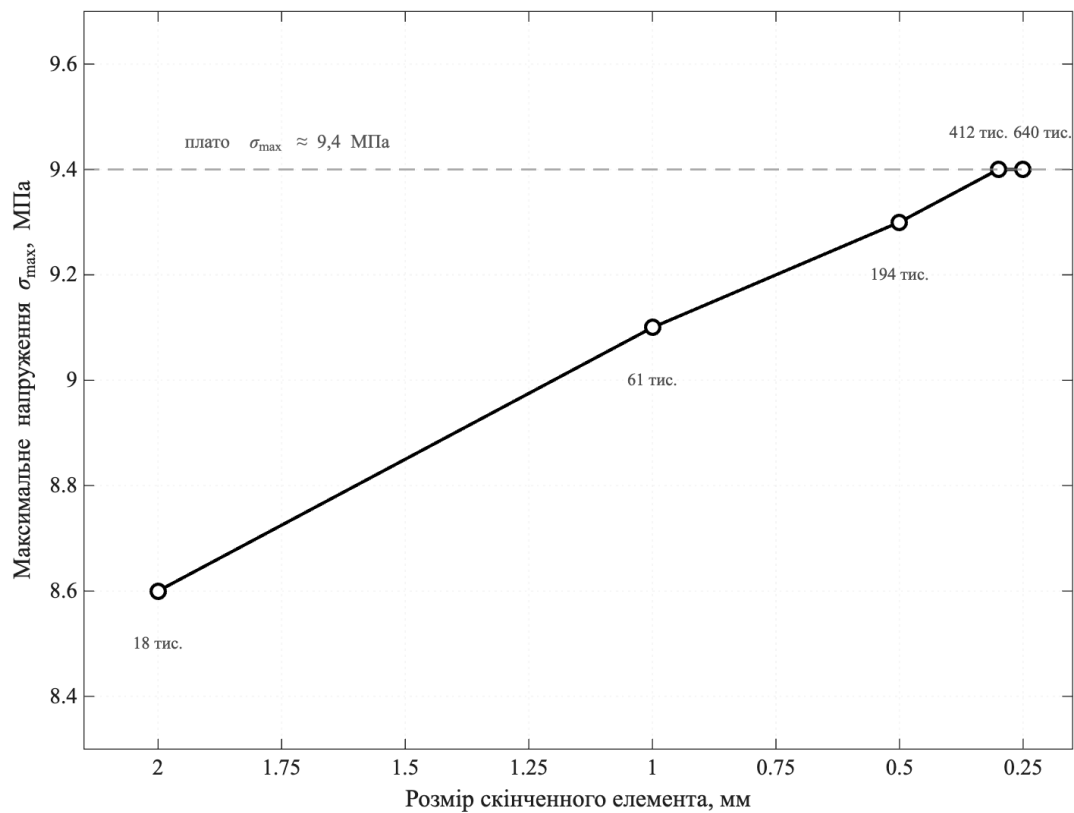


Рис. 2.4 - Графік збіжності сітки

Перетин шийки прийнято $b \times h = 14 \times 15$ мм; виліт прикладання різальної сили $e = 8$ мм; площа $A = 210$ мм², момент опору $W = b \cdot h^2 / 6 = 525$ мм³. Осьова та згинальна складові напружень:

$$\sigma_{\text{ос}} = F_{\text{розр}} / A = 312 / 210 = 1,49 \text{ МПа}; \quad (2.15)$$

$$\sigma_{\text{зг}} = F_{\text{розр}} \cdot e / W = 312 \cdot 8 / 525 = 4,75 \text{ МПа}; \quad (2.16)$$

$$\sigma_{\text{ном}} = \sigma_{\text{ос}} + \sigma_{\text{зг}} = 6,24 \text{ МПа}. \quad (2.17)$$

За результатами МСЕ з урахуванням концентрації напружень у галтелі ($K_t \approx 1,5$) пікове напруження $\sigma_{\max} \approx 9,4$ МПа, що збігається з аналітичною оцінкою та даними табл. 2.6. Статичний запас міцності:

$$n_{\text{ст}} = \sigma_{\text{в}} / \sigma_{\max} = 75 / 9,4 \approx 8,0, \quad (2.18)$$

що значно перевищує нормативне значення й свідчить про відсутність ризику статичного руйнування. Максимальне переміщення вузла з урахуванням опор напрямних не перевищує 0,05 мм, що є несуттєвим для точності різання.

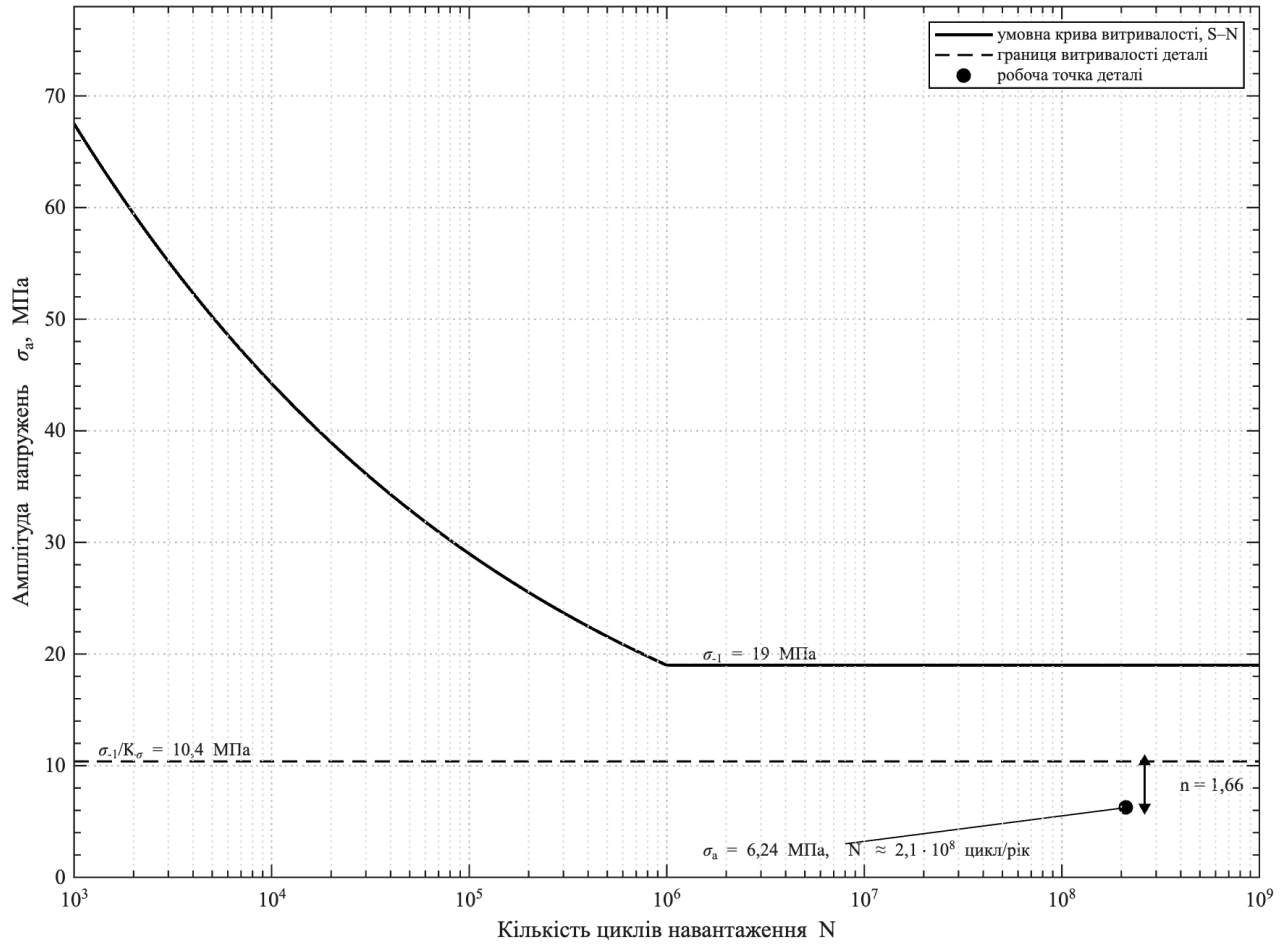


Рис. 2.5 - Діаграма витривалості S-N

Зважаючи на знакозмінний характер навантаження та велику кількість циклів за строк служби, визначальним для тримача є втомний критерій. Границю витривалості матеріалу за симетричного циклу прийнято за усталеним наближенням для конструкційних полімерів:

$$\sigma_{-1} = 0,25 \cdot \sigma_B = 0,25 \cdot 75 = 19 \text{ МПа.} \quad (2.19)$$

Ефективний коефіцієнт зниження витривалості враховує ефективний коефіцієнт концентрації напружень $K_f = 1,4$, коефіцієнт стану поверхні друкованої деталі $\beta = 0,85$ і масштабний коефіцієнт $\varepsilon = 0,9$:

$$K_{\sigma} = K_f / (\beta \cdot \varepsilon) = 1,4 / (0,85 \cdot 0,9) = 1,83. \quad (2.20)$$

Коефіцієнт запасу втомної міцності за амплітуди напружень $\sigma_a = \sigma_{ном} = 6,24$ МПа:

$$n = \sigma_{-1} / (K_{\sigma} \cdot \sigma_a) = 19 / (1,83 \cdot 6,24) = 1,66 \geq [n] = 1,5. \quad (2.21)$$

Орієнтовну кількість циклів навантаження за рік за інтенсивності експлуатації близько 1000 годин різання визначено як:

$$N_{\text{рік}} = n \cdot 60 \cdot t_p = 3500 \cdot 60 \cdot 1000 \approx 2,1 \cdot 10^8 \text{ циклів}. \quad (2.22)$$

Оскільки робоча амплітуда напружень $\sigma_a = 6,24$ МПа є меншою за границю витривалості $\sigma_{-1} = 19$ МПа з урахуванням коефіцієнта зниження, висока розрахункова довговічність; накопичення втомного пошкодження за наведеної кількості циклів не призводить до руйнування протягом усього розрахункового строку служби деталі.

Зіставлення коефіцієнтів запасу засвідчує, що статичний запас (8,0) багатократно перевищує втомний (1,66); отже, саме втомна міцність є обмежувальним критерієм для тримача, що й обґрунтовує застосування топологічної оптимізації разом із технологією SLS, яка забезпечує ізотропність властивостей і відтворення оптимізованої геометрії без підтримок.

Робота тримача за високої частоти осциляції потребує перевірки на відсутність резонансу, за якого збігання частоти збурення з власною частотою конструкції різко підвищує амплітуду коливань і напружень. Частоту збурення визначає частота приводу:

$$f_{36} = n / 60 = 3500 / 60 = 58,3 \text{ Гц}. \quad (2.23)$$

Першу власну частоту тримача оцінено за моделлю консольної балки з зосередженою масою на кінці. Згинальна жорсткість шийки (момент інерції перетину $I = b \cdot h^3 / 12 = 3,94 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4$, виліт $L = 0,025 \text{ м}$):

$$k = 3 \cdot E \cdot I / L^3 = 3 \cdot 4 \cdot 10^9 \cdot 3,94 \cdot 10^{-9} / 0,025^3 = 3,02 \cdot 10^6 \text{ Н/м}. \quad (2.24)$$

Перша власна частота за зведеної маси $m_{зв} \approx 0,061$ кг:

$$f_1 = (1/2\pi) \cdot \sqrt{(k/m_{зв})} = 0,159 \cdot \sqrt{(3,02 \cdot 10^6 / 0,061)} \approx 1120 \text{ Гц.} \quad (2.25)$$

Запас за частотою (відлаштування від резонансу):

$$f_1 / f_{зб} = 1120 / 58,3 \approx 19,2. \quad (2.26)$$

Власна частота тримача майже на порядок перевищує не лише основну частоту збурення (58,3 Гц), а й другу гармоніку (116,6 Гц), тому конструкція працює у глибоко докритичній зоні й резонанс виключено. Топологічна оптимізація дещо знижує загальну жорсткість деталі, проте найбільш навантажену шийку залишено суцільною, унаслідок чого запас за частотою зберігається на рівні понад п'ятнадцятикратного.

2.4. Зведені показники різальної голівки

Інтегральний ефект оптимізації за основними показниками працездатності вузла зведено в табл. 2.7. Зниження маси на 38 % забезпечує пропорційне зменшення інерційної сили та моменту приводу, послаблення вібрації й підвищення динамічних характеристик вузла за збереження достатніх запасів міцності та вібростійкості.

Таблиця 2.7 — Показники тримача до та після топологічної оптимізації

Показник	До	Після	Зміна
Маса рухомої частини, кг	0,170	0,125	–26 %
Інерційна сила $F_{ин}$, Н	343	252	–27 %
Піковий момент приводу, Н·м	2,57	1,89	–27 %
Пікова реактивна потужність, Вт	942	693	–26 %
Запас втомної міцності n	—	1,66	$\geq 1,5$
Запас за частотою $f_1/f_{зб}$	—	19,2	$\gg 1$

2.5 Розрахунок фланця-тримача рулону плівки

Фланець-тримач є тілом обертання, що складається з опорного диска, центрувальної втулки та посадкового бурта, і сприймає статичне навантаження від ваги рулону плівки та незначного натягу полотна.

Вага рулону, що розподіляється на два торцеві фланці, та розрахункове навантаження одного фланця з урахуванням натягу й коефіцієнта монтажно-динамічного перевантаження $k_{\text{дин}} = 1,4$:

$$G = m_p \cdot g = 16 \cdot 9,81 = 157 \text{ Н}; \quad G/2 = 78,5 \text{ Н}; \quad (2.27)$$

$$F_{\text{розр}} = k_{\text{дин}} \cdot (G/2 + T) = 1,4 \cdot (78,5 + 35) = 160 \text{ Н}. \quad (2.28)$$

Найбільш навантаженим елементом є центрувальна втулка ($D = 30 \text{ мм}$, $d = 20 \text{ мм}$), що працює на згин за вильоту $a = 18 \text{ мм}$:

$$M = F_{\text{розр}} \cdot a = 160 \cdot 0,018 = 2,88 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.29)$$

$$W = \pi(D^4 - d^4)/(32D) = 2,13 \cdot 10^3 \text{ мм}^3. \quad (2.30)$$

Напруження згину та коефіцієнт запасу міцності (з урахуванням анізотропії FDM через коефіцієнт 0,8, $\sigma_{\text{доп}} = 0,8 \cdot 47 = 37,6 \text{ МПа}$):

$$\sigma_{\text{зг}} = M/W = 2,88 \cdot 10^3 / 2,13 \cdot 10^3 = 1,35 \text{ МПа}; \quad (2.31)$$

$$n = \sigma_{\text{доп}} / \sigma_{\text{зг}} = 37,6 / 1,35 = 27,9. \quad (2.32)$$

Жорсткість втулки оцінено через прогин консольного елемента

$$I = \pi(D^4 - d^4)/64 = 3,19 \cdot 10^4 \text{ мм}^4:$$

$$\delta = F_{\text{розр}} \cdot a^3 / (3E \cdot I) \approx 0,005 \text{ мм}. \quad (2.33)$$

Оскільки полімери схильні до повзучості під тривалим навантаженням, виконано оцінку тривалого прогину з урахуванням зниження ізохронного модуля пружності PETG приблизно до $0,6 \cdot E$ за 10^4 год експлуатації:

$$\delta_{\text{повз}} = \delta / 0,6 \approx 0,008 \text{ мм}, \quad (2.34)$$

що залишається несуттєвим для функції центрування рулону. Контактний тиск у посадці на вал (довжина посадки $l = 25$ мм):

$$p = F_{\text{розр}} / (d \cdot l) = 160 / (20 \cdot 25) = 0,32 \text{ МПа} ; [p] \approx 10 \text{ МПа}. \quad (2.35)$$

Усі перевіірочні умови виконано з багатократним запасом, що підтверджує належність деталі до слабконавантажених і її придатність до експлуатації безпосередньо після друку без додаткового механічного оброблення.

Таблиця 2.8 — Зведені результати перевіірочних розрахунків деталей

Деталь	Критерій	σ , МПа	Запас n	$[n]$
Тримач ножа	Статична міцність	9,4	8,0	$\geq 2,0$
Тримач ножа	Втомна міцність	6,24	1,66	$\geq 1,5$
Тримач ножа	Вібростійкість	—	19,2	$\gg 1$
Фланець-тримач	Міцність на згин	1,35	27,9	$\geq 2,0$
Фланець-тримач	Зминання посадки	0,32	> 30	—

2.6. Технологічні режими друку та точність виготовлення

Технологічні режими виготовлення обрано відповідно до функції кожної деталі та обмежень відповідного адитивного процесу; зведення параметрів наведено в табл. 2.9. Для тримача ножа прийнято синтез на порошковому шарі (SLS) з порошку PA12-CF: орієнтація деталі забезпечує розташування площини симетрії перпендикулярно до напрямку силового потоку, що мінімізує вплив залишкової анізотропії; підтримувальні структури не потрібні, оскільки їх роль виконує неспечений порошок. Для фланця-тримача прийнято екструзію матеріалу

(FDM/FFF) з PETG з орієнтацією диском на платформі.

Досяжна точність FDM-друку ($\pm 0,2 \dots 0,3$ мм) є достатньою для габаритних і плоских поверхонь фланця, проте посадковий отвір під вал, що потребує підвищеної точності, передбачено друкувати з технологічним припуском і доводити розгорткою або проектувати з посадочним зазором, що відповідає рекомендаціям для деталей без відповідальних посадок [6]. Для тримача точність SLS ($\pm 0,1 \dots 0,2$ мм) забезпечує відтворення оптимізованої геометрії без додаткового оброблення, окрім посадкових поверхонь з'єднання з приводом.

Вплив ступеня внутрішнього заповнення на показники фланця досліджено окремо, оскільки заповнення є керованим параметром, що визначає компроміс між масою, тривалістю друку та несучою здатністю; результати наведено в табл. 2.10.

Таблиця 2.9 — Технологічні параметри адитивного виготовлення

Параметр	Тримач ножа (SLS)	Фланець (FDM)
Матеріал	PA12-CF	PETG
Товщина шару, мм	0,10	0,20
Заповнення	суцільне	50 % (метод гіроїд)
Периметри стінки	—	4
Підтримки	не потрібні	мінімальні
Досяжна точність, мм	$\pm 0,1 \dots 0,2$	$\pm 0,2 \dots 0,3$
Шорсткість Ra, мкм	8...15	12...25
Орієнтовна маса, кг	0,075	0,060

Згідно з експериментальними даними, зниження заповнення пропорційно зменшує межу міцності зразка [6], тому ефективну міцність прийнято пропорційною частці заповнення (консервативна оцінка без урахування підкріплення периметрами).

Таблиця 2.10 — Вплив ступеня заповнення на показники фланця-тримача

Заповнення, %	Маса, г	~ Час друку, год	$\sigma_{\text{еф}}$, МПа	Запас n
20	42	2,6	7,5	5,6
50	60	3,5	18,8	13,9
80	78	4,6	30,1	22,3
100	92	5,8	37,6	27,9

Рациональним прийнято заповнення 80%, яке за консервативної оцінки забезпечує запас міцності близько 26 за помірних маси й тривалості друку; застосування чотирьох суцільних периметрів навколо посадкового отвору формує близький до суцільного несучий контур, унаслідок чого фактичний запас наближається до значення для суцільної деталі (27,9).

Підготовка до друку охоплює експорт тривимірної моделі у формат STL, контроль цілісності полігональної сітки, нарізку на шари з призначенням наведених параметрів та генерацію керуючого коду, що відповідає типовому алгоритму створення деталі адитивними методами.

За результатами розрахунків побудовано параметричні тривимірні моделі обох деталей, придатні до подальшого редагування та масштабування під споріднені типорозміри обладнання. Для фланця-тримача модель відтворює опорний диск, центрувальну втулку з посадковим отвором та борт; для тримача ножа модель містить оптимізовану несучу структуру з незмінними зонами з'єднання з приводом і посадки леза.

На основі моделей розроблено робочі кресленики деталей із зазначенням посадкових розмірів, граничних відхилень і технічних вимог до адитивного виготовлення — матеріалу, товщини шару, ступеня заповнення та орієнтації друку.

Висновки до розділу 2

Виконано розроблення репрезентативної пари деталей різального комплексу, що охоплює обидві ролі адитивного виробництва — поліпшення та відтворення.

Багатокритеріальним методом кількісно обґрунтовано вибір матеріалів: для тримача ножа — армованого поліаміду PA12-CF (інтегральний показник 4,4), для фланця-тримача — PETG (4,25), що узгоджується із системою критеріїв придатності розділу 1.

Кінематичним і динамічним аналізом приводу встановлено, що визначальним є інерційне навантаження (прискорення 2015 м/с^2 , інерційна сила 343 Н та піковий момент приводу $2,57 \text{ Н}\cdot\text{м}$ до оптимізації). Засобами топологічної оптимізації за методом SIMP масу тримача знижено на 38 %, унаслідок чого інерційну силу зменшено на 27 % (до 252 Н), піковий момент приводу — з $2,57$ до $1,89 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а пікову реактивну потужність — з 942 до 693 Вт .

Скінченно-елементним аналізом із дослідженням збіжності сітки, втомним розрахунком та модальним аналізом підтверджено працездатність оптимізованого тримача: статичний запас становить $8,0$, втомний — $1,66$ за нормативного $[n] = 1,5$ (робоча точка лежить у зоні необмеженої довговічності), запас за частотою — $19,2$, що виключає резонанс. Обмежувальним критерієм є втомна міцність, що обґрунтовує застосування топологічної оптимізації та технології SLS.

Для фланця-тримача перевірними розрахунками встановлено багатократні запаси міцності ($27,9$ на згин), несуттєві миттєвий ($0,005 \text{ мм}$) і тривалий з урахуванням повзучості ($0,008 \text{ мм}$) прогини та низький контактний тиск у посадці ($0,32 \text{ МПа}$), що підтверджує придатність деталі до виготовлення методом FDM з PETG та до експлуатації безпосередньо після друку.

Обґрунтовано технологічні режими, орієнтацію друку та точність виготовлення обох деталей, досліджено вплив ступеня заповнення на показники фланця.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

3.1. Методика техніко-економічного оцінювання

Техніко-економічне оцінювання має на меті встановити, чи є адитивне виготовлення обраних деталей економічно виправданою альтернативою їх придбання через офіційні канали постачання, та кількісно визначити пов'язаний із таким переходом ефект. Особливість задачі полягає в тому, що рішення про спосіб відновлення працездатності вузла ухвалюється не за вартістю окремої статті витрат, а за сукупними витратами на отримання придатної до встановлення деталі, до яких, окрім ціни, належать витрати на доставку та опосередковані втрати від строку очікування. Тому за основу методики прийнято зіставлення повної собівартості адитивно виготовленої деталі з повними витратами на оригінальну деталь за єдиними цінами та тарифами.

Повну собівартість адитивно виготовленої деталі визначено як суму прямих витрат на одиницю продукції за формулою (3.1). До її складу включено вартість конструкційного матеріалу, спожитої електроенергії, амортизаційні відрахування на обладнання, віднесені на час виготовлення, витрати на постоброблення та оплату праці оператора. Загальновиробничі й адміністративні витрати, а також прибуток до собівартості не включено, оскільки виготовлення здійснюється для власних потреб підприємства, а не на продаж:

$$C = C_m + C_e + C_a + C_{no} + C_{np}, \quad (3.1)$$

де C_m — вартість витраченого конструкційного матеріалу; C_e — вартість спожитої електроенергії; C_a — амортизаційні відрахування на обладнання, віднесені на час виготовлення; C_{no} — витрати на постоброблення; C_{np} — оплата праці оператора.

Амортизаційні відрахування, віднесені на одиницю продукції, обчислено лінійним методом виходячи з первісної вартості обладнання, нормативного строку

корисного використання та річного фонду робочого часу обладнання. Вартість матеріалу визначено за фактичною масою витраченого філаменту або за об'ємом деталі залежно від способу тарифікації послуги, а вартість електроенергії — як добуток спожитої енергії та чинного тарифу.

Повні витрати на оригінальну деталь прийнято як суму ціни позиції та витрат на її доставку. Окремо враховано якісний показник — строк постачання, що не входить безпосередньо до грошового вираження витрат, але визначає тривалість вимушеного простою обладнання або потребу в утриманні страхового запасу деталей, а отже впливає на ефективність використання устаткування. Прямий економічний ефект від заміни кожної позиції обчислено за формулою (3.2) як різницю повних витрат, а відносну економію — як відношення цього ефекту до вартості оригіналу:

$$E = C_{orig} - C, \quad (3.2)$$

де C_{orig} — повні витрати на оригінальну деталь. Річний економічний ефект визначено підсумовуванням одиничної економії за номенклатурою деталей з урахуванням їх річної потреби, а доцільність капітальних вкладень у власне обладнання оцінено строком окупності як відношенням вартості обладнання до річної економії, що забезпечується його використанням.

Вихідні дані та прийняті в розрахунку припущення наведено в табл. 3.1. Цінові показники прийнято чинними на момент розроблення, із прийнятим курсом 1 USD = 41 грн та 1 EUR = 44 грн; тариф на електроенергію — 4,32 грн/кВт·год згідно з чинними тарифами для споживачів [15] та паспортом філаменту [10].

Таблиця 3.1 — Вихідні дані та прийняті техніко-економічні припущення

Параметр	Прийняте значення
Тариф на електроенергію	4,32 грн/(кВт·год)
Первісна вартість FDM-принтера	25 000 грн
Нормативний строк служби принтера	5 років
Річний фонд робочого часу принтера	2000 год
Ставка оплати праці оператора	150 грн/год
Ставка оплати праці інженера-конструктора	250 грн/год
Ціна PETG-філаменту	950 грн/кг
Питома вартість послуги SLS-друку (PA12-CF)	18 грн/см ³

3.2. Собівартість адитивного виготовлення обраних деталей

Собівартість двох обраних деталей розрахована окремо, оскільки вони репрезентують різні технології, матеріали та організаційні моделі виготовлення. Фланець-тримач друкується власними засобами підприємства методом екструзії матеріалу, тоді як тримач ножа, що потребує синтезу на порошковому шарі з армованого поліаміду та повноцінного інженерного розроблення, виготовляється за допомогою спеціалізованого бюро. Таке розмежування дозволяє оцінити дві принципово відмінні економічні моделі: внутрішнє виготовлення з капітальними витратами на обладнання та зовнішнє замовлення без них.

Фланець-тримач рулону плівки (FDM, PETG). Вихідні дані прийнято за результатами конструкторського розроблення (підрозділ 2.6): витрата матеріалу — 0,060 кг, тривалість друку — 3,5 год. За ціни PETG-філаменту 950 грн/кг вартість матеріалу становить $0,060 \cdot 950 = 57$ грн. Середня споживана потужність принтера

під час друку — близько 0,12 кВт, що за 3,5 год друку відповідає споживанню 0,42 кВт·год, а отже вартість електроенергії дорівнює $0,42 \cdot 4,32 = 1,8$ грн. Амортизаційні відрахування визначено з первісної вартості принтера 25 000 грн за нормативного строку служби 5 років та річного завантаження 2000 год:

$$C_a = (25\,000 / (5 \cdot 2000)) \cdot 3,5 = 2,5 \cdot 3,5 = 8,75 \text{ грн.} \quad (3.3)$$

Витрати на постоброблення (видалення підтримок, припасування посадкового отвору) прийнято на рівні 5 грн, а оплату праці оператора за 0,4 год активної роботи з підготовки, зняття та контролю деталі — на рівні $0,4 \cdot 150 = 60$ грн. Структуру та підсумкову собівартість деталі наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 — Структура собівартості фланця-тримача (FDM, PETG)

Стаття витрат	Розрахунок	Сума, грн
Конструкційний матеріал	$0,060 \text{ кг} \cdot 950 \text{ грн/кг}$	57,0 (+5 постобробка)
Електроенергія	$0,42 \text{ кВт} \cdot \text{год} \cdot 4,32 \text{ грн}$	1,8
Амортизація обладнання	$2,5 \text{ грн/год} \cdot 3,5 \text{ год}$	8,75
Оплата праці оператора	$0,4 \text{ год} \cdot 150 \text{ грн/год}$	~ 60,0
Разом собівартість	-	≈ 133

Найбільшу частку собівартості формує оплата праці оператора, тоді як вартість матеріалу та енергії є незначною, що характерно для дрібних допоміжних деталей і підтверджує економічну ефективність їх власного виготовлення навіть за одиничної потреби.

Тримач ножа різальної голівки (SLS, PA12-CF). Деталь виготовляється за послугою бюро адитивного друку, тому її собівартість формують вартість послуги, що нараховується за об'ємом виробу, та амортизована вартість інженерного

розроблення. За об'єму оптимізованої деталі 68 см^3 (підрозділ 2.6) і питомої вартості послуги SLS-друку з армованого поліаміду 18 грн/см^3 вартість друку становить $68 \cdot 18 = 1224 \text{ грн}$. Витрати на топологічну оптимізацію, перевірочні розрахунки та підготовку моделі (8 год роботи інженера за ставкою 250 грн) розподілено на партію з 10 деталей, що дає амортизовану складову $8 \cdot 250 / 10 = 200 \text{ грн}$. Структуру собівартості наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 — Структура собівартості тримача ножа (SLS, PA12-CF)

Стаття витрат	Розрахунок	Сума, грн
Послуга SLS-друку	$68 \text{ см}^3 \cdot 18 \text{ грн/см}^3$	1224
Амортизація інженерного розроблення	$8 \text{ год} \cdot 250 \text{ грн} / 10 \text{ шт}$	200
Разом собівартість	-	≈ 1424

На відміну від фланця, собівартість тримача ножа визначається переважно вартістю послуги друку складної оптимізованої геометрії з конструкційного матеріалу, проте навіть з урахуванням розподіленої вартості інженерного розроблення вона лишається на порядок нижчою за вартість оригіналу. Це засвідчує, що економічна перевага адитивного виготовлення зберігається і для відповідальних деталей, виготовлення яких потребує зовнішньої послуги та інженерного супроводу.

Зіставлення собівартості адитивних аналогів із повними витратами на оригінальні деталі наведено в табл. 3.4. Вартість оригіналів прийнято за даними, зібраними під час переддипломної практики: фланець-тримач як просту допоміжну деталь — близько 90 € , прецизійний металевий тримач ножа — близько 300 € з урахуванням доставки.

Таблиця 3.4 — Порівняння витрат на оригінальні та адитивно виготовлені деталі

Показник	Фланець-тримач	Тримач ножа
Технологія / матеріал	FDM / PETG	SLS / PA12-CF
Собівартість адитивної деталі, грн	133 грн	1 424 грн
Вартість оригіналу, €	90	300
Вартість оригіналу, грн	3 960	13 200
Строк постачання оригіналу	2–3 тижні	3–4 тижні
Строк адитивного виготовлення	години	2–3 дні
Економія на одиницю, грн	3 827	11 776
Відносна економія, %	96,6	89,2

Економію на одиницю обчислено за формулою (3.2): для фланця $E = 3960 - 133 = 3827$ грн (97 %), для тримача ножа $E = 13\,200 - 1424 = 11\,776$ грн (89,2 %). За орієнтовної річної потреби чотири фланці й два тримачі річний прямий економічний ефект становить:

$$E_{річ} = 4 \cdot 3827 + 2 \cdot 11\,776 = 15\,308 + 23\,552 \approx 38,9 \text{ тис. грн/рік} . \quad (3.4)$$

Доцільність капітальних вкладень у власний FDM-принтер оцінено строком окупності як відношенням його первісної вартості до річної економії, що забезпечується власним друком. Якщо віднести до принтера лише позицію фланця (річна економія 15,3 тис. грн), строк окупності становить:

$$T_{ок} = K / E_{фл} = 25\,000 / 15\,308 \approx 1,6 \text{ року} . \quad (3.5)$$

Однак той самий принтер обслуговує всю категорію придатних без застережень допоміжних деталей машини — кронштейни датчиків, неприводні напрямні елементи, захисні кожухи (підрозділ 1.6, табл. 1.2), — тому з урахуванням повної номенклатури деталей, що друкуються власними засобами, строк окупності обладнання скорочується до першого року експлуатації. Виготовлення тримача ножа за послугою бюро капітальних витрат не потребує, тому економічний ефект від нього є чистою економією вже з першої деталі.

Отримані показники характеризуються запасом стійкості до зміни вихідних умов. Відносна економія для обох деталей перевищує 89 %, тому навіть за подвоєння собівартості друку внаслідок зростання цін на матеріали чи послуги економічна перевага зберігається. Чутливість до валютного курсу діє у сприятливому напрямі: оскільки оригінал номінований в євро, а собівартість друку — переважно у гривні, послаблення гривні збільшує абсолютну економію. Таким чином, висновок про економічну доцільність є робастним і не залежить від точності окремих вихідних оцінок.

Окрім прямої економії, заміна тримача ножа адитивним аналогом дає неекономічний ефект, обґрунтований у підрозділі 2.3: зниження інерційної маси рухомого елемента внаслідок топологічної оптимізації зменшує динамічні навантаження приводу й вібрацію та підвищує граничні швидкість і точність різання, тобто надає вузлу властивостей, недосяжних для серійного аналога. Самостійну вартість має й скорочення строку отримання деталі з тижнів до годин: за оцінками, незаплановані простої поглинають близько 11 % річної виручки промислових підприємств [8], тому усунення очікування постачання запобігає втратам, що багатократно перевищують собівартість друку.

3.3. Вплив адитивного відновлення на ремонтопридатність

Прямий економічний ефект, не вичерпує переваг переходу до адитивного відновлення деталей: його стратегічна цінність полягає у підвищенні

ремонтпридатності обладнання та ефективності його використання. Ремонтпридатність як властивість пристосованості об'єкта до підтримання й відновлення працездатного стану безпосередньо залежить від доступності змінних деталей: за моделі, орієнтованої виключно на оригінальне постачання, час відновлення працездатності визначається не складністю ремонтної операції, а строком очікування деталі, який для імпортного устаткування сягає кількох тижнів.

Адитивне виготовлення на вимогу замінює фізичний склад деталей цифровим — бібліотекою перевірених тривимірних моделей, з якої деталь може бути надрукована безпосередньо за потреби. Такий підхід скорочує середній час відновлення працездатності до годин або днів, зменшує обсяг складських запасів і пов'язаного з ними обігового капіталу та усуває залежність від єдиного постачальника. Для деталей, що замінюються регулярно, перехід від тижневого циклу постачання до внутрішнього виготовлення якісно змінює характер технічного обслуговування, переводячи його з реактивного очікування в кероване планове відновлення.

Ефективність використання обладнання кількісно відображається коефіцієнтом використання, що враховує частку планового фонду часу, протягом якої устаткування виконує корисну роботу. Незаплановані простої, значну частку яких становить саме очікування недоступної деталі, є основним чинником зниження цього коефіцієнта. Скорочення строку отримання змінної деталі з тижнів до годин безпосередньо зменшує тривалість простоїв і підвищує коефіцієнт використання, а отже й продуктивність ділянки. Для різального комплексу, вбудованого в єдину технологічну ланку швейного виробництва, цей ефект є мультиплікативним: зупинка однієї машини блокує весь подальший потік, тому навіть короткочасне усунення простою зберігає продуктивність усього виробничого ланцюга.

Окремого значення набуває стійкість виробництва в кризові періоди. Здатність відтворювати змінні деталі власними засобами знижує вразливість підприємства до порушення логістичних ланцюгів та нерегулярності постачання,

характерної для воєнного часу й геополітичної напруженості. Енергетична автономність такого рішення узгоджується з режимом роботи обстеженого виробництва, що зберігає працездатність під час відключень за рахунок генератора: дільниця адитивного друку з помірним енергоспоживанням здатна функціонувати в тих самих умовах, забезпечуючи безперервність відновлення деталей незалежно від зовнішніх постачань.

3.4. Забезпечення якості адитивно виготовлених деталей

Економічна та експлуатаційна доцільність адитивного відновлення реалізується лише за умови, що виготовлена деталь відповідає вимогам якості, які висуваються до її функції у вузлі. Якість адитивно виготовленої деталі визначається сукупністю геометричної точності, стабільності механічних властивостей та якості поверхні, керованих параметрами технологічного процесу. Для обраних деталей точність відтворення геометрії забезпечується в межах, властивих відповідним технологіям: 0,1–0,3 мм для екструзії матеріалу та 0,1–0,2 мм для синтезу на порошковому шарі (табл. 1.1), що є достатнім для деталей без відповідальних посадок.

Стабільність механічних властивостей забезпечується керуванням технологічними режимами. Для фланця-тримача вплив анізотропії екструзійного друку нівельовано орієнтацією деталі зі сприятливим розташуванням шарів відносно діючих зусиль та заповненням, що формує суцільний несучий контур навколо посадкового отвору; для тримача ножа синтез на порошковому шарі забезпечує практично ізотропні властивості, що знімає вимоги до орієнтації як критичного чинника. Багатократний запас міцності, отриманий у перевірочних розрахунках, свідчить про належність деталей до слабо- та помірнонавантажених, для яких залишкова мінливість властивостей друку не є визначальною.

Контроль якості виготовлених деталей передбачає геометричне обмірювання посадкових і габаритних розмірів, перевірку відповідності фактичної маси розрахунковій як непрямий показник стабільності заповнення та контроль складання у спряжуваному вузлі. Деталі без відповідальних посадок, до яких належить фланець-тримач, придатні до експлуатації безпосередньо після друку без додаткового механічного оброблення, тоді як посадкові поверхні за потреби доводяться постобробленням до потрібного класу точності. Систематизоване застосування таких процедур забезпечує відтворюваність якості за повторного друку з тієї самої перевіреної моделі цифрового складу.

Якість змінних деталей безпосередньо впливає на якість готової продукції різального комплексу. Зношування фланця-тримача порушує центрування та рівномірність подачі плівки, а спрацювання елементів різальної голівки погіршує точність ведення ножа; обидва чинники знижують якість крою — точність контуру, повторюваність та частку придатного матеріалу. Своєчасна заміна цих деталей якісними адитивними аналогами підтримує характеристики, що визначають продуктивність і якість усього подальшого швейного виробництва: високу точність крою, повторюваність результатів та мінімальні відходи матеріалу. Таким чином, забезпечення якості адитивно виготовлених деталей є не лише технічною умовою їх застосування, а й чинником збереження якості кінцевої продукції підприємства.

3.5. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих чинників

Експлуатація ділянки адитивного виготовлення та обслуговуваного різального комплексу пов'язана з низкою небезпечних і шкідливих виробничих чинників, які доцільно систематизувати за джерелом виникнення — процесом адитивного друку та роботою різального устаткування.

Основним шкідливим чинником екструзійного друку є емісія летких органічних сполук та ультрадисперсних частинок розміром 1–100 нм, що

утворюються під час нагрівання полімеру до в'язкоплинного стану. Дослідження емісії показали, що навіть для PETG, який належить до порівняно низькоемісійних матеріалів, у газовій фазі виявляються етилбензол, толуол, ксилол та стирол, а сумарна кількість частинок за цикл друку сягає $3,88 \cdot 10^{10}$ [16]. Через малий розмір ультрадисперсні частинки проникають у глибокі відділи дихальної системи, а тривала експозиція пов'язана з ризиком запальних та інших респіраторних реакцій [17], що зумовлює потребу у видаленні забрудненого повітря безпосередньо із зони друку. Супутнім є чинник термічної небезпеки: температура сопла та робочого столу сягає 240 °C, що створює ризик опіків під час обслуговування.

У разі виготовлення деталей синтезом на порошковому шарі до зазначених чинників додається пилоутворення під час засипання, просіювання та вилучення деталей із порошкового масиву: дисперсний поліамід становить інгаляційну небезпеку та, як горючий пил, формує ризик утворення вибухонебезпечної пилоповітряної суміші. Оскільки тримач ножа виготовляється за послугою бюро, ці чинники діють поза межами підприємства, проте їх враховано на випадок переходу до власного порошкового друку. Спільним для всіх процесів є чинник електробезпеки, зумовлений живленням нагрівальних та приводних елементів. Під час обслуговування різального комплексу діють механічні небезпеки рухомих органів — переміщення каретки порталом та зворотно-поступальний рух осциляційного ножа, що створюють ризик защемлення й порізу. Робота вакуумної турбіни потужністю близько 22 кВт є джерелом інтенсивного шуму, система пневматичного охолодження ножа — джерелом небезпеки, пов'язаної зі стисненим повітрям, а різання текстильного настилу супроводжується виділенням текстильного пилу та волокон у робочу зону. Наведений перелік чинників визначає зміст подальших захисних заходів, провідне місце серед яких посідає організація вентиляції дільниці адитивного друку.

Систему вентиляції дільниці розраховано відповідно до вимог чинних будівельних норм [18] за поєднанням загальнообмінної та місцевої витяжної

вентиляції. Загальнообмінна вентиляція забезпечує розбавлення залишкових концентрацій летких органічних сполук та ультрадисперсних частинок у всьому об'ємі приміщення, тоді як місцева витяжка вловлює основну масу забруднень безпосередньо над джерелом, що є найбільш ефективним способом обмеження надходження шкідливих речовин у робочу зону.

Геометричні параметри дільниці прийнято за фактичними: довжина 6 м, ширина 4 м, висота 2,8 м, що відповідає об'єму приміщення:

$$V = 6 \cdot 4 \cdot 2,8 \approx 67 \text{ м}^3. \quad (3.6)$$

Для приміщень із виділенням летких органічних сполук та дисперсних частинок прийнято кратність повітрообміну $k = 8$ 1/год. Потрібну продуктивність загальнообмінної вентиляції визначено за об'ємом приміщення та кратністю повітрообміну:

$$L = k \cdot V = 8 \cdot 67 = 536 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (3.7)$$

Відповідно до розрахунку обрано припливно-витяжну установку продуктивністю не менше 540 м³/год, оснащену НЕРА-фільтром для вловлювання ультрадисперсних частинок та вугільним фільтром для поглинання летких органічних сполук. Кратнісний метод прийнято як інженерну оцінку; за наявності даних про інтенсивність виділення конкретної шкідливої речовини продуктивність уточнюється за умовою розбавлення до гранично допустимої концентрації, що зазвичай дає нижчу потрібну витрату, тому прийнятий розрахунок є консервативним.

Продуктивність місцевої витяжки над принтером визначено за швидкістю всмоктування у площині приймального отвору $v = 0,5$ м/с та площею отвору

$$A = 0,3 \cdot 0,3 = 0,09 \text{ м}^2:$$

$$L_m = v \cdot A \cdot 3600 = 0,5 \cdot 0,09 \cdot 3600 = 162 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (3.8)$$

Місцева витяжка такої продуктивності, розташована безпосередньо над зоною друку, вловлює основну частку емісії в місці її утворення, знижуючи навантаження на загальнообмінну систему та концентрацію забруднень на робочому місці оператора. Поєднання загальнообмінної та місцевої вентиляції забезпечує підтримання параметрів повітря робочої зони в межах санітарних вимог за помірних енерговитрат на повітрообмін.

3.6. Заходи з електро- та пожежної безпеки

На підставі проаналізованих чинників для ділянки передбачено комплекс організаційно-технічних заходів з електро-, механічної, пожежної безпеки та захисту від шуму.

З електробезпеки виконується захисне заземлення корпусів обладнання та занулення, застосовуються пристрої захисного вимкнення в мережі живлення нагрівальних і приводних елементів, а прокладання кабелів виконується із захистом від механічного пошкодження. Механічна безпека рухомих органів різального комплексу забезпечується захисними огорожами та кінцевими вимикачами, що блокують рух каретки й ножа при відкритті захисних панелей, унеможливаючи доступ до зони різання під час роботи.

Засоби індивідуального захисту визначено за характером робіт: під час обслуговування друкованого процесу застосовуються захисні рукавиці для запобігання опікам об нагріті елементи, а під час робіт із поліамідним порошком — респіратор класу FFP2, що забезпечує вловлювання не менше 94 % дисперсних частинок. Порошок і філамент зберігаються в герметичній тарі, що водночас захищає матеріал від зволоження та обмежує пилоутворення. Робота з порошком виконується на поверхнях, що унеможливають накопичення горючого пилу.

Заходи пожежної безпеки враховують горючість полімерних матеріалів і порошку: ділянку укомплектовано вуглекислотними та порошковими вогнегасниками,

придатними для гасіння займань за наявності електрообладнання під напругою, а зони роботи з дисперсним поліамідом облаштовано з урахуванням ризику утворення вибухонебезпечної пилоповітряної суміші. Рівень шуму на робочому місці підлягає вимірюванню згідно з чинними санітарними нормами [19], якими для постійних робочих місць у виробничих приміщеннях встановлено гранично допустимий еквівалентний рівень 80 дБА; у разі перевищення цього значення поблизу вакуумної турбіни передбачено встановлення звукоізолювального кожуха та застосування засобів індивідуального захисту органів слуху. Сукупність наведених заходів узгоджено з чинними нормативними вимогами й забезпечує безпечну експлуатацію дільниці адитивного друку та обслуговуваного устаткування.

Висновки до розділу 3

Виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності заміни оригінальних деталей різального комплексу адитивно виготовленими аналогами, оцінено вплив такого рішення на ремонтпридатність, ефективність використання обладнання та якість продукції, а також розроблено заходи з охорони праці для дільниці адитивного друку.

Розрахунок повної собівартості показав, що адитивне виготовлення обраних деталей є економічно ефективним для обох розглянутих моделей виробництва: собівартість фланця-тримача, друкованого власними засобами підприємства методом FDM з PETG, становить близько 133 грн проти 3960 грн вартості оригіналу (економія 96,6 %), а собівартість тримача ножа, виготовленого за послугою бюро методом SLS з армованого поліаміду, — близько 1424 грн проти 13 200 грн (економія 89,2 %). Сумарний прямий річний економічний ефект за орієнтовної потреби чотири фланці й два тримачі становить близько 38,9 тис. грн, причому капітальні витрати на FDM-принтер окуповуються в межах першого року експлуатації за рахунок власного виготовлення придатних без застережень

допоміжних деталей. Запас відносної економії понад 89 % робить висновок про доцільність стійким до зміни цін і валютного курсу.

Установлено, що стратегічна цінність адитивного відновлення не вичерпується прямою економією: перехід до моделі виготовлення на вимогу з цифрового складу підвищує ремонтпридатність обладнання, скорочує час відновлення працездатності з тижнів до годин, знижує складські запаси та залежність від єдиного постачальника й підвищує коефіцієнт використання устаткування, що для потокового швейного виробництва дає мультиплікативний ефект на продуктивність усього технологічного ланцюга. Забезпечення геометричної точності та стабільності властивостей друкованих деталей керуванням технологічними режимами підтримує якість крою, а отже й якість готової продукції підприємства.

Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників виявив як провідний чинник адитивного процесу емісію летких органічних сполук та ультрадисперсних частинок, для нейтралізації якої розраховано систему вентиляції дільниці: загальнообмінну продуктивністю не менше 540 м³/год з НЕРА- та вугільним фільтром і місцеву витяжку продуктивністю 162 м³/год над зоною друку. Розроблений комплекс заходів з електро-, пожежної безпеки та захисту від шуму узгоджено з чинними нормативними вимогами й забезпечує безпечну експлуатацію дільниці.

ВИСНОВОК

У дипломному проєкті вирішено прикладну інженерну задачу підвищення взаємозамінності вузлів поліграфічних та споріднених галузевих машин зі зниженням пов'язаних із заміною деталей експлуатаційних витрат і простоїв обладнання шляхом застосування технологій 3D-друку для виготовлення змінних деталей. За результатами виконаного дослідження сформульовано такі висновки.

Аналіз становлення та сучасного стану адитивного виробництва засвідчив зміщення сфери його застосування від прототипування до виготовлення повнофункціональних деталей машин, що підтверджується стійким зростанням світового ринку та поширенням моделі виготовлення деталей на вимогу. Здатність формувати складну геометрію, ресурсоощадність і короткий цикл підготовки виробництва за відсутності потреби в дорогому оснащенні визначають принципову придатність технології до дрібносерійного й одиничного виготовлення змінних деталей технологічного устаткування.

Установлено, що забезпечення вузлів імпортного обладнання змінними деталями ускладнене тривалими строками постачання та непропорційно високою вартістю оригінальних запчастин, що формує техніко-економічний розрив між конструктивною простотою деталі й витратами на її офіційну заміну; заповнення цього розриву засобами власного адитивного виготовлення є об'єктивно доцільним, особливо в кризові періоди порушення логістичних ланцюгів.

Порівняльним аналізом технологій FDM/FFF, SLA/MSLA та SLS і оглядом матеріальної бази встановлено відсутність універсального рішення: раціональний вибір визначається співвідношенням вимог до точності, навантаження та собівартості деталі, а ключовим чинником функціональності виробу є обґрунтований підбір матеріалу. Сформовано формалізовану систему критеріїв придатності, що розподілила номенклатуру змінних деталей різального комплексу на придатні, умовно придатні та непридатні й виявила дві якісно відмінні ролі адитивного виробництва — відтворення недоступного оригіналу та поліпшення

характеристик відповідального виробу.

Відповідно до обох ролей обрано репрезентативну пару об'єктів розроблення: тримач ножа осциляційної різальної голівки (роль поліпшення) та фланець-тримач рулону плівки (роль відтворення). Багатокритеріальним методом кількісно обґрунтовано вибір матеріалів — армованого поліаміду PA12-CF (інтегральний показник 4,4) для тримача та PETG (4,25) для фланця.

Кінематичним і динамічним аналізом приводу встановлено визначальний характер інерційного навантаження тримача (прискорення 2015 м/с^2 , інерційна сила 343 Н, піковий момент приводу $2,57 \text{ Н}\cdot\text{м}$). Засобами топологічної оптимізації за методом SIMP масу рухомої частини знижено на 38 %, унаслідок чого інерційну силу зменшено на 27 % (до 252 Н), піковий момент приводу — до $1,89 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а пікову реактивну потужність — з 942 до 693 Вт. Скінченно-елементним аналізом із дослідженням збіжності сітки, втомним розрахунком та модальним аналізом підтверджено працездатність оптимізованої конструкції: статичний запас становить 8,0, втомний — 1,66 за нормативного $[n] = 1,5$, запас за частотою — 19,2, що виключає резонанс; обмежувальним критерієм є втомна міцність, що обґрунтовує застосування топологічної оптимізації разом із технологією SLS.

Для фланця-тримача перевірними розрахунками встановлено багатократні запаси міцності (27,9 на згин), несуттєві миттєвий (0,005 мм) і тривалий з урахуванням повзучості (0,008 мм) прогини та низький контактний тиск у посадці (0,32 МПа), що підтверджує належність деталі до слабконавантажених і її придатність до експлуатації безпосередньо після друку методом FDM з PETG без додаткового механічного оброблення. Для обох деталей обґрунтовано технологічні режими, орієнтацію друку та точність виготовлення, побудовано параметричні тривимірні моделі й розроблено робочу конструкторську документацію.

Техніко-економічним обґрунтуванням доведено економічну ефективність адитивного виготовлення для обох моделей виробництва: собівартість фланця-тримача, друкованого власними засобами підприємства, становить близько 133 грн проти 3960 грн вартості оригіналу (економія 96,6 %), а собівартість тримача ножа, виготовленого за послугою бюро, — близько 1424 грн проти 13 200

грн (економія 89,2 %). Сумарний прямий річний економічний ефект за орієнтовної потреби чотири фланці й два тримачі становить близько 38,9 тис. грн, причому капітальні витрати на FDM-принтер окуповуються в межах першого року експлуатації. Запас відносної економії понад 89 % робить висновок про доцільність стійким до зміни цін і валютного курсу.

Установлено, що стратегічна цінність адитивного відновлення не вичерпується прямою економією: перехід до моделі виготовлення на вимогу з цифрового складу перевірених тривимірних моделей підвищує ремонтпридатність обладнання, скорочує час відновлення працездатності з тижнів до годин, знижує складські запаси та залежність від єдиного постачальника й підвищує коефіцієнт використання устаткування, що для потокового швейного виробництва дає мультиплікативний ефект на продуктивність усього технологічного ланцюга. Розроблено заходи з охорони праці для ділянки адитивного друку, провідним з яких є система вентиляції із загальнообмінною продуктивністю не менше 540 м³/год (з НЕРА- та вугільним фільтром) і місцевою витяжкою 162 м³/год над зоною друку.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що удосконалено підхід до відновлення номенклатури змінних деталей вузлів поліграфічних машин, який, на відміну від орієнтованого виключно на оригінальні деталі виробника, ґрунтується на формалізованій системі критеріїв придатності деталей до виготовлення методами 3D-друку та на узгодженні матеріалу й технології виготовлення з функціональним призначенням і умовами роботи деталі, що дозволяє розширити коло деталей, придатних до виготовлення власними засобами підприємства.

Практичне значення роботи полягає в розробленні готових до впровадження параметричних моделей і конструкторської документації обраної пари деталей, придатних до масштабування під споріднені типорозміри обладнання, а також у формуванні методики відбору, розрахунку та адитивного виготовлення змінних деталей, застосовної до широкої номенклатури імпортного технологічного устаткування. Перспективним напрямом подальших досліджень визначено

багатоматеріальне адитивне формування модульної плити щетинного покриття вакуумного столу, що поєднує жорстку несучу основу та еластичний робочий шар і має найвищу серед усієї номенклатури економічну привабливість.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. Geneva : ISO, 2021. 38 p.
2. Муравйов О. В., Нижник Ю. М., Петрик В. Ф., Протасов А. Г., Серий К. М. Сучасний стан та перспективи розвитку адитивних технологій. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Т. 32 (71), № 5. С. 114–119. DOI: 10.32838/2663-5941/2021.5/18.
3. New Wohlers Report 2026 highlights \$24.2B global Additive Manufacturing market [Електронний ресурс] // Metal AM. 17.02.2026. URL: <https://www.metal-am.com/new-wohlers-report-2026-highlights-24-2b-global-additive-manufacturing-market/> (дата звернення: 01.06.2026).
4. The role of additive manufacturing in spare parts management: A systematic review [Електронний ресурс] // Journal of Manufacturing Systems / ScienceDirect. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790825001521> (дата звернення: 01.06.2026).
5. Слободяник В. Г., Голубник Т. С. Аналіз матеріалів і технологій сучасного адитивного виробництва. Квалілогія книги. 2026. № 1 (49). С. 177–185. DOI: 10.32403/2411-3611-2026-1-49-177-185.
6. Espacenet Patent Search [Електронний ресурс] : база даних патентної документації // European Patent Office. URL: <https://worldwide.espacenet.com> (дата звернення: 01.06.2026).
7. Metal Additive Manufacturing comes of age in Apple's flagship products [Електронний ресурс] // Metal AM. 31.10.2025. URL: <https://www.metal-am.com/metal-additive-manufacturing-comes-of-age-in-apples-flagship-products/> (дата звернення: 01.06.2026).
8. The True Cost of Downtime 2024 [Електронний ресурс] : звіт / Siemens ; Senseye Predictive Maintenance. 2024. URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1b43afb5-2d07-47f7-9eb7-893fe7d0bc59/TCOD-2024_original.pdf (дата звернення: 01.06.2026).

9. Value of Reliability [Електронний ресурс] : звіт за результатами опитування 3 200 керівників / ABB. 2023. The Monthly Metric: Unscheduled Downtime // Inside Supply Management / Institute for Supply Management. URL: <https://www.ismworld.org/supply-management-news-and-reports/news-publications/inside-supply-management-magazine/blog/2024/2024-08/the-monthly-metric-unscheduled-downtime/> (дата звернення: 01.06.2026).
10. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Additive manufacturing technologies. Cham: Springer, 2020. 691 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
11. Пояснення технології струминного 3D-друку та порівняння з DLP, MSLA та SLA [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.liqcreate.com/uk/supportarticles/jetting-3dprinting-versus-dlp-sla/> (дата звернення: 01.06.2026).
12. Okorie O., Perveen A., Talamona D., Kostas K. Topology Optimization of an Aerospace Bracket: Numerical and Experimental Investigation. Applied Sciences. 2023. Vol. 13, № 24. Art. 13218. DOI: 10.3390/app132413218.
13. VectorAutomotive iP [Електронний ресурс] // Lectra : офіц. сайт. URL: <https://www.lectra.com/en/library/vectorautomotive-ip-a-powerful-cost-cutting-tool-in-the-cutting-room> (дата звернення: 04.06.2026).
14. How Does Oscillating Knife Cutting Machine Work [Електронний ресурс] URL: <https://cncamor.com/how-does-oscillating-knife-cutting-machine-work/> (дата звернення: 04.06.2026).
15. Тарифи на електроенергію для непобутових споживачів [Електронний ресурс] : офіц. дані // Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). 2026. URL: <https://www.nerc.gov.ua> (дата звернення: 05.06.2026).
16. Bernatikova S., Dudacek A., Prichystalova R., Klecka V., Kocurkova L. Characterization of Ultrafine Particles and VOCs Emitted from a 3D Printer. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Vol. 18, № 3. Art. 929. DOI: 10.3390/ijerph18030929.

17. Azimi P., Zhao D., Pouzet C., Crain N. E., Stephens B. Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. *Environmental Science & Technology*. 2016. Vol. 50, № 3. P. 1260–1268. DOI: 10.1021/acs.est.5b04983.
18. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ : Мінрегіон України, 2013. 141 с.
19. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ : МОЗ України, 1999.
20. Охорона праці та цивільний захист. Конспект лекцій. [Електронний ресурс] : навч. посіб. Для студ. Спеціальностей: 101 «Екологія»; 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»; 184 «Гірництво» / КПП ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.С. Козлов . – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 174 с.
21. Андрощук Г. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3d-друку. *Наука, технології, інновації*. 2017. № 1. С. 68–77.
22. Additive manufacturing and recommendations / Y. Huang та ін. *Journal of manufacturing science and 92 engineering*. 2015. Т. 137, № 1. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4028725> (дата звернення: 05.06.2026)
23. Порошкові титанові сплави для адитивних технологій: структура, властивості, моделювання: монографія / О. В. Овчинников, З. А. Дурягіна, Т. Є. Романова та ін. – Київ : Наукова думка, 2021. – 196 с.
24. Morokoshi S. Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Materials Prepared by Additive Manufacturing Technology and HIP Process / S. Morokoshi, H. Masao, H. Yagura, Y. Yamomoto, T. Fujikawa // *Proc. 11th Int. Conf. on Hot Isostatic Pressing*. – Stockholm, 2014. – P. 398–404.
25. Kumbhar N. N. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies : A Review / N. N. Kumbhar, A. V. Mulay // *J. Inst. Eng. India Ser. C*, 2018. – V. 99, N 4. – P. 481-487

26. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Поліщук А.О. Перспективи застосування 3D-друку в легкій промисловості. Вісник Хмельницького національного університету. 2017. No 4.
27. Поліщук О.С., Зозуля П.Ф., Поліщук А.О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку, Вісник Хмельницького національного університету. 2017. No 6.
28. Зозуля П.Ф., Поліщук О.С., Неймак В.С., Поліщук А.О. Застосування технології 3D-друку у взуттєвій промисловості. Наукові нотатки. Луцький національний університет, 2019. Випуск 67.

ДОДАТКИ