

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

УДК 631.3

ТАРНОПОЛЬСЬКИЙ ОЛЕКСІЙ ЮРІЙОВИЧ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ПРОЕКТУВАННЯ ТА ЗД ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ
СКЛАДНОСТІ ДЛЯ АГРОДРОНІВ

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Керівник роботи

д. т. н., проф. Грабар І. Г.

Житомир-2025

АНОТАЦІЯ

Тарнопольський Олексій Юрійович. Проєктування та 3D-виготовлення деталей підвищеної складності для агродронів. - Кваліфікаційна робота на правах рукопису на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 208 Агроінженерія. - Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У кваліфікаційній роботі розглянуто процес проєктування та адитивного виготовлення конструктивних елементів аграрних безпілотних літальних апаратів з метою зменшення їх маси, підвищення міцності та зниження собівартості виготовлення.

Актуальність дослідження зумовлена зростанням застосування агродронів у сільському господарстві та необхідністю підвищення ефективності їх експлуатації. Об'єктом дослідження є процес проєктування та виготовлення високонавантажених вузлів сільськогосподарських безпілотних літальних апаратів, а предметом дослідження - методи топологічної оптимізації конструкцій і технологічні параметри адитивного виробництва деталей з композитних матеріалів.

Метою роботи є підвищення вагової досконалості та зниження собівартості силових елементів агродронів шляхом впровадження технологій генеративного дизайну та 3D-друку. У ході виконання роботи проведено аналіз сучасних методів проєктування та виготовлення вузлів БПЛА, виконано комп'ютерне моделювання і чисельний аналіз напружено-деформованого стану конструктивного елемента, здійснено його топологічну оптимізацію та розроблено технологічний процес адитивного виготовлення.

Запропонований підхід забезпечує зменшення маси деталі при збереженні необхідного рівня міцності та підтверджує доцільність використання адитивних технологій у виробництві вузлів агродронів. Результати дослідження можуть бути використані у практичній діяльності та навчальному процесі в галузі агроінженерії.

Ключові слова: агродрон, безпілотний літальний апарат, адитивні технології, FDM-друк, топологічна оптимізація, комп'ютерне моделювання, композитні матеріали.

ANNOTATION

Tarnopolskyi Oleksii Yuriiovych. Design and 3D Manufacturing of High-Complexity Parts for Agricultural Drones. - Qualification thesis manuscript. Master's qualification thesis for obtaining the degree of Master in specialty 208 Agricultural Engineering. - Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The qualification thesis examines the process of design and additive manufacturing of structural elements of agricultural unmanned aerial vehicles with the aim of reducing their weight, increasing strength, and lowering manufacturing costs. The relevance of the study is determined by the growing use of agricultural drones in farming and the need to improve their operational efficiency.

The object of the research is the process of design and manufacturing of highly loaded components of agricultural unmanned aerial vehicles, while the subject of the research includes methods of topological optimization of structures and technological parameters of additive manufacturing of composite parts. The purpose of the thesis is to improve weight efficiency and reduce the cost of load-bearing elements of agricultural drones through the implementation of generative design and 3D printing technologies.

During the research, modern methods of UAV component design and manufacturing were analyzed, computer modeling and numerical analysis of the stress-strain state of a structural element were performed, its topological optimization was carried out, and an additive manufacturing process was developed. The proposed approach ensures a reduction in part weight while maintaining the required strength level and confirms the feasibility of using additive technologies in the production of agricultural drone components. The research results can be applied in practical engineering activities and in the educational process in the field of agricultural engineering.

Keywords: agricultural drone, unmanned aerial vehicle, additive technologies, FDM printing, topological optimization, computer modeling, composite materials.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ВУЗЛІВ БПЛА АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ.....	6
1.1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АГРОДРОНІВ	6
1.2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ КОНСТРУКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ CREALITY HYPER PLA-CF	9
1.3. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ВИРОБНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ (3D-ПРИНТЕР CREALITY K1C).....	12
1.3.1. Кінематична схема CoreXY та вібростійкість.....	13
1.3.2. Спеціалізована екструзійна система ("Unicorn Nozzle").....	13
1.3.3. Direct-екструдер та контроль потоку	14
1.3.4. Закрита камера та допоміжні системи	14
1.4. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ТА КОНЦЕПЦІЯ DFAM.....	15
1.4.1. Топологічна оптимізація (Topological Optimization)	15
1.4.2. Використання комірчастих структур (Lattices) та гіроїдів	16
1.4.3. Анізотропія властивостей FDM-деталей	16
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВУЗЛІВ АГРОДРОНА.....	18
2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ	18
2.1.1. Характеристики матеріалу	19
2.1.2. Граничні умови (Boundary Conditions)	19
2.2. АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЗОВОЇ МОДЕЛІ	21
2.2.1. Аналіз запасу міцності (Safety Factor)	21
2.2.2. Аналіз напружень (Von Mises Stress).....	22
2.2.3. Аналіз жорсткості (Displacement).....	23

2.3. ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ (SHAPE OPTIMIZATION).....	24
2.4. ВАЛІДАЦІЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ МОДЕЛІ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ	26
2.4.1. Аналіз ефективності зменшення маси	26
2.4.2. Аналіз запасу міцності оптимізованої конструкції	27
2.4.3. Аналіз напружень та деформацій	28
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ ДЕТАЛІ.....	30
3.1. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛІВ.....	30
3.2. ПІДГОТОВКА КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ (CAM) В ORCASLICER	31
3.2.1. Вибір орієнтації моделі	31
3.2.2. Налаштування параметрів слайсингу	32
3.3. РЕЖИМИ ДРУКУ ТА ВИРОБНИЧИЙ ПРОЦЕС	33
3.4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ.....	33
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	36
4.1. АНАЛІЗ ШКІДЛИВИХ ТА НЕБЕЗПЕЧНИХ ВИРОБНИЧИХ ФАКТОРІВ.....	36
4.2. ЗАХОДИ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ.....	37
4.3. ВИМОГИ ДО МІКРОКЛІМАТУ ТА ВЕНТИЛЯЦІЇ	38
4.4. ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА	38
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	42

ВСТУП

Актуальність теми. Агропромисловий комплекс України переживає етап інтенсивної цифровізації, де ключову роль відіграють безпілотні авіаційні системи (БПЛА). Агродрони забезпечують точне землеробство, моніторинг посівів та внесення засобів захисту рослин. Проте експлуатація такої техніки пов'язана з високими ризиками механічних пошкоджень внаслідок інтенсивного використання, вібраційних навантажень та контакту з перешкодами.

Традиційні логістичні ланцюги постачання запасних частин часто є неефективними через високу вартість оригінальних компонентів та тривалий час очікування, що є критичним під час сезонних польових робіт. Альтернативою стає використання адитивних технологій (3D-друку) для оперативного виготовлення деталей за концепцією «on-demand» (виробництво за вимогою).

Поява доступних настільних 3D-принтерів з кінематикою CoreXY (зокрема Creality K1C) та інженерних композитних матеріалів (PLA, посиленого вуглеволокном — PLA-CF) відкриває нові можливості для створення навантажених вузлів дронів. Проте проста заміна литих деталей на друковані без урахування анізотропії 3D-друку та оптимізації геометрії не забезпечує необхідної надійності. Тому розробка методики проектування та виготовлення оптимізованих деталей підвищеної складності для агродронів є актуальним науково-технічним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри агроінженерії та технічного сервісу за напрямом вдосконалення технологій виробництва та експлуатації безпілотних систем.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності відновлення та модернізації агродронів шляхом розробки технологічного процесу проектування та 3D-друку деталей з композиту PLA-CF із застосуванням топологічної оптимізації.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

1. Провести аналіз умов експлуатації агродронів та обґрунтувати вибір матеріалу Hyper PLA-CF та обладнання (Creality K1C).

2. Розробити 3D-моделі навантажених вузлів дрона (променів, кріплень двигунів).
3. Провести комп'ютерне моделювання (CAE) та інженерний аналіз міцності деталей методом скінченних елементів (FEM).
4. Виконати топологічну оптимізацію конструкції для зменшення маси при збереженні показників жорсткості.
5. Розробити технологічні рекомендації щодо параметрів друку (температурні режими, орієнтація шарів) для забезпечення максимальної міцності виробів.

Об'єкт дослідження: Технологічні процеси виготовлення деталей безпілотних літальних апаратів методом пошарового наплавлення (FDM/FFF).

Предмет дослідження: Параметри проектування, оптимізації та 3D-друку високонавантажених деталей з вуглеповненого пластику PLA-CF.

Методи дослідження. У роботі використано теоретичні методи аналізу науково-технічної літератури; методи 3D-моделювання (CAD) для створення геометричних форм; метод скінченних елементів (FEM) для розрахунку напружено-деформованого стану; методи топологічної оптимізації для генеративного дизайну; експериментальні методи для відпрацювання режимів друку.

Наукова новизна одержаних результатів:

- Дістало подальшого розвитку застосування методу топологічної оптимізації для FDM-друку, що, на відміну від існуючих підходів, враховує специфічну анізотропію міцності матеріалу PLA-CF.
- Обґрунтовано раціональні режими друку композитом Huper PLA-CF на високошвидкісних принтерах кінематики CoreXY для забезпечення структурної цілісності тонкостінних елементів агродронів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена методика дозволяє скоротити час простою агротехніки завдяки можливості оперативного виготовлення запчастин безпосередньо в господарстві або майстерні. Запропоновані оптимізовані конструкції деталей мають на 15–20% меншу вагу порівняно зі стандартними аналогами, що сприяє збільшенню

тривалості польоту дрона. Результати роботи можуть бути використані сервісними центрами з ремонту БПЛА та операторами агротехніки.

Публікації. Результати дослідження апробовано шляхом публікації наукових тез у міжнародному науковому альманасі «Crosspoint» та участі у науковій конференції-форумі «United Perspectives 24/7» у межах міжнародного проєкту «Global Creative Ideas Forum 3.0».

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 46 сторінки.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ВУЗЛІВ БПЛА АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

1.1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АГРОДРОНІВ

Впровадження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в агропромисловий комплекс України є ключовим елементом концепції точного землеробства. Агродрони використовуються для внесення засобів захисту рослин, моніторингу стану посівів та картографування полів. На відміну від розвідувальних дронів, агротехнічні БПЛА відносяться до класу важких мультироторних систем, що накладає специфічні вимоги до їх конструкції та матеріалів.



Рисунок 1. Агродрон Reactive Drone Agric RDE616

Конструктивно більшість сучасних агродронів (Рисунок 1) (наприклад, серії DJI Agras, XAG) виконані за мультикоптерною схемою (гексакоптери або октакоптери). **Основними силовими вузлами конструкції є:**

- **Центральна рама:** несе на собі основне навантаження від баку з робочою рідиною (вага якого може сягати 20–50 кг) та акумуляторних батарей.
- **Промені (Arms):** консольні елементи, що забезпечують винос рушіїв від центру мас. Вони працюють на вигин та кручення.
- **Вузли кріплення двигунів (Моторауми):** передають тягу від двигунів на раму.
- **Шасі:** сприймають ударні навантаження при зльоті та посадці.

Аналіз умов експлуатації виявив ряд критичних факторів, що впливають на надійність цих вузлів:

1. **Вібраційні навантаження:** Робота потужних безколекторних двигунів створює високочастотні вібрації. Це призводить до накопичення втомних напружень у матеріалах, що може викликати розшарування (деламінацію) карбонових трубок або тріщини у пластикових литих з'єднаннях.
2. **Динамічні навантаження:** Агродрони працюють у режимах різких прискорень та гальмувань для забезпечення рівномірного покриття поля. Це створює значні інерційні моменти на вузлах кріплення променів та двигунів.
3. **Агресивне хімічне середовище:** Постійний контакт із пестицидами, гербіцидами та добривами вимагає від матеріалів високої хімічної стійкості. Деякі види пластиків, що використовуються у побуті, можуть деградувати під впливом агрохімії.
4. **Експлуатаційні ризики:** Специфіка польотів на малих висотах (1.5–3 метри над рослинами) підвищує ризик зіткнення з перешкодами (дерева,

лінії електропередач). При таких інцидентах найчастіше страждають промені, кріплення моторів та пропелери.

Традиційні методи ремонту передбачають повну заміну пошкодженого вузла оригінальною запчастиною. Проте в умовах інтенсивного сезону польових робіт виникають проблеми логістичного характеру: висока вартість оригінальних запчастин та тривалі терміни їх доставки. Простій техніки в сезон призводить до значних економічних втрат.

Окрім ремонту, існує потреба в **модернізації** типових конструкцій під специфічні задачі (наприклад, встановлення нестандартного навісного обладнання, форсунок іншого типу або посилених шасі). Стандартні методи виробництва (лиття під тиском) є економічно не вигідними для виготовлення одиничних екземплярів або малих серій деталей.

Таким чином, актуальним є завдання розробки технології виготовлення високонавантажених деталей агродронів методом адитивного виробництва (3D-друку). Це дозволить реалізувати концепцію **On-demand manufacturing** (виробництво за вимогою), скоротити час ремонту та здешевити експлуатацію техніки. Використання композитних матеріалів, таких як PLA, посилений вуглеволокном (CF), у поєднанні з оптимізацією топології деталі, відкриває нові можливості для створення легких та міцних конструкційних елементів.

1.2. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ КОНСТРУКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ CREALITY HYPER PLA-CF

Вибір матеріалу для адитивного виробництва силових вузлів БПЛА базується на пошуку оптимального балансу між фізико-механічними властивостями (міцність, жорсткість, вага) та технологічністю (легкість друку, швидкість, усадка).

У даній роботі як основний конструкційний матеріал обрано композит **Creality Hyper PLA-CF (Рисунок 2)**. Це полілактид (PLA), модифікований додаванням рубаного вуглецевого волокна (Carbon Fiber), оптимізований для високошвидкісного друку.

Для обґрунтування вибору проведено порівняльний аналіз характеристик Nupur PLA-CF із базовим матеріалом PLA (на основі технічної документації виробника). Результати порівняння наведено в Таблиці 1.1.



Рисунок 2. Філамент Creality Hyper PLA-CF

Характеристика (Параметр)	Базовий PLA	Hyper PLA- CF (Обраний матеріал)	Зміна показника	Значення для конструкції дрона
Межа міцності на вигин, МПа	69	103	+49%	Критично важливо для променів, що утримують мотори
Модуль пружності при вигині, МПа	2694	3552	+32%	Забезпечує жорсткість рами, запобігає резонансним вібраціям
Ударна в'язкість, кДж/м²	7	4.1	-41%	Матеріал стає більш крихким (потребує врахування при проектуванні)
Швидкість друку, мм/с	<100	<300	+200%	Дозволяє швидке виготовлення деталей (оперативний ремонт)

Таблиця 1.1 — Порівняльна характеристика фізико-механічних властивостей матеріалів

На основі аналізу даних Таблиці 1.1 можна зробити наступні висновки щодо доцільності використання Hyper PLA-CF:

- 1. Суттєве підвищення жорсткості (+32%):** Показник модуля пружності 3552 МПа є визначальним фактором. Для агродронів жорсткість

конструкції є критичною, оскільки гнучкість променів може призводити до нестабільної роботи польотного контролера (PID-осциляції). Вуглецеві волокна у складі пластику працюють як армуючий каркас, мінімізуючи деформації під навантаженням.

2. **Висока несуча здатність (+49%):** Межа міцності на вигин у 103 МПа дозволяє проектувати вузли з меншою товщиною стінки, зберігаючи здатність витримувати вагу дрона та корисного навантаження. Це відкриває можливості для зниження загальної маси апарату.
3. **Технологічність серії "Hyper":** Можливість друку на швидкостях до 300 мм/с (проти стандартних 50-60 мм/с для звичайних композитів) ідеально відповідає концепції швидкого розгортання ремонтних потужностей у польових умовах.
4. **Аналіз ризиків (Ударна в'язкість):** Зниження ударної в'язкості до 4.1 кДж/м² свідчить про підвищену крихкість матеріалу порівняно з чистим пластиком. Це є типовою властивістю вуглеповнених композитів.
 - *Шлях вирішення проблеми:* Даний недолік компенсується на етапі 3D-моделювання шляхом уникнення гострих кутів (концентраторів напружень), використання округлень (fillets) та топологічної оптимізації конструкції.

Висновок до підрозділу: Матеріал Crealty Hyper PLA-CF за комплексом характеристик (висока питома міцність та жорсткість) є оптимальним вибором для виготовлення жорстких корпусних деталей агродронів, за умови врахування його особливостей при конструкторському проектуванні.

1.3. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ВИРОБНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ (3D-ПРИНТЕР CREALITY K1C)

Виготовлення функціональних деталей агродронів з наповнених композитів висуває підвищені вимоги до адитивного обладнання. Ключовими критеріями вибору 3D-принтера для даного дослідження стали: кінематична стабільність на високих швидкостях, стійкість екструзійної системи до абразиву та здатність підтримувати стабільний мікроклімат.

На основі аналізу ринку доступного обладнання, для виконання експериментальної частини обрано 3D-принтер **Creality K1C**.



Рисунок 3. Принтер Creality K1C

Вибір обумовлений наступними технічними особливостями:

1.3.1. Кінематична схема CoreXY та вібростійкість

На відміну від поширених у бюджетному сегменті принтерів з рухомим столом (т.зв. "bed slingers"), Creality K1C побудований за кінематичною схемою **CoreXY**.

- **Принцип роботи:** Друкувальна голова рухається у площині XY за допомогою системи ременів, а стіл опускається лише по осі Z.
- **Перевага для дослідження:** Оскільки стіл з важкою деталлю не рухається інерційно вперед-назад, це мінімізує вібрації ("ghosting" або "ringing") на поверхні деталі. Це критично важливо для аеродинамічних властивостей променів дрона та щільності укладання шарів композиту.
- **Швидкодія:** Жорстка рама та легка голова дозволяють досягати прискорень до 20 000 мм/с². Це дає можливість реалізувати потенціал матеріалу Hyper PLA-CF, друкуючи на швидкостях 200–300 мм/с без втрати якості, що підтверджує концепцію оперативного ремонту.

1.3.2. Спеціалізована екструзійна система ("Unicorn Nozzle")

Головною проблемою друку вуглеволокном (CF) є його висока абразивність. Стандартні латунні сопла зношуються (збільшується діаметр отвору) вже після друку 0.2–0.5 кг матеріалу, що призводить до браку.

У принтері Creality K1C застосовано інтегровану систему сопла та термобар'єру **"Unicorn nozzle"**, яка має біметалеву структуру:

1. **Термобар'єр (Heatbreak):** Виготовлений з титанового сплаву для мінімізації теплопередачі в зону подачі пластику (preventing heat creep).

2. **Наконечник сопла:** Виготовлений із загартованої сталі.

3. **Перевага:** Це дозволяє друкувати абразивним PLA-CF безперервно протягом сотень годин без втрати точності діаметра екструзії. Суцільнометалева конструкція також усуває ризик протікання пластику між соплом і трубкою.

1.3.3. Direct-екструдер та контроль потоку

Принтер оснащено суцільнометалевим екструдером прямої подачі (Direct Drive), що забезпечує точний контроль ретрактів (втягування пластику при переміщенні). Для композитів, які мають тенденцію до утворення "павутиння" (stringing) через наявність волокон, це дозволяє отримувати чисті деталі, що не потребують значної постобробки.

1.3.4. Закрита камера та допоміжні системи

Наявність закритого корпусу та скляних дверцят забезпечує пасивну термостабілізацію зони друку. Хоча для PLA це менш критично, ніж для ABS, стабільна температура середовища запобігає нерівномірному остиганню тонких стінок складних деталей дрона. Крім того, вбудована камера зі штучним інтелектом (AI Camera) дозволяє автоматично зупинити друк у разі виникнення дефекту ("спагетті"), що економить дорогий матеріал PLA-CF.

Висновок до підрозділу: 3D-принтер Creality K1C повністю відповідає технічним вимогам для роботи з матеріалом Hurep PLA-CF, забезпечуючи необхідну точність, зносостійкість та продуктивність для виготовлення навантажених деталей БПЛА.

1.4. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ТА КОНЦЕПЦІЯ DFAM

Традиційні підходи до проектування деталей (для фрезерування або лиття) часто обмежені технологічними можливостями обладнання, що змушує інженерів використовувати прості геометричні примітиви (пластини, труби, кутники). Це призводить до надмірної маси конструкцій, оскільки матеріал розподіляється не за лініями навантажень, а за контуром заготовки.

Для авіаційних систем, зокрема агродронів, зниження маси є пріоритетним завданням, оскільки кожен зекономлений грам конструкційної маси конвертується у збільшення польотного часу або корисного навантаження. Вирішенням цієї проблеми є застосування концепції **DfAM (Design for Additive Manufacturing)** — проектування для адитивного виробництва, що включає два ключові інструменти: топологічну оптимізацію та використання комірчастих структур.

1.4.1. Топологічна оптимізація (Topological Optimization)

Топологічна оптимізація — це математичний метод, який дозволяє знайти найкращий розподіл матеріалу в заданому об'ємі для об'єкта під дією заданих навантажень.

Процес є ітераційним і базується на методі скінченних елементів (FEM):

1. Задається "дизайнерський простір" (максимальні габарити деталі).
2. Визначаються зони, які не можна змінювати (кріпильні отвори, посадкові місця під підшипники).
3. Прикладаються віртуальні навантаження.

4. Алгоритм аналізує напруження в кожному елементі і **видаляє матеріал** з тих зон, де напруження мінімальні або відсутні.

Результатом є "біонічна" форма, що нагадує кісткові структури або гілки дерев. Така деталь може бути на 30–50% легшою за оригінал при збереженні тієї ж жорсткості. Виготовлення таких форм традиційними методами є надзвичайно дорогим або неможливим, проте для 3D-принтера (зокрема Creality K1C) складність геометрії практично не впливає на вартість виготовлення.

1.4.2. Використання комірчастих структур (Lattices) та гіроїдів

Унікальною перевагою FDM-друку є можливість керування внутрішньою структурою деталі (Infill). Замість суцільного заповнення матеріалом (100% infill), доцільно використовувати 3D-комірчасті структури.

Особливу ефективність демонструють **гіроїдні структури (Gyroids)** — мінімальні поверхні, що не перетинають самі себе.

- **Ізотропність:** Гіроїди забезпечують майже однакову міцність у всіх напрямках, що важливо для дронів, які зазнають різновекторних навантажень.
- **Стійкість до вібрацій:** Комірчаста структура краще розсіює вібраційну енергію, ніж суцільний матеріал, працюючи як пасивний демпфер.
- **Технологічність:** Гіроїдний патерн друкується плавно, без різких зупинок друкувальної головки, що ідеально підходить для високошвидкісного друку на кінематиці CoreXY.

1.4.3. Анізотропія властивостей FDM-деталей

При проектуванні під 3D-друк необхідно враховувати анізотропію — залежність механічних властивостей від напрямку прикладання сили. Деталі, виготовлені методом пошарового наплавлення, мають найменшу міцність на розрив вздовж осі Z (між шарами).

Для композиту PLA-CF цей фактор є особливо важливим, оскільки вуглецеві волокна орієнтуються переважно вздовж лінії руху екструдера (в площині XY), значно посилюючи деталь "вздовж волокон", але майже не впливаючи на міцність між шарами. Тому критично важливим етапом DfAM є правильна орієнтація деталі на робочому столі так, щоб вектори основних навантажень співпадали з напрямком укладання ниток пластику.

Висновки до розділу 1: Проведений аналіз показав, що поєднання сучасного обладнання (Creality K1C), композитних матеріалів (Hyper PLA-CF) та передових методів проектування (топологічна оптимізація) створює технологічну базу для виготовлення високоефективних деталей агродронів. Це дозволяє перейти до практичної частини роботи — проектування та розрахунку конкретного вузла.

РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВУЗЛІВ АГРОДРОНА

2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ

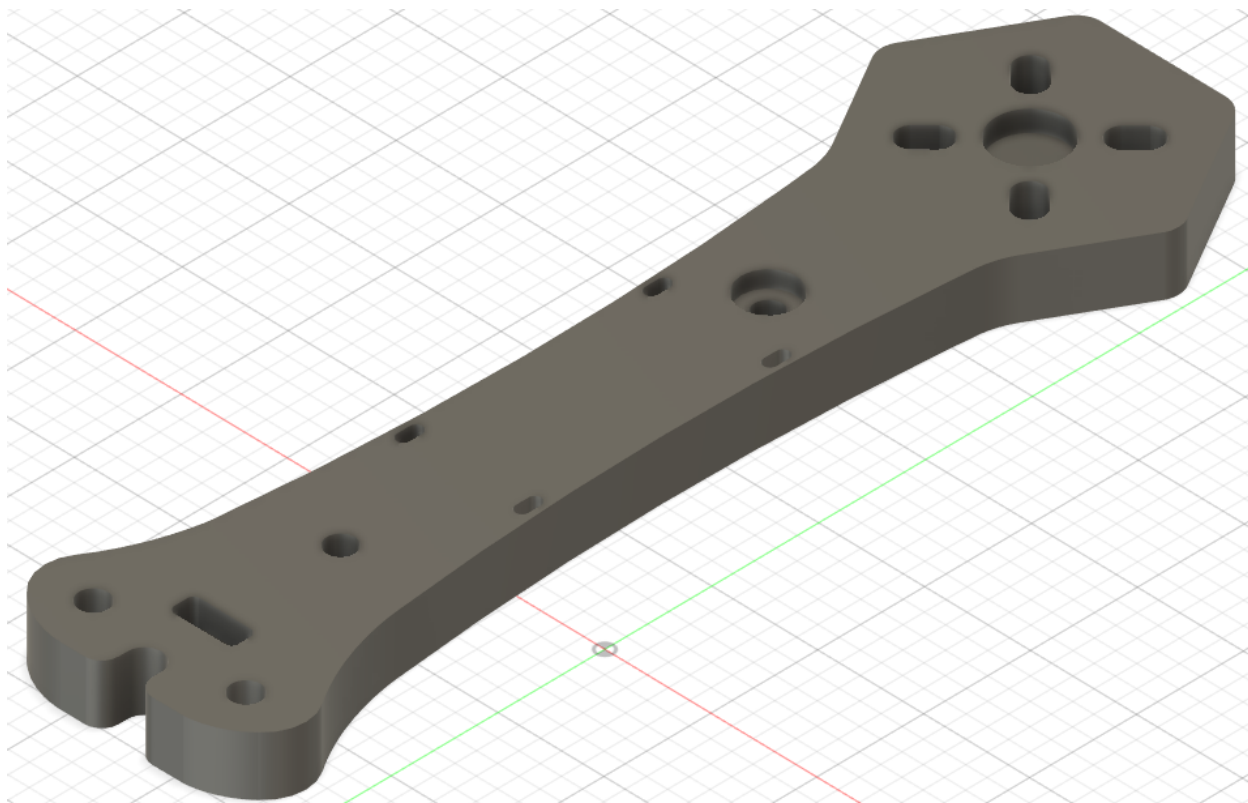


Рисунок 4. 3D-модель промінь квадрокоптера

Основним об'єктом дослідження обрано промінь квадрокоптера (Рисунок 4), який є найбільш навантаженим силовим елементом конструкції. Промінь працює в умовах консольного навантаження, сприймаючи згинальний момент від тяги рушія, а також циклічні вібраційні навантаження.

Для проведення інженерного аналізу у середовищі CAD/CAE системи Autodesk Fusion 360 було підготовлено твердотільну 3D-модель (Solid Body). Оскільки вихідна геометрія була представлена у полігональному форматі (STL), виконано процедуру конвертації сітчастого об'єкта (Mesh) у тверде тіло

(BREP) для забезпечення коректності розрахунків методом скінченних елементів (FEM).

2.1.1. Характеристики матеріалу

Враховуючи специфіку адитивного виробництва, для симуляції було створено бібліотеку анізотропного матеріалу **Crealty Hyper PLA-CF** (полілактид, армований вуглецевим волокном). *Базові фізико-механічні характеристики:*

- Модуль пружності (Young's Modulus): **3.552 ГПа**.
- Межа міцності на вигин (Yield Strength): **103 МПа**.
- Коефіцієнт Пуассона: **0.35**.
- Щільність: **1.24 г/см³**.

2.1.2. Граничні умови (Boundary Conditions)

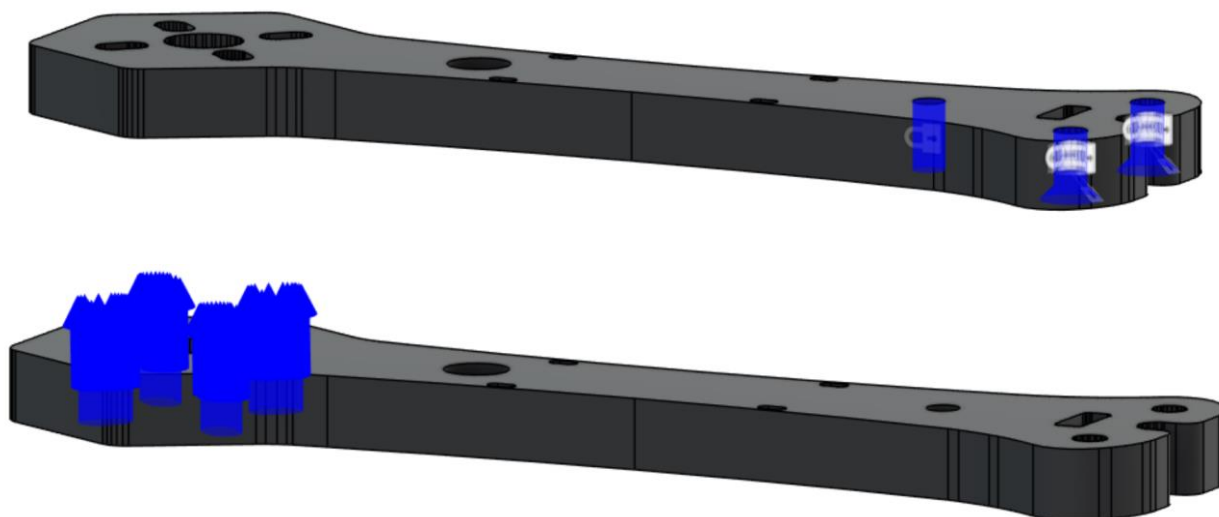


Рисунок 5. Схема навантаження під час тестів

Схема навантаження (Рисунок 5) відповідає режиму максимальної тяги двигуна при різкому маневруванні (зліт або гальмування):

1. **Закріплення (Constraints):** Реалізовано тип «Fixed» (жорстке заземлення) у зоні монтажних отворів кріплення променя до центральної рами дрона.
2. **Навантаження (Loads):** До посадкового місця електродвигуна прикладено розподілену силу $F=100$ Н, вектор якої направлений перпендикулярно до площини обертання пропелерів (вздовж осі Z).

2.2. АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЗОВОЇ МОДЕЛІ

З метою оцінки ефективності початкової (суцільної) конструкції проведено статичний розрахунок (Static Stress Analysis). Повний протокол випробувань та детальні карти розподілу напружень наведено у Додатку А.

2.2.1. Аналіз запасу міцності (Safety Factor)

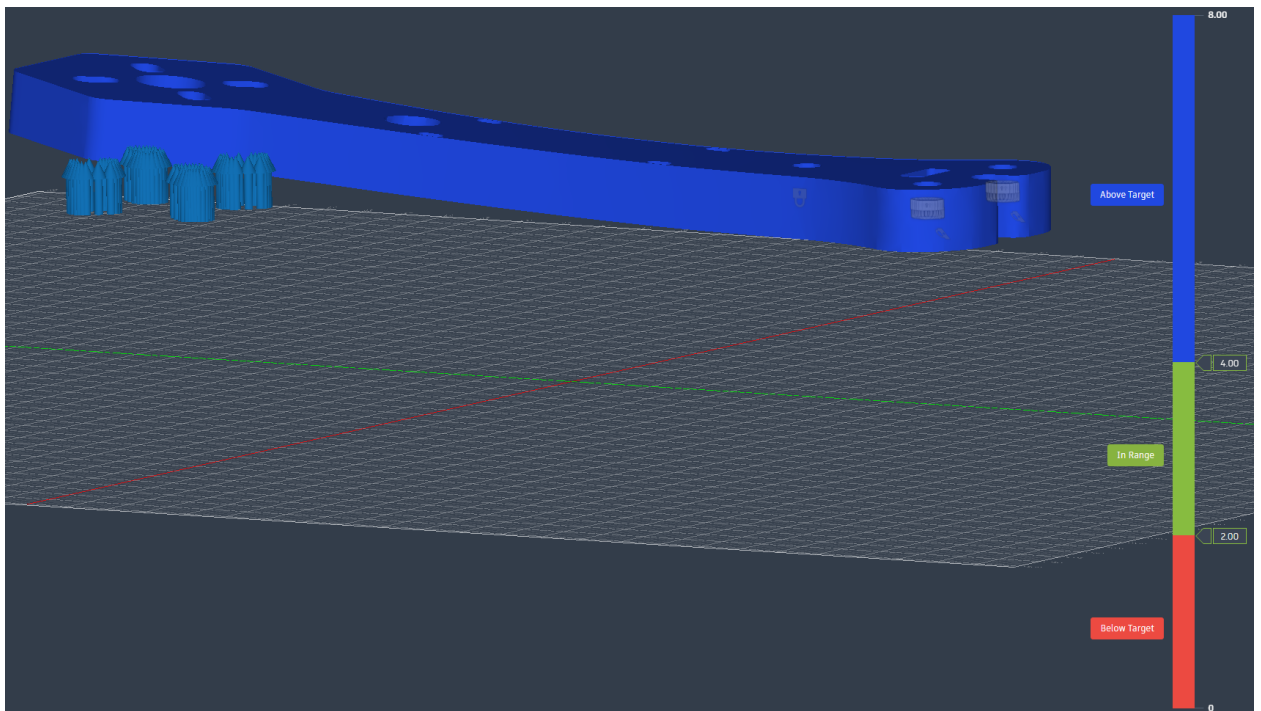


Рисунок 6. Візуалізація запасу міцності

За результатами розрахунку (див. Додаток А, п. 5), мінімальний коефіцієнт запасу міцності базової моделі становить **90.91** (Рисунок 6).

Аналіз: Отримане значення майже в 60 разів перевищує рекомендований інженерний мінімум ($SF \approx 1.5 \dots 2.0$). Такий надвисокий показник свідчить про значну **надлишковість конструкції**.

Матеріал використовується вкрай неефективно: абсолютна більшість об'єму деталі є «баластом», що збільшує злітну масу агродрона і зменшує час

польоту. Це є прямим обґрунтуванням необхідності проведення топологічної оптимізації.

2.2.2. Аналіз напружень (Von Mises Stress)

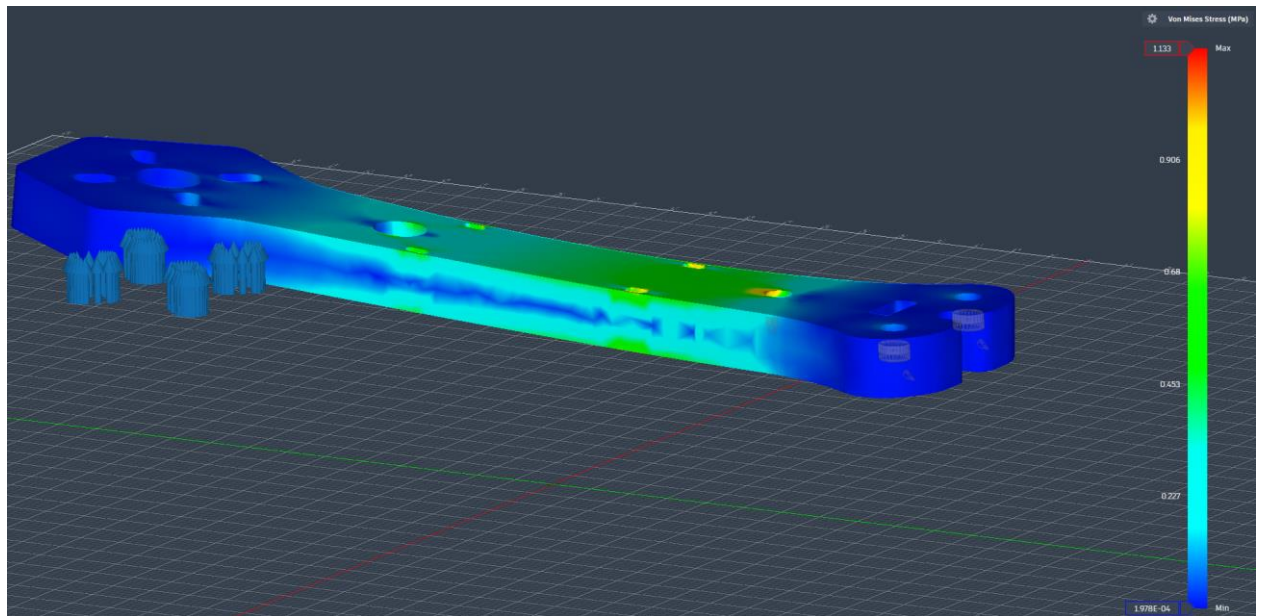


Рисунок 7. Максимальні еквівалентні напруження за фон Мізесом

Максимальні еквівалентні напруження за фон Мізесом (Рисунок 7) у конструкції становлять **1.133 МПа**. *Аналіз:* У порівнянні з межею міцності матеріалу PLA-CF (103 МПа), деталь навантажена лише на **1.1%** від своєї несучої здатності. Відсутність зон концентрації напружень дозволяє значно зменшити площу поперечного перерізу променя без ризику руйнування.

2.2.3. Аналіз жорсткості (Displacement)

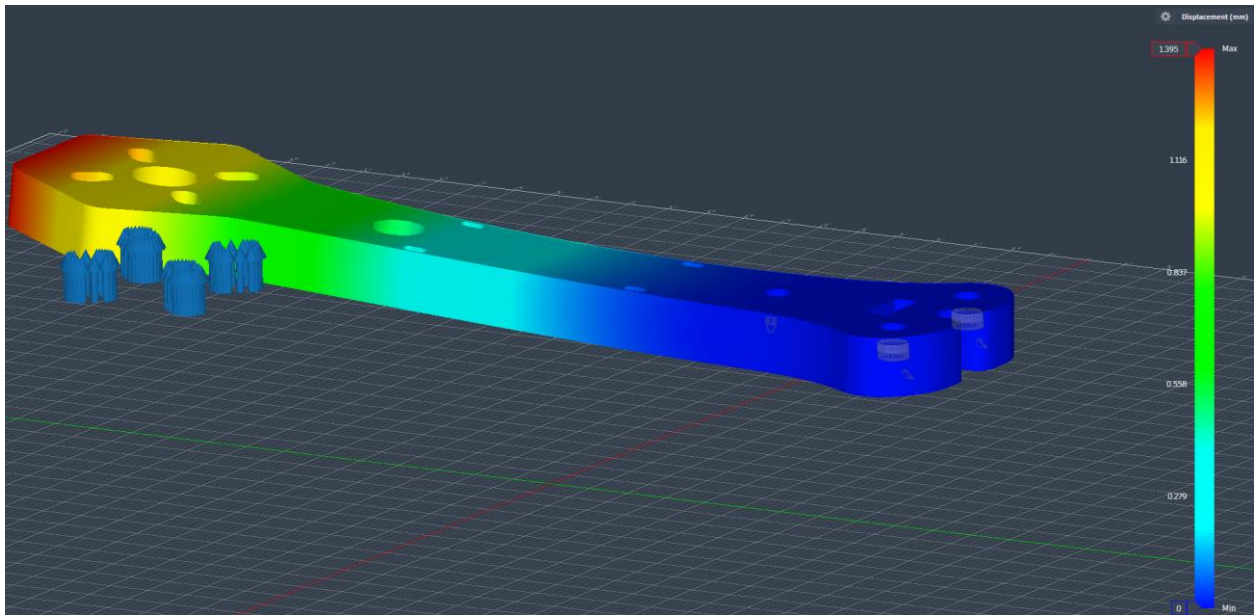


Рисунок 8. Результати аналізу жорсткості

Максимальне переміщення вільного кінця променя (Рисунок 8) становить **1.395 мм**. *Аналіз:* Цей параметр характеризує загальну жорсткість системи. При проектуванні оптимізованої моделі необхідно контролювати, щоб величина прогину не зроста критично, оскільки це може призвести до виникнення небажаних вібрацій.

2.3. ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ (SHAPE OPTIMIZATION)

На основі висновків пункту 2.2, було прийнято рішення застосувати метод топологічної оптимізації для видалення матеріалу, що не бере участі у силовій роботі конструкції.

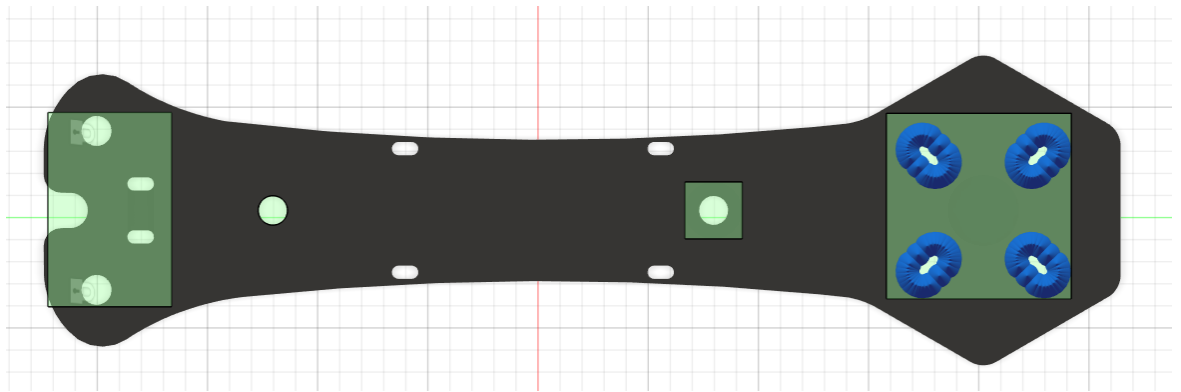


Рисунок 9. Параметри розрахунку оптимізації

Параметри розрахунку оптимізації (Рисунок 9):

1. **Цільова функція (Target Mass):** Зменшення маси до 60% від початкової.
2. **Зони збереження (Preserve Regions):** Для забезпечення можливості монтажу, навколо всіх кріпильних отворів задано захисні зони радіусом 3 мм, які виключені з процесу видалення матеріалу.
3. **Симетрія:** Для забезпечення аеродинамічного балансу та естетичного вигляду використано площину симетрії вздовж поздовжньої осі променя.

Результатом розрахунку стала полігональна карта розподілу навантажень (Рисунок 10). На її основі згенеровано нову модель променя, що має комірчасту структуру. Отримана геометрія була конвертована у тверде

тіло методом фасеткової тріангуляції (Faceted Solid Body) для подальшої валідації.

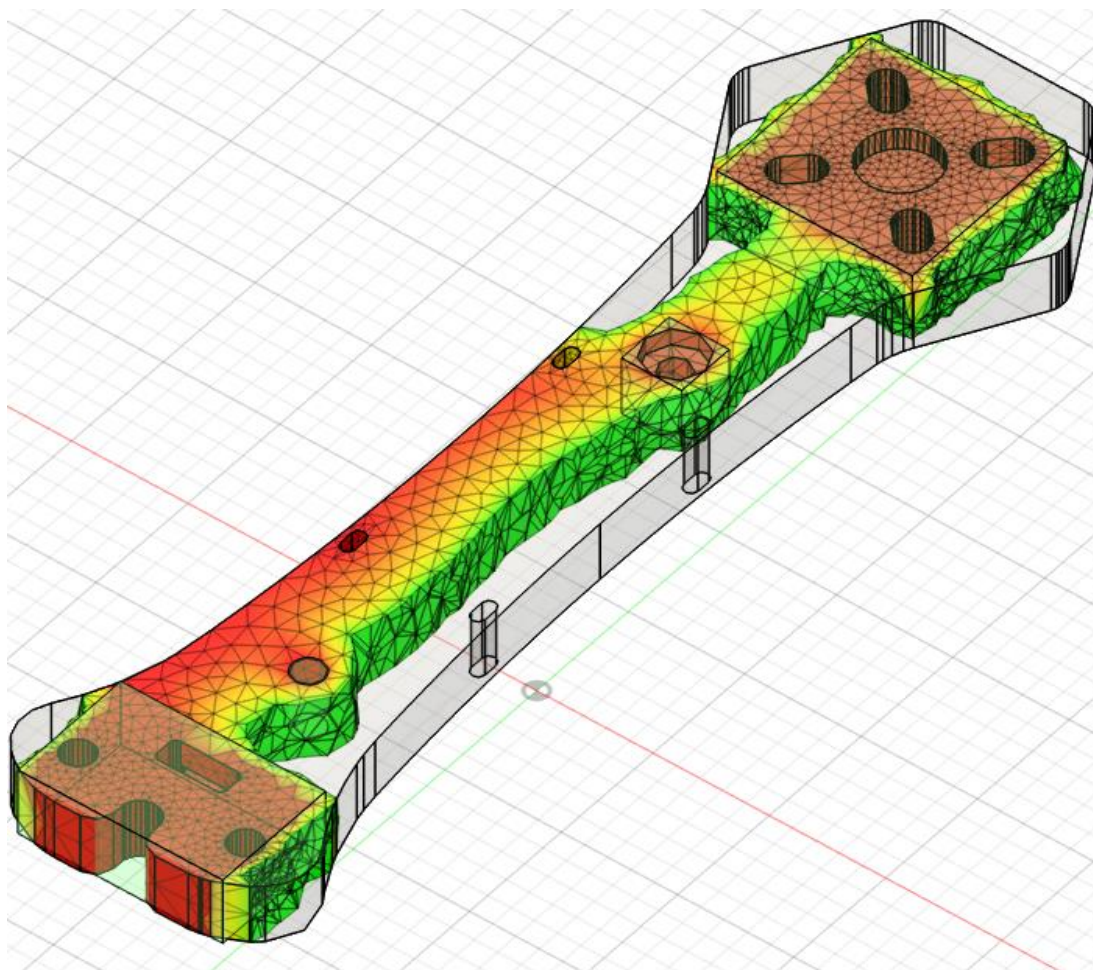


Рисунок 10. Полігональна карта розподілу навантажень

2.4. ВАЛІДАЦІЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ МОДЕЛІ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Спроектowana оптимізована деталь (Рисунок 11) була піддана контрольному статичному аналізу (Verification Study) для перевірки її надійності після видалення матеріалу. Граничні умови та навантаження ($F=100\text{ Н}$) повністю відповідають пункту 2.1.2. Повний звіт про валідацію наведено у Додатку В.



Рисунок 11. Спроектowana оптимізована деталь

2.4.1. Аналіз ефективності зменшення маси

В результаті топологічної оптимізації маса деталі знизилася з **20.10 г** до **13.58 г**.

- **Аналіз:** Економія матеріалу склала **32.4%** (6.52 г на одному промені). Для квадрокоптера, що складається з 4-х променів, загальна економія

ваги становить **26.1** г, що прямо пропорційно збільшує енергоефективність та час польоту.

2.4.2. Аналіз запасу міцності оптимізованої конструкції

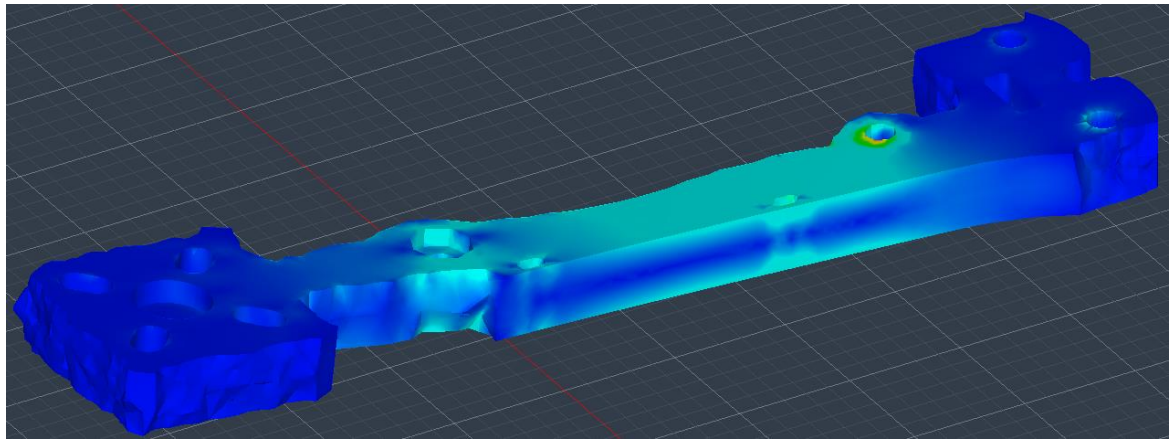


Рисунок 12. Карта запасу міцності оптимізованої деталі

Мінімальний коефіцієнт запасу міцності становить **36.00** (Рисунок 12).

- **Аналіз:** Запас міцності знизився порівняно з базовою моделлю ($90.91 \rightarrow 36.00$), що є закономірним наслідком зменшення площі перерізу. Проте, отримане значення все ще значно перевищує поріг експлуатаційної безпеки ($SF > 1.5$), що гарантує цілісність конструкції при пікових навантаженнях.

2.4.3. Аналіз напружень та деформацій

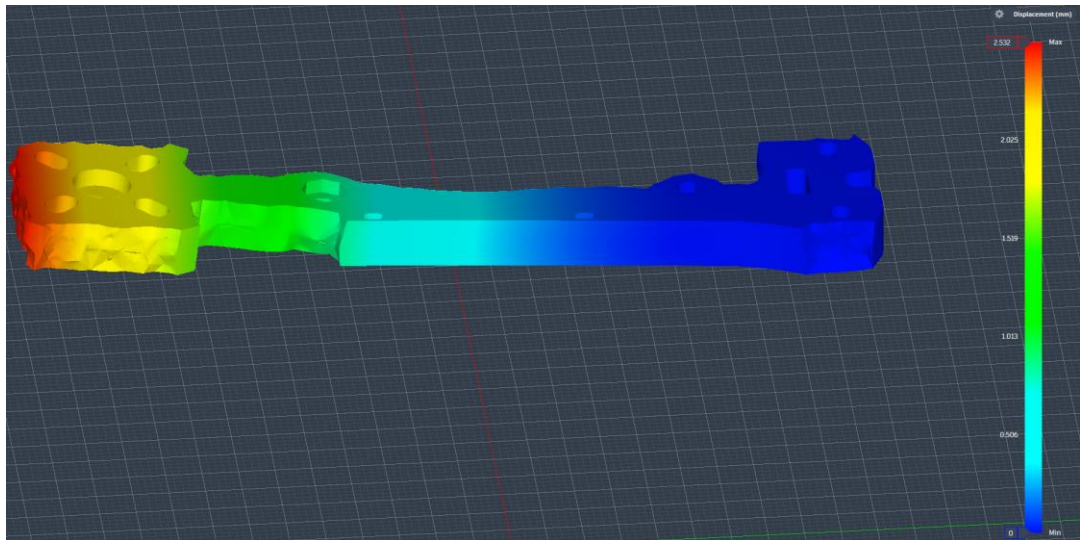


Рисунок 13. Карта переміщень (Displacement) оптимізованої деталі

Максимальні напруження у вузлах решітки становлять **2.86 МПа**, що значно менше межі міцності матеріалу (103 МПа). Максимальне переміщення склало **2.532 мм** (Рисунок 13).

- **Аналіз:** Прогин збільшився на 1.14 мм порівняно з суцільною деталлю (1.40 мм → 2.53 мм). Така величина пружної деформації є допустимою для композитного матеріалу і не призведе до виникнення резонансних явищ.

Висновки до Розділу 2

1. Розроблено методику проектування та полегшення силових вузлів агродрона засобами CAD/CAE системи Autodesk Fusion 360.
2. Доведено, що базова геометрія променя має значну надлишкову вагу та невиправдано високий запас міцності (~90).
3. Застосування топологічної оптимізації (Shape Optimization) дозволило зменшити масу деталі на **32.4%** при збереженні функціональних характеристик.

4. Валідаційний розрахунок підтвердив, що оптимізована комірчаста конструкція з матеріалу Creality Hyper PLA-CF витримує розрахункове навантаження 100 Н із гарантованим запасом міцності **36.0**.

Параметр	Початкова модель	Оптимізована модель	Ефект
Маса, г	20.10	13.58	-32.4%
Safety Factor	90.91	36.00	Оптимізовано
Max Displacement, мм	1.40	2.53	Допустимо

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ОПТИМІЗОВАНОЇ ДЕТАЛІ

3.1. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛІВ

Для реалізації фізичної моделі спроектованого променя обрано метод пошарового наплавлення (FDM/FFF). В якості виробничого обладнання використано високошвидкісний 3D-принтер **Creality K1C**.

Вибір обладнання зумовлений наступними факторами:

1. **Кінематика CoreXY:** Забезпечує високу швидкість друку (до 600 мм/с) без втрати точності, що критично важливо для серійного виробництва деталей дронів.
2. **Закрита камера:** Забезпечує стабільний температурний режим, мінімізуючи ризик термоусадки та деформації деталі.
3. **Екструдер Direct Drive:** Дозволяє точно контролювати подачу матеріалу.
4. **Зносостійке сопло:** Принтер оснащено соплом із загартованої сталі, що є обов'язковою умовою для друку абразивними композитними матеріалами (Carbon Fiber).

Матеріал: Використовується філамент **Creality Hyper PLA-CF** (полілактид з домішками карбонового волокна). Карбонове волокно підвищує жорсткість на вигин та зносостійкість деталі, а також забезпечує привабливу матову текстуру, що приховує шаруватість друку.

3.2. ПІДГОТОВКА КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ (CAM) В ORCASLICER

Підготовка цифрової моделі до виробництва (слайсінг) виконувалась у програмному середовищі **OrcaSlicer**.

3.2.1. Вибір орієнтації моделі

Деталь розміщена на робочому столі горизонтально («плазом»), вздовж найбільшої площини.

- **Обґрунтування:** FDM-друк створює анізотропні деталі, які мають найменшу міцність на розрив між шарами (вісь Z). Оскільки промінь дрона працює на вигин, горизонтальне розміщення дозволяє розташувати шари вздовж вектора навантаження, забезпечуючи максимальну механічну міцність конструкції.

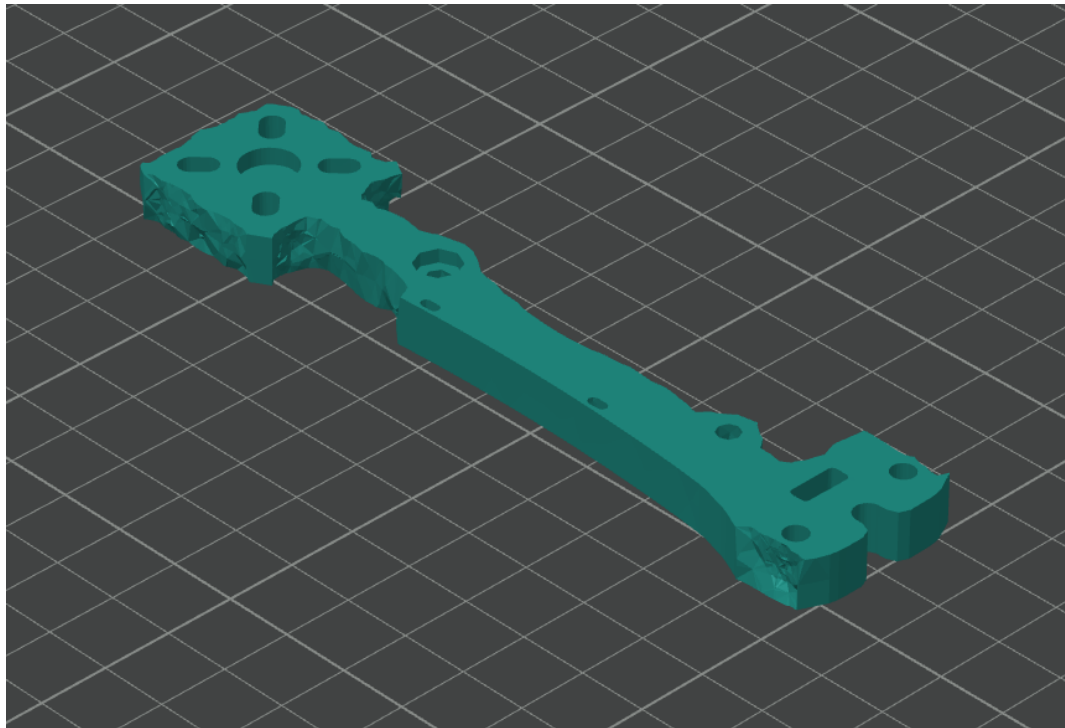


Рисунок 14. Орієнтація деталі на віртуальному робочому столі OrcaSlicer

3.2.2. Налаштування параметрів слайсингу

Для забезпечення монолітності та максимальної міцності деталі обрано стратегію «суцільного друку».

- **Висота шару (Layer Height):** 0.2 мм. Це оптимальний баланс між деталізацією геометрії та часом виготовлення.
- **Периметри (Wall Loops):** 3 лінії. Формують жорстку зовнішню оболонку.
- **Заповнення (Infill):** 100% (Solid). Внутрішній простір деталі повністю заповнюється пластиком. Це виключає наявність порожнин, роблячи деталь максимально стійкою до ударних навантажень.
- **Підтримки (Supports):** Відключені. Геометрія оптимізованої деталі спроектована таким чином, що кути нависання не перевищують критичних значень (45°), або перекриваються містками (bridging). Це економить матеріал і час на постобробку.

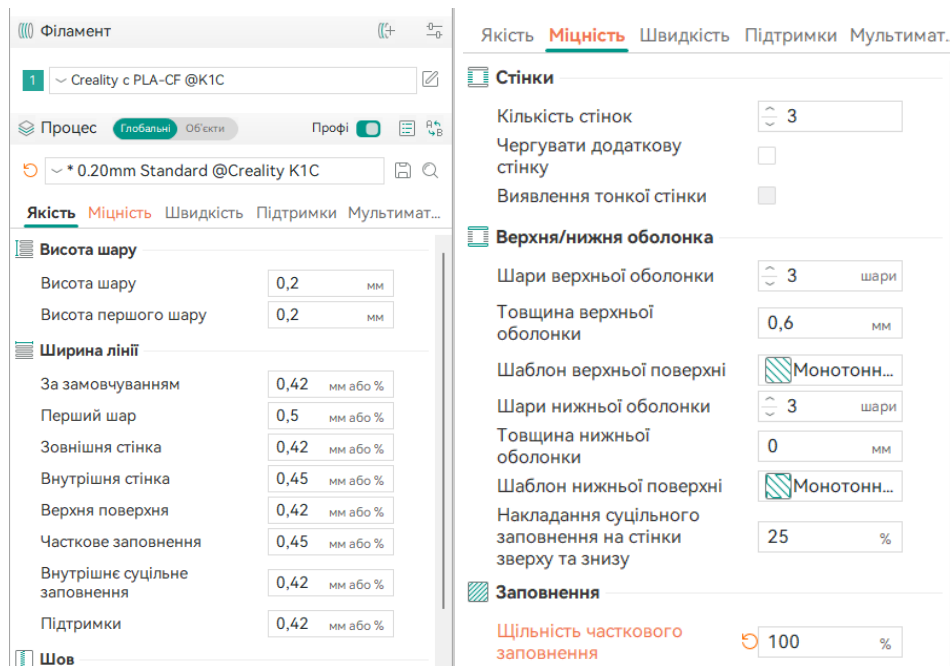


Рисунок 15. Параметри налаштування процесу друку

3.3. РЕЖИМИ ДРУКУ ТА ВИРОБНИЧИЙ ПРОЦЕС

На основі рекомендацій виробника матеріалу та проведених тестових друків, встановлено наступні температурно-швидкісні режими для PLA-CF:

Параметр	Значення	Примітка
Температура сопла	220 °C	Забезпечує якісне спікання шарів
Температура столу	60 °C	Для надійної адгезії першого шару
Швидкість друку	300 мм/с	Режим високої продуктивності
Охолодження	100%	Активне охолодження для чіткості геометрії

Процес друку починається з автоматичного калібрування рівня столу (Auto-leveling). Після завершення друку деталь охолоджується до кімнатної температури для легкого від'єднання від PEI-пластини.

3.4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ

Для оцінки економічної доцільності впровадження оптимізованої деталі проведено порівняльний розрахунок собівартості та часу виготовлення. Розрахунок базується на ринковій вартості матеріалу Crealty Hyper PLA-CF: **1000 грн/кг** (або 1.0 грн за 1 грам).

Дані симуляції друку (G-code analytics):

1. Початкова (суцільна) модель:

- Витрата матеріалу: 20.10 г (6.74 м).
- Час друку: 40 хв 05 с.

- Вартість матеріалу: $20.10 \times 1.0 = 20.10$ грн.

2. Оптимізована модель:

- Витрата матеріалу: 13.58 г (4.55 м).
- Час друку: 37 хв 08 с.
- Вартість матеріалу: $13.58 \times 1.0 = 13.58$ грн.

Таблиця 3.1. Порівняльна характеристика ефективності виготовлення

Показник	Базова модель	Оптимізована модель	Економія (на 1 шт)	Економія на дрон (4 шт)
Вага деталі, г	20.10	13.58	6.52 г	26.08 г
Собівартість, грн	20.10	13.58	6.52 грн	26.08 грн
Час друку, хв:с	40:05	37:08	~ 3 хв	~ 12 хв

Колірна схема

Тип лінії

Тип лінії	Час	Відсоток	Філамент, що використовується	Відбувся
Внутрішня стінка	11m23s	30,7%	1,13 m 3,37 g	
Зовнішня стінка	6m21s	17,1%	0,53 m 1,60 g	
Нависаюча стінка	<1s	<0.1%	0,00 m 0,00 g	
Внутрішнє суцільне заповнення	13m53s	37,4%	2,70 m 8,06 g	
Верхня поверхня	40s	1,8%	0,12 m 0,34 g	
Нижня поверхня	1m5s	2,9%	0,07 m 0,20 g	
Переміщення	3m44s	10,1%		
Втягування				
подача				
Протирання				
Шви				

Загальна оцінка

Загальний філамент:

4,55 m 13,58 g

Філамент моделі:

4,55 m 13,58 g

Витрата:

0,41

Час підготовки:

1s

Час друку моделі:

37m8s

Загальний час:

37m9s

Рисунок 16. Результати попереднього перегляду друку (Preview)

Висновки до Розділу 3

1. Розроблено технологічний процес виготовлення силового променя методом FDM-друку на принтері Creality K1C.
2. Використання 100% заповнення та горизонтальної орієнтації забезпечує необхідні механічні властивості виробу.
3. Застосування топологічної оптимізації дозволило знизити собівартість виготовлення одного комплекту променів (4 шт.) на **26.08 грн** та зменшити загальну польотну масу на **26.08 г**.
4. Зменшення часу друку на 7% дозволяє підвищити продуктивність при серійному виготовленні деталей.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. АНАЛІЗ ШКІДЛИВИХ ТА НЕБЕЗПЕЧНИХ ВИРОБНИЧИХ ФАКТОРІВ

Розробка та виготовлення деталей агродрона передбачає виконання робіт двох типів: інженерне проектування на ПЕОМ (робота з CAD-системами) та експлуатація адитивного обладнання (3D-принтер Creality K1C).

Відповідно до ГОСТ 12.0.003-74, при виконанні даної роботи можуть виникати наступні небезпечні та шкідливі фактори:

1. Фізичні фактори:

- **Підвищена температура поверхонь обладнання:** Робоча температура сопла 3D-принтера досягає 220–300 °С, температура платформи — до 100 °С. Контакт із нагрітими частинами може призвести до термічних опіків.
- **Рухомі частини машин:** 3D-принтер має кінематичну схему CoreXY з високошвидкісним переміщенням друкуючої голови (до 600 мм/с).
- **Електричний струм:** Обладнання живиться від мережі змінного струму напругою 220 В. Замикання може призвести до ураження електричним струмом.
- **Шум:** Робота вентиляторів охолодження та крокових двигунів створює акустичне навантаження (рівень шуму до 65 дБ).

2. Хімічні фактори:

- При нагріванні термопластиків (PLA, PLA-CF) можливе виділення у повітря робочої зони летких органічних сполук та ультрадисперсних частинок (UFP). Наявність карбонового волокна у складі пластику вимагає підвищеної уваги до системи вентиляції.

3. Психофізіологічні фактори:

- Зорове напруження при роботі з дрібними деталями інтерфейсу програм та налаштуванні 3D-принтера.

4.2. ЗАХОДИ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ

Експлуатація 3D-принтера та комп'ютерної техніки відноситься до експлуатації електроустановок до 1000 В. Згідно з ПУЕ (Правила улаштування електроустановок), обладнання повинно відповідати наступним вимогам:

1. **Клас захисту:** Принтер Creality K1C відноситься до обладнання I класу захисту (має робочу ізоляцію та елемент для заземлення).
2. **Заземлення:** Корпус приладу повинен бути приєднаний до захисного провідника (РЕ) електромережі через євро-розетку із заземлюючим контактом. Опір заземлюючого пристрою не повинен перевищувати 4 Ом.
3. **Захист від перевантажень:** Лінія живлення повинна бути обладнана автоматичним вимикачем та пристроєм захисного відключення (ПЗВ) зі струмом витоку не більше 30 мА.
4. **Організаційні заходи:** Забороняється проводити ремонтні роботи (заміна сопла, чистка екструдера) при ввімкненому в мережу обладнанні.

4.3. ВИМОГИ ДО МІКРОКЛІМАТУ ТА ВЕНТИЛЯЦІЇ

Для забезпечення безпечних умов праці та стабільності технологічного процесу друку, приміщення повинно відповідати нормам ДСН 3.3.6.042-99.

- **Температура повітря:** Оптимальний діапазон 22–24 °С.
- **Вологість:** 40–60%. Занадто висока вологість може погіршити якість пластику (гігроскопічність PLA-CF), занадто низька — призвести до накопичення статичної електрики.

Система вентиляції: Оскільки використовується композитний матеріал PLA-CF, приміщення має бути обладнане припливно-витяжною вентиляцією. 3D-принтер Creality K1C оснащений закритою камерою та вбудованим вугільним фільтром, що значно знижує викиди шкідливих речовин у повітря робочої зони. Проте, після завершення друку рекомендується не відкривати камеру протягом 5-10 хвилин для осадження мікрочастинок.

4.4. ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007, приміщення лабораторії адитивних технологій відноситься до категорії «В» (пожежонебезпечна).

Основні джерела пожежної небезпеки:

- Нагрівальні елементи 3D-принтера.
- Легкозаймисті матеріали (пластикові нитки).
- Електропроводка.

Заходи протипожежної безпеки:

1. Принтер повинен бути встановлений на негорючій поверхні (стіл з металевим або текстолітовим покриттям).

2. Забороняється залишати працюючий принтер без нагляду на тривалий час (наприклад, на ніч) без наявності автоматичних систем пожежогасіння або віддаленого моніторингу (камера + Smart Plug).
3. Приміщення повинно бути укомплектоване первинними засобами пожежогасіння: вуглекислотним вогнегасником типу ВВК-2 або ВВК-3, який дозволяє гасити електроустановки під напругою без пошкодження електроніки.

Висновки до Розділу 4

1. Проведено аналіз потенційно небезпечних факторів при виготовленні деталей дрона методом 3D-друку. Основними факторами ризику є термічні опіки та ураження електричним струмом.
2. Встановлено, що використання принтера із закритою камерою (Creality K1C) та вбудованою фільтрацією повітря мінімізує вплив шкідливих викидів при плавленні пластику PLA-CF.
3. Розроблені заходи з електробезпеки та пожежної безпеки дозволяють забезпечити безпечні умови праці під час виконання магістерської роботи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення вагової досконалості несучих систем агродронів шляхом застосування методів топологічної оптимізації та адитивних технологій.

Основні результати роботи:

1. **Проведено аналіз** сучасних конструкцій безпілотних літальних апаратів та матеріалів для їх виготовлення. Встановлено, що використання FDM-друку композитними матеріалами (зокрема PLA, армованим карбоном) є економічно вигідною альтернативою традиційним методам лиття або фрезерування, дозволяючи виготовляти деталі складної геометричної форми.
2. **Створено параметричну 3D-модель** силового променя квадрокоптера та проведено комп'ютерне моделювання його напружено-деформованого стану в середовищі Autodesk Fusion 360. Виявлено, що базова конструкція має надлишковий запас міцності (Safety Factor > 90), що свідчить про неефективне використання матеріалу.
3. **Виконано топологічну оптимізацію** (Shape Optimization) конструкції. На основі розрахункових даних видалено 32.4% матеріалу, що не брав участі у розподілі силових навантажень. В результаті отримано полегшену комірчасту структуру, адаптовану для виготовлення методом 3D-друку.
4. **Доведено надійність** розробленої деталі. Валідаційний статичний аналіз показав, що при збереженні експлуатаційного навантаження 100 Н, оптимізований промінь має коефіцієнт запасу міцності **36.0**, а максимальні напруження (2.86 МПа) не перевищують 3% від межі міцності матеріалу Crealty Hyper PLA-CF.

5. **Розроблено технологічний процес** виготовлення деталі на високошвидкісному 3D-принтері Creality K1C. Визначено оптимальні параметри слайсингу в середовищі OrcaSlicer: висота шару 0.2 мм, 100% заповнення, горизонтальна орієнтація. Це забезпечує максимальну міцність виробу на вигин.
6. **Підтверджено техніко-економічну ефективність** проекту. Впровадження оптимізованої деталі дозволило зменшити вагу одного променя з **20.10 г** до **13.58 г**. Сумарна економія маси для квадрокоптера становить **26.1 г**, що позитивно впливає на льотні характеристики та зменшує собівартість виготовлення корпусу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ISO 527-1:2019. **Пластмаси. Визначення механічних властивостей при розтягу.** Женева: International Organization for Standardization, 2019.
2. ASTM D638-14. **Стандартний метод випробування пластмас на розтяг.** West Conshohocken: ASTM International, 2014.
3. ASTM F2792-12a. **Стандартна термінологія адитивних технологій виробництва.** West Conshohocken: ASTM International, 2012.
4. ДСТУ ISO/ASTM 52900:2021. **Адитивне виробництво. Загальні принципи. Терміни та визначення.** Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021.
5. ДСТУ ISO 17296-2:2021. **Адитивне виробництво. Загальні принципи. Огляд процесів та категорій.** Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021.
6. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. **Адитивні технології виробництва: 3D-друк, швидке прототипування та цифрове виготовлення.** Нью-Йорк: Springer, 2021.
7. Ashby M. **Вибір матеріалів у машинобудуванні.** 5-те вид. Оксфорд: Butterworth-Heinemann, 2017.
8. Bendsøe M. P., Sigmund O. **Топологічна оптимізація: теорія, методи та застосування.** Берлін: Springer, 2003.
9. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. **Метод скінченних елементів: основи та фундаментальні положення.** Оксфорд: Elsevier, 2013.
10. Liu J., Ma Y. **Огляд методів топологічної оптимізації, орієнтованих на виробництво.** *Advances in Engineering Software*. 2016. Т. 100. С. 161–175.

11. Zhang X., Zhu B., Zhang Y. **Топологічна оптимізація для адитивного виробництва: огляд.** *Journal of Manufacturing Systems*. 2018. Т. 48. С. 1–15.
12. Guessasma S., Zhang W. **Механічна поведінка 3D-друкованих виробів з PLA, армованого вуглецевим волокном.** *Materials & Design*. 2020. Т. 187. Ст. 108384.
13. Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T. Q., Hui D. **Адитивне виробництво (3D-друк): матеріали, методи, застосування та виклики.** *Composites Part B: Engineering*. 2018. Т. 143. С. 172–196.
14. Watts A. C., Ambrosia V. G., Hinkley E. A. **Безпілотні авіаційні системи в дистанційному зондуванні та наукових дослідженнях.** *Remote Sensing*. 2012. Т. 4(6). С. 1671–1692.
15. Zhang C., Kovacs J. M. **Застосування малих безпілотних літальних апаратів у точному землеробстві.** *Precision Agriculture*. 2012. Т. 13. С. 693–712.
16. FAO. **Дрони в сільському господарстві: можливості та виклики.** Рим: Продовольча та сільськогосподарська організація ООН, 2018.
17. Кузьмін В. В., Петренко О. М. **Адитивні технології в машинобудуванні.** Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.
18. Мельник О. П. **Основи методу скінченних елементів у прикладних інженерних задачах.** Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019.
19. Autodesk. **Autodesk Fusion 360. Офіційна документація.** Режим доступу: <https://help.autodesk.com/view/fusion360> (дата звернення: 2025).
20. Polymaker. **Технічні характеристики філаменту PLA-CF.** Режим доступу: <https://polymaker.com> (дата звернення: 2025).