

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

на дисертаційну роботу Сіренко Максима Костянтиновича  
«Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу  
виробів з полімерних композиційних матеріалів  
для авіаційної та ракетно-космічної техніки»,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
в галузі знань 13 Механічна інженерія  
за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Дисертаційну роботу присвячено розробці нових конструктивних і технологічних рішень, які забезпечують підвищення механічних та експлуатаційних властивостей виробів з полімерних композиційних матеріалів, що отримано з використанням методів 3D-друку.

### **Ступінь актуальності обраної теми**

Оскільки вироби РКТ випускаються малими партіями або одиничними екземплярами, застосування технології 3Д друку, яка не потребує спеціального коштовного оснащення, є перспективним і економічно ефективним в цієсфері виробництва. Пошаровий синтез дозволяє виготовляти вироби більш складної геометрії та форм, отриманих в результаті оптимізації топології, і суттєво зменшити потребу у обробці, бо виріб виготовляється методами синтезу вже в готовому вигляді з набагато меншим об'ємом операцій подальшої обробки. Також, оскільки методи пошарового синтезу є адитивним виробництвом, коефіцієнт використання матеріалу набагато вищий.

На сьогодні, як справедливо зауважує автор дисертаційного дослідження, в сфері авіаційної та ракетно-космічної техніки існує проблематика підвищення експлуатаційних характеристик деталей та виробів, що отримні методами пошарового синтезу, для покращення масової довершеності конструкції.

Актуальність обраної теми визначається вдосконаленням технологій пошарового синтезу полімерних матеріалів за рахунок використання наповнювача з більш високими параметрами міцності для підвищення експлуатаційних характеристик виробів та покращення масової досконалості. Отримані полімерні композиційні матеріали мають вищі характеристики в порівнянні з базовим полімером. Найбільший приріст експлуатаційних характеристик та коефіцієнту масової досконалості виробів може бути досягнутий поєднанням використання полімерних композиційних матеріалів з виготовленням деталей методами пошарового синтезу.

Вирішення сформульованого завдання має комплексний характер, так як пов'язане з застосуванням сукупності конструктивно-технологічних рішень, направлених на створення полімерно-композиційного матеріалу в процесі пошарового синтезу виробу, що дозволяє суттєво підвищити приріст експлуатаційних характеристик та коефіцієнту масової досконалості виробів.

Таким чином, обрана здобувачем тема дисертаційної роботи є актуальною, вона має суттєву значущість для вирішення важливої науково-технічної задачі у галузі ракетно-космічної техніки і повністю відповідає спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

### **Структура роботи.**

Дисертаційна робота містить вступ, 4 розділи, що складаються з 16 підрозділів, основні висновки та список використаних джерел.

У **вступі** відзначено актуальність теми дисертації та сформульовано її мету та основні завдання досліджень. Розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень і описано наукову новизну та практичне значення здобутих результатів. Надано інформацію щодо апробації результатів роботи та кількості публікацій по зазначеній темі із посиланням на внесок автора. Представлено структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих технологій пошарового синтезу деталей з полімерних матеріалів та з полімерних композиційних матеріалів, розглянуті та проаналізовані основні матеріали, які використовуються. Окрема увага була приділена аспектам застосування цих технологій та методів в авіаційній та ракетно-космічній техніці. В ході аналізу були встановлені основні недоліки, над усуненням яких необхідно працювати. За основні недоліки було прийнято недотримання суцільності волокна армування, неможливість точного та вибіркового контролю положення волокна у межах шару, а також недостатня прогнозованість кінцевих характеристик.

У **другому розділі** розглянуто матеріали, що використовувались для дослідження, обґрунтовано вибір основного полімерного матеріалу та матеріалу армування. У якості основного полімеру був прийнятий сополімер поліетилентерефталату (соPET), у якості армуючого волокна – базальтове волокно. Обґрунтовано критерії, по яким розроблюється нова структура армування та розроблено структуру нового типу армування деталей в процесі FDM/FFF 3D-друку з метою отримання деталей з полімерного композиційного матеріалу. Розроблена структура являє собою пошарово прокладене волокно між шарів друкованого основного полімеру, причому розрізів чи інших порушень суцільності в межі шару немає. Також, завдяки відсутності розрізів при переході волокна між шарами, зберігається і суцільність волокна між шарами. Розглядаючи одиничне волокно, його суцільність не порушується в всьому об'ємі деталі. Крім цього, були розглянуті методи дослідження та контролю. В контексті можливості та особливостей використання до виробів, виготовлених 3D-друком, була проаналізована низка видів неруйнівного та руйнівного контролю та випробувань. Також був розглянутий аспект їх використання при наявності неперервного волокна армування в основному полімері. Як той вид, що буде використаний в роботі, було прийняте дослідження міцності шляхом випробувань на розтяг.

**Третій розділ** присвячено розробленню технологічного обладнання для встановлення на FDM/FFF 3D-принтер з кінематикою Delta. Ця кінематика також була обрана відповідно до проведеного аналізу. Обладнання являє собою вузли, що встановлюються на платформу побудови 3D-принтеру та виконують функції утримання, направлення та контролю положення і натягу волокна. Обладнання дозволяє виконувати однонаправлене армування полімеру в процесі друку. Як завдання для випробувань, було заплановано проведення аналізу впливу частоти прокладання шару армуючого волокна на характеристики міцності матеріалу та аналіз впливу щільності заповнення на них. Відповідно, за допомогою обладнання було виготовлено партії зразків з полімерного композиційного матеріалу та були проведені випробування зразків. По результатам, межа міцності зросла, в варіанті армування з найкращими результатами, на 80%, модуль пружності – на 101%. Також була встановлена залежність міцносних властивостей зразків та матеріалу від частоти прокладання волокна, і це є основний і найбільш впливовий чинник впливу на властивості.

**Четвертий розділ** присвячено підтвердженню результатів випробувань на реальній деталі відповідно до її умов експлуатації. Модель деталі складної форми було розроблено засобами CAD програмного забезпечення Solidworks. За допомогою CAE модулю цієї програми до деталі було накладено матеріал з характеристиками, що були отримані в результаті експерименту. Далі проводилось аналітичне дослідження деталі для визначення сили, при якій здійснюється її руйнування. Після цього була виготовлена партія деталей для випробувань. По результатам випробувань, середнє відхилення фактичного навантаження руйнування від розрахункового склало не більше 12%. Це прийнятний результат для інженерних розрахунків деталей з полімерних композиційних матеріалів.

**Висновки** по роботі узагальнюють основні отримані в дисертаційному дослідженні результати.

Дисертація в цілому є структурно та змістовно гарно збалансованою роботою. Послідовність викладення її положень є логічною і такою, що побудована у відповідності з науковим методом.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій та їх достовірність**

Ступінь обґрунтованості та достовірності результатів дисертаційного дослідження не викликає сумнівів, оскільки вона забезпечується:

- коректністю обраної методології дослідження;
- аналізом сучасного стану досліджень в заявленій предметній області, комплексним застосуванням теоретичних та експериментальних методів дослідження;
- експериментальним доведенням правильності розрахункових методик;
- адекватною добіркою використаних літературних джерел.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

При виконанні дисертаційної роботи отримано такі наукові результати:

1. Вперше розроблено нові схему та метод армування деталей волокном в процесі пошарового синтезу для отримання полімерного композиційного матеріалу, які полягають у тому, що армування виконується прокладанням волокна між друкованими шарами основного полімеру з збереженням суцільності волокна.

2. Вперше встановлено, що армування деталей базальтовим волокном дозволяє підвищити, у випадку найкращих характеристик в залежності від параметрів армування, межу міцності армованого матеріалу на 80% та модуль пружності на 101% по відношенню до неармованого матеріалу.

3. Вперше доведено, що основним фактором впливу на характеристики виробу є відстань між армованими шарами, і встановлена залежність властивостей полімерного композиційного матеріалу від

щільності заповнення деталі і відстані між шарами армування. Це дозволяє прогнозувати властивості кінцевого полімерного композиційного матеріалу та активно впливати на них шляхом зміни параметрів армування та 3D-друку.

4 Вперше з використанням розробленої моделі армованого полімеру отримано значення властивостей виробів, виготовлених з використанням методів 3D-друку.

### **Значущість результатів дослідження для науки і практики та можливі шляхи їх використання**

Наукова та практична значущість результатів дисертаційного дослідження підтверджується тим фактом, що розроблені методи та технології дозволяють суттєво підвищити властивостей існуючих виробів, виготовлених з використанням методів 3D-друку з використанням реальних матеріалів.

### **Повнота викладу результатів дослідження в наукових публікаціях**

Основні наукові результати роботи в повному обсязі викладені у 4 статтях, що опубліковано у фахових журналах. Особистий внесок здобувача у ці публікації є суттєвим, що наведено у дисертації.

Наукові результати, що отримані у дисертаційній роботі, були апробовані та отримали позитивну оцінку на п'яти міжнародних наукових конференціях.

### **Академічна доброчесність**

Очевидних ознак порушення автором академічної доброчесності, зокрема випадків оприлюднення, частково або повністю, наукових результатів, отриманих іншими особами, як результатів власного дослідження та/або відтворення опублікованих текстів інших авторів без зазначення їх авторства, не виявлено.

**Відповідність вимогам п. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів**

**України від 12 січня 2022 р. № 44.**

Дисертацію подано у вигляді спеціально підготовленої кваліфікаційної наукової праці на правах рукопису, що виконувалася здобувачем особисто. Дисертація містить нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати проведених здобувачем досліджень, які виконують наукове завдання розробки та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів авіаційної та ракетно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів, що має істотне значення для галузі знань «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

Це ґрунтовно підтверджено публікаціями, що розкривають основний зміст роботи. Дисертація свідчить про суттєвий особистий внесок здобувача в науку та характеризується єдністю змісту. Все вищезазначене дає змогу зробити висновок про відповідність роботи вимогам п. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р.

Дисертацію оформлено у відповідності до вимог Міністерства освіти і науки України (Наказ № 40 від 12.01.2017 із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки № 759 від 31.05.2019).

**Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації**

Загалом, позитивно оцінюючи наукове і практичне значення отриманих здобувачем результатів, варто відзначити наступні дискусійні положення і зауваження до змісту дисертаційної роботи.

1 В роботі сформульовані завдання, серед яких зазначено: «дослідити вплив параметрів 3D-друку на структуру і властивості отриманого

матеріалу». Структуру матеріалу не досліджено. Не наведено макро-, і мікроструктуру матеріалу, не зрозуміло кількість пор в матеріалі, їх розташування, положення волокна в матриці. Оскільки структура матеріалу впливає на його міцність, такі дані є важливими.

2 Під час вибору армуючого волокна недостатньо аргументовано проведено обґрунтування застосування базальтового волокна – доцільно навести характеристики міцності, жорсткості, деформативності, щільності, вартості всіх типів волокон, і на основі їх порівняння вибрати оптимальний варіант. В дисертації порівняльні характеристики скло- та вуглецевих волокон відсутні.

3 В розділі 2.2 сказано, що головними недоліками, що необхідно усунути, були прийняті недотримання неперервності волокна наповнення і створення неспрогнозованих концентраторів напружень. З тексту дисертації незрозуміло, як ви усували створення неспрогнозованих концентраторів напружень і як ви це контролювали.

4 Непоказано, як розраховувалося середнє значення міцності, які відхилення від середнього значення, чи була проведена перевірка експериментальних даних на наявність грубих похибок (викидів). Не показано на графіках діапазон зміни міцності.

5. В висновках за розділом 4 стверджується, що зразки деталей довільної форми, армовані волокном, показали відхилення сили на розрив від 10,1 до 13,2 %. Похибка складає в середньому не більше 12%, що відповідає прийнятим припущенням для інженерних розрахунків.

Це не похибка, оскільки відхилення на всіх зразках здійснюється в сторону нижчої величини руйнівного навантаження. По результатах випробувань на вузлу (деталі) руйнуюче навантаження на 11-13% нижче розрахункового на всіх зразках. Тому під час проектування виробів необхідно вводити додаткові коефіцієнти, які будуть враховувати геометрію деталі, і підвищувати коефіцієнти запасу міцності.

## Загальний висновок

Зазначені зауваження та рекомендації не впливають на загальну позитивну оцінку представленого наукового дослідження. Вважаю, що дисертація на тему «Розробка та вдосконалення технології пошарового синтезу виробів з полімерних композиційних матеріалів для авіаційної та ракетно-космічної техніки» є завершеною самостійною науковою роботою, яка містить нові обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що мають істотне значення для галузі авіаційна та ракетно-космічна техніка і за актуальністю, змістом, науковою новизною, обґрунтованістю висновків, достовірністю і значущістю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р., а її автор, Сіренко Максима Костянтиновича, за результатами публічного захисту наукових досліджень у формі дисертації, на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

## Офіційний опонент

Провідний науковий співробітник

Проектного відділу ДП «КБ «Південне»,

Д.т.н., старший дослідник

Ірина ГУСАРОВА

Підпис оф. опонента, д.т.н., с.д. І.О. Гусарової

Засвідчую

Учений секретар ДП «КБ «Південне»



Лариса ПОТАПОВИЧ

«23» 04 2025р.