

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Пушкарьова Дениса Вікторовича

на тему «Розробка технології адитивного виробництва полімерних композитів

з регульованою теплопровідністю»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія» за спеціальністю 161 «Хімічні

технології та інженерія»

Актуальність теми дисертації

Актуальність теми дисертаційної роботи Пушкарьова Дениса Вікторовича «Розробка технології адитивного виробництва полімерних композитів з регульованою теплопровідністю» обумовлена зростаючою потребою у високофункціональних матеріалах для інженерії, електроніки, оборонної галузі та теплоенергетики, які здатні ефективно керувати теплопереносом у екстремальних умовах експлуатації. Сьогодні спостерігається тенденція до мініатюризації електронних пристроїв, що супроводжується зростанням теплового навантаження, тому ключовою стає проблема створення матеріалів з оптимальними теплофізичними характеристиками, здатних не лише проводити або ізолювати тепло, а й бути доступними для цифрового формоутворення. Використання технологій адитивного виробництва, зокрема FFF-друку, як інструменту гнучкого виготовлення індивідуалізованих виробів, суттєво розширює можливості впровадження подібних композитних матеріалів у практику.

У роботі розглянуто закономірності поєднання полімерних матриць із функціональними наповнювачами, що дозволяє змінювати теплопровідність у широкому діапазоні, створювати як теплопровідні, так і термоізоляційні елементи. Особливо актуальним є дослідження структурно-функціональних особливостей композитів з точки зору перколяційних ефектів, впливу параметрів адитивного виробництва на теплофізичні та фізико-механічні властивості, а також забезпечення технологічної стабільності процесу за високого вмісту наповнювачів.

Робота має практичну значущість, що підтверджується апробацією розроблених технологій на виробництві, виготовленням готових виробів і застосуванням результатів роботи у науково-освітньому процесі.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертаційної роботи Пушкарьова Дениса Вікторовича підтверджує високий рівень достовірності, новизни та практичної цінності проведених досліджень. Робота відзначається чіткою логікою наукового пошуку — від аналізу науково-практичних літературних джерел і формулювання гіпотез до експериментального підтвердження впливу складу композицій і технологічних параметрів адитивного виробництва на теплофізичні та фізико-механічні властивості полімерних матеріалів. Дисертантом розроблено та досліджено понад 50 композицій на основі термопластичних полімерів - ABS та PLA з використанням графіту, двоокису титану, мідного, алюмінієвого порошку, заліза, що дало змогу виявити закономірності формування теплопровідної структури та визначити найфективніші композиції.

Наукова новизна роботи полягає у створенні комплексного підходу до регулювання теплопровідності полімерних композитів для адитивного виробництва з урахуванням перколяційного механізму теплопереносу, взаємодії наповнювачів з матрицею, а також впливу параметрів адитивного виробництва. Зокрема, вперше для системи ABS-графіт- TiO_2 встановлено, що при масовій концентрації 30% графіту і 20% TiO_2 досягається теплопровідність 0,48 Вт/м·К, що перевищує аналогічні композиції без гібридного наповнення.

Достовірність результатів забезпечено використанням сучасних методик дослідження: механічних випробувань, вимірювання теплопровідності, аналізу структури, а також статистичної обробки даних. Значна частина експериментів проведена із застосуванням модернізованого обладнання, зокрема самостійно адаптованої установки для FFF-адитивного виробництва, що дозволило забезпечити відтворюваність результатів та контроль за технологічними параметрами процесу. Надійність результатів також підтверджена порівнянням із референтними зразками та аналогами, описаними в науковій літературі.

Таким чином, у роботі реалізовано повний цикл прикладного наукового дослідження, наукові результати обґрунтовані, системно викладені, підкріплені експериментальними даними й володіють високим потенціалом практичного впровадження.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Пушкарьова Дениса Вікторовича повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 161

«Хімічні технології та інженерія» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Хімічні технології та інженерія.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Хімічні технології та інженерія».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Пушкарьова Дениса Вікторовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Матеріал викладено послідовно та логічно, із чітким дотриманням структури наукової роботи: від постановки мети дослідження до формулювання висновків. Кожен розділ логічно впливає з попереднього, що сприяє цілісному сприйняттю інформації.

Стиль мовлення відповідає вимогам наукового стилю: використано об'єктивну, нейтральну лексику, уникається емоційність та суб'єктивні оцінки. Текст лаконічний, інформативний, з дотриманням норм академічної доброчесності.

Інформація подається доступною мовою, зрозумілою для фахівців відповідної галузі. Разом із тим, автор дотримується загальноприйнятої наукової термінології, що свідчить про професійний рівень викладення та орієнтацію на академічну аудиторію.

Використання ілюстративного матеріалу (таблиць, графіків, схем) додатково підсилює зміст тексту та робить його більш наочним. Обґрунтування гіпотез, аналіз результатів і формулювання висновків виконано чітко та аргументовано.

Загалом, текст відзначається високим рівнем академічної культури, науковою коректністю та стилістичною вираженістю.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації 272 сторінок.

Вступна частина дисертаційної роботи пояснює важливість обраної наукової тематики, висвітлюючи як її наукове, так і практичне значення. У вступі вказано на наявність низки невирішених питань у сфері створення

композиційних матеріалів з регульованою теплопровідністю, що дозволило коректно визначити мету, завдання та структуру дослідження.

У **першому** розділі дисертаційної роботи Пушкарьова Дениса Вікторовича здійснено ґрунтовний аналіз сучасного стану наукових досліджень і технологічних підходів у сфері створення полімерних композитів з регульованою теплопровідністю для застосування в адитивному виробництві. Розглянуто властивості та придатність найбільш поширених полімерних матриць до формоутворення з використанням адитивних технологій, проаналізовано особливості їх реологічної поведінки та здатність до наповнення функціональними додатками. Значну увагу приділено класифікації наповнювачів: електропровідних і діелектричних – таких як графіт, мідь, двоокис титану, карбонільне залізо, сульфат барію та оксид цинку. Узагальнено сучасні уявлення про механізми теплопереносу в композитах, зокрема перколяційні ефекти, роль морфології та концентрації наповнювачів, вплив міжфазної взаємодії. Аналіз літератури охоплює також технологічні фактори адитивного виробництва, які здатні впливати на теплофізичні характеристики виробів — зокрема висоту шару, ширину екструзії, швидкість формоутворення. На основі аналітичного узагальнення виявлено науково-технічні проблеми, пов'язані з необхідністю забезпечення стабільного теплопереносу, структурної однорідності та сумісності матеріалів із процесами FFF/FGF, що обґрунтовує актуальність і вибір напрямів подальших досліджень.

Другий розділ присвячено обґрунтуванню вибору вихідних матеріалів, наповнювачів і модифікаторів, а також опису методів отримання зразків та комплексного дослідження їх властивостей. У роботі детально охарактеризовано полімерні матриці: акрилонітрилбутадієнстирол та полілактид із зазначенням їх фізико-хімічних параметрів, переваг і обмежень у контексті адитивного виробництва. Обґрунтовано вибір функціональних наповнювачів з урахуванням їх впливу на теплопровідність, електропровідність, реологічні характеристики та сумісність із матрицею. Описано технології приготування композиційних матеріалів шляхом компаундування та подальшої екструзії філаменту для використання в адитивному виробництві. Наведено перелік обладнання, зокрема лабораторної екструдерної лінії, прес-форм і модифікованого FFF-пристрою для адитивного виробництва. Представлено комплекс методів дослідження: визначення міцності та видовження при розриві, вимірювання теплопровідності, визначення щільності, ударної в'язкості, теплосмності тощо.

У **третьому** розділі дисертаційної роботи Пушкарьова Дениса Вікторовича представлено результати експериментального дослідження композицій полімерних матеріалів, отриманих шляхом компаундування з подальшим використанням у технологіях адитивного виробництва методом. Системно проаналізовано вплив типу наповнювача, його концентрації та комбінацій на теплопровідність, щільність, теплоємність і міцність зразків. Встановлено залежності між рецептурним складом та кінцевими властивостями. Особливу увагу приділено впливу параметрів адитивного формоутворення на монолітність структури та інтенсивність теплопереносу. Результати дозволили виокремити низку композицій із раціональним співвідношенням фізико-механічних і теплофізичних характеристик, що мають практичну цінність.

Четвертий розділ присвячено поглибленому дослідженню впливу щільності та структурної організації теплопровідних полімерних композитів на їх теплофізичні характеристики, а також впливу поєднання наповнювачів різної природи. Розглянуто, як зміна густини композицій, зумовлена різними режимами адитивного виробництва впливає на теплопровідність та теплоємність зразків. Особливу увагу приділено аналізу ефектів від поєднання діелектричних та електропровідних наповнювачів. Показано, що синергетичне використання функціональних додатків з різними механізмами теплопереносу дозволяє суттєво підвищити ефективність формування теплопровідної структури. Здійснено порівняння властивостей однонаповнених та комбіновано наповнених композицій, встановлено раціональні співвідношення наповнювачів для досягнення найкращого балансу між теплопровідністю та технологічністю переробки. Результати підтверджують ключову роль густини, внутрішньої структурованості та типу наповнювачів у керуванні теплофізичними властивостями композицій, що є критично важливим для інженерних застосувань.

У **п'ятому** розділі дисертаційної роботи Пушкарьова Дениса Вікторовича наведено приклади практичного впровадження розроблених полімерних композитів з регульованою теплопровідністю, що підтверджує високу прикладну значущість проведених досліджень. Представлено реалізацію двоетапної технології адитивного виробництва методом FFF з використанням композицій, модифікованих різними функціональними наповнювачами. У якості демонстраційного прикладу розглянуто виготовлення корпусу електронного пристрою із композиції ABS з 30% графіту та 20% двоокису титану, що забезпечило одночасно високу теплопровідність і достатню міцність. Подано параметри виготовлення, умови компаундування, особливості

формоутворення та стабілізації процесу на виробничому обладнанні ТОВ «Лемки Роботікс». Розділ також містить опис адаптації технології під реальні виробничі умови, із зазначенням потенційних напрямів масштабування. Окремо висвітлено інтеграцію результатів дисертаційної роботи в освітню та науково-дослідну діяльність.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені у 9 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України та 1 стаття у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку періодичних видань, що індексуються наукометричною базою даних Scopus. Також результати дисертації були апробовані на 3 наукових фахових конференціях.

Наукові публікації свідчать про високий рівень теоретичної підготовки, володіння сучасними методами дослідження та глибоке розуміння актуальних проблем у сфері хімічних технологій та інженерії. Тематика публікацій відповідає напрямку дослідження та демонструє поступовий розвиток наукової думки, від постановки проблеми до практичної реалізації результатів.

У публікаціях простежується самостійність викладення матеріалу, аргументованість наукових висновків, коректне посилання на джерела інформації. Автор дотримується загальноприйнятої наукової термінології, чітко формулює мету та завдання досліджень, логічно структурує текст та обґрунтовує результати.

Здобувач дотримується принципів академічної доброчесності, зокрема, коректно використовує джерела та посилання на праці інших дослідників, не виявлено фактів плагіату або самоплагіату, дотримується етичних норм у поданні результатів.

Публікації охоплюють як фахові видання, так і матеріали конференцій, що підтверджує активну наукову діяльність та зацікавленість у професійному зростанні.

Загалом, науковий доробок здобувача характеризується високим рівнем академічної якості та повною відповідністю вимогам до наукових публікацій у вищій освіті та науці. Наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Теоретичне обґрунтування впливу параметрів адитивного виробництва на теплопровідність композицій потребує детальнішого аналізу. Зокрема, результати експериментів щодо впливу ширини та висоти шару подано якісно, однак відсутнє математичне або чисельне моделювання теплового переносу в умовах шаруватої структури з врахуванням класичної перколяційної теорії.

2. Опис реалізації технології FFF-адитивного виробництва подано узагальнено. У дисертації бракує детального аналізу таких важливих параметрів, як точність виготовлення, геометричні відхилення виробів, якість міжшарових з'єднань, наявність або відсутність внутрішніх дефектів, що є критично важливим для практичного впровадження технології.

3. В окремих серіях експериментів не повністю відокремлено вплив рецептурного складу від впливу режимів FFF/FGF-виробництва. Це частково ускладнює інтерпретацію результатів і не дає змоги однозначно визначити, який чинник — склад чи параметри формоутворення — є домінуючим у формуванні теплофізичних і механічних властивостей.

4. Питання взаємодії між полімерною матрицею та наповнювачем описано головним чином з емпіричних позицій. У роботі бракує даних, які дозволили б підтвердити гіпотези про адгезію, зміну морфології або хімічну сумісність, наприклад, за допомогою спектроскопічного або мікроскопічного аналізу інтерфейсу.

5. В тексті дисертації зустрічаються граматичні та стилістичні помилки, зокрема “поліефір” замість «поліестер»; “термічно” замість “тепло”; “щільність” замість “густина”; крапки для розділення десятих і сотих значень замість ком; індекси і степені не виведені надрядковими і підрядковими знаками.

6. З тексту дисертації незрозуміло чому за зниження ступеня заповнення 3Д друкованого зразка час друку залишається незмінним (таблиця 4.1.).

7. Ряд параметрів 3Д друку які наведені в таблицях 4.1-4.6. і які не змінюються для всіх композицій варто винести за межі таблиці для кращого сприйняття інформації.

8. Незрозуміло чому дослідження проведені із застосуванням FFF 3Д друку, а під час впровадження розроблених технологій застосовується також і FGF-друк, вплив параметрів якого на властивості отриманих виробів не досліджений.

9. У розділі 5, недостатньо пояснено вибір складу композицій для отримання цільових виробів. Зокрема, для одержання теплопровідного композиту на ТОВ “Лемки роботікс” обраний матеріал із вмістом міді 50%, хоча в роботі досліджено низьку ефективність міді як теплопровідного наповнювача.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Пушкарьова Дениса Вікторовича на тему «Розробка технології адитивного виробництва полімерних композитів з регульованою теплопровідністю» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія».

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в 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.

Здобувач Пушкарьов Денис Вікторович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія» за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія».

Офіційний опонент:

Завідувач кафедри Хімічної технології
переробки пластмас
Національного університету
«Львівська політехніка»
д.т.н., проф.

Володимир ЛЕВИЦЬКИЙ

Підпис засвідчують:

Проректор



Микола ЛОГОЙДА