

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента 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 зумовлена нагальною потребою промисловості у матеріалах, що дають змогу цілеспрямовано керувати теплопереносом у компактних теплонавантажених системах — від потужної мікроелектроніки та акумуляторних модулів електромобілів до енергоефективних будівельних рішень та медичних приладів. Саме недостатня теплопровідність більшості базових полімерів сьогодні стримує поширення полімерних деталей у цих секторах, тоді як метали часто виявляються занадто важкими, корозійно нестабільними чи дорогими. Запропонована автором концепція створення композитів із регульованою теплопровідністю, сумісних із наймасовішою технологією адитивного виробництва Fused Filament Fabrication (FFF), безпосередньо відповідає цим викликам, адже надає можливість швидко переходити від термоізоляційних до тепловідвідних елементів, змінюючи лише рецептуру чи параметри формоутворення, а не апаратну частину обладнання.

Для України проблема є стратегічною також у площині імпортозаміщення: відсутність вітчизняних високотеплопровідних полімерів змушує імпортерів закуповувати дорогі іноземні матеріали і технології. Запропоновані в роботі рецептури на основі доступних наповнювачів, адаптовані до серійних FFF-пристроїв адитивного виробництва, відкривають шлях до створення локальних виробництв компонентів електроніки, теплообмінників, побутових та транспортних конструкцій. Комплексне дослідження перколяційних ефектів, реології розплаву й параметрів адитивного формування, проведене автором, формує наукову платформу, необхідну для подальшого інженерного вдосконалення та впровадження таких матеріалів у промислові ланцюги. Саме тому тематика дисертації є своєчасною, суспільно й економічно важливою, а отримані результати — перспективними для широкого застосування.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

У дисертаційній роботі Пушкарьова Д. В. демонструється повний замкнений цикл наукового дослідження — від висунення гіпотези щодо механізмів теплопереносу у полімерних композитах до її експериментальної перевірки на власноруч модернізованому обладнанні для FFF- та FGF-адитивного виробництва. Здобувач системно опрацював понад 60 рецептур на основі PLA та ABS, варіюючи тип (мідь, графіт, карбонільне залізо, TiO_2 , ZnO , BaSO_4) і вміст наповнювачів у діапазоні 0–70%. Для кожної серії за єдиними

протоколами визначалися теплопровідність, теплосмність, густина, реологічні параметри розплаву, а також комплекс механічних показників.

Достовірність результатів забезпечена SEM-аналізом морфології, який корелюється з розрахованими перколяційними порогами; порівнянням даних для литих під тиском і FFF-зразків, що дозволило відокремити рецептурний фактор від впливу параметрів формоутворення. Автор обґрунтовано довів, що комбінація 50% міді та 20% графіту з 10-20% двоокису титану формує тривимірну сітку та підвищує теплопровідність PLA-композиту до 1,93 Вт/(м·К), що на 55 % вище за найкращі мононаповнені аналоги, що в літературі раніше не фіксувалося. Також уперше кількісно охарактеризовано анізотропію теплопереносу, керовану орієнтацією шарів: перехід від 90° до 0° відносно теплового потоку збільшує теплопровідність на 21-34 % без втрати механічної міцності. Науковою новизною є і запропонована хімічна природа спінення під час адитивного виробництва.

Практичну значимість забезпечує впровадження двоетапної FGF-схеми з гранули на виробничій ділянці ТОВ «Лемки Роботікс», результати підтверджені актами впровадження та випробувальними протоколами. Таким чином, отримані дані мають високу експериментальну переконливість, а сформульовані положення щодо регулювання теплопровідності полімерних композитів методом адитивного виробництва слід визнати новими, науково обґрунтованими й готовими до практичної реалізації.

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

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

У **Вступі** обґрунтовано важливість обраної теми, сформульована мета дослідження і завдання, які вирішувалися для досягнення поставленої мети, наведені формулювання наукової новизни і практичного значення результатів дисертаційної роботи, інформація щодо їх апробації та опублікування.

Перший розділ дисертації присвячено ґрунтовному аналізу літературних джерел, що охоплюють фундаментальні й прикладні аспекти теплопереносу в полімерних композитах, призначених для адитивного виробництва. Автор послідовно розглянув теплопровідність полімерів та шляхи її підвищення шляхом орієнтації ланцюгів і введення нековалентних зв'язків; класифікацію електропровідних та діелектричних наповнювачів (метали, кераміка, вуглецеві наповнювачі) з аналізом їхніх теплофізичних параметрів; фактори, що визначають формування перколяційної теплопровідної сітки в матриці — концентрацію, дисперсність, геометрію частинок та міжфазний тепловий опір. Окремий блок відведено огляду сучасних підходів до створення тривимірних теплопровідних каркасів, сегрегованих структур і керованого спінення, що забезпечують можливість варіювати теплопровідність від ізоляційного до тепловідвідного рівня. На підставі критичного аналізу виявлено наукові прогалини: брак системних досліджень комбінованих наповнювачів у FFF-композиціях та відсутність кількісних моделей теплопереносу для пористих і анізотропних структур.

Другий розділ детально обґрунтовує вибір вихідних компонентів і методів дослідження, що забезпечили одержання полімерних композитів. Як матриці розглянуто чотири термопласти: PLA, ABS, PCL та SEBS; їхні реологічні та термомеханічні характеристики наведено за стандартами ISO. Детально описано функціональні наповнювачі на базі порошків карбонільного заліза, міді, алюмінію, графіту, а також нанодисперсних TiO_2 , ZnO і BaSO_4 ; окремо описано пороутворювач азодикарбонамід для керування щільністю. Для кожного наповнювача обґрунтовано теплопровідний потенціал, електричну складову, морфологію та границі вмісту, що не погіршують технологічність переробки. Описано двоетапну схему компаундування на лабораторному двошнековому екструдері, екструзію філаменту й гранули, а також пристрій для адитивного виробництва. Подано повний комплекс методик для визначення показника текучості розплаву, гідростатичного вимірювання густини, теплопровідності, теплоємності, механічних характеристик, SEM-аналізу морфології та статистичної обробки даних. Таким чином, розділ формує

надійну експериментальну основу для подальшого дослідження впливу рецептури і параметрів адитивного виробництва на теплофізичні властивості композитів.

Третій розділ містить експериментальні результати відпрацювання повного циклу створення полімерних композитів: від первинного компаундування до адитивного виробництва з деталізованим аналізом того, як склад та параметри отримання композитів впливають на структуру й властивості матеріалу. Спершу автор порівняв понад 40 систем на основі PLA й ABS, наповнених міддю, алюмінієм, графітом, карбонільним залізом і TiO_2 , сформувавши зразки литтям під тиском та через FFF — це дозволило відокремити внесок складу від впливу шарової архітектури. Далі виконано модифікацію композитів біополімерами PCL і SEBS для підвищення ударної в'язкості, що дало змогу створити матеріали з теплопровідністю 0,35–1,25 Вт/(м·К) при збереженні границі міцності не нижче 35 МПа. Завершальний блок присвячено вивченню впливу параметрів адитивного виробництва: висоти шару, кута орієнтації траєкторій, ступеня заповнення комірок і швидкість подачі на теплофізичні властивості зразків. Виявлено, що зменшення кількості міжшарових інтерфейсів і орієнтація наповнювачів уздовж теплового потоку знижують анізотропію та підвищують теплопровідність, тоді як теплоємність і міцність залишаються в межах статистичної похибки. Отримані кореляції між рецептурою, параметрами адитивного виробництва та кінцевими теплофізичними характеристиками дозволили сформувати базу даних раціональних складів композицій для подальшого дослідження.

Четвертий розділ присвячено дослідженням можливості керування теплофізичними характеристиками композитів за рахунок цілеспрямованої зміни їхньої внутрішньої архітектури і гібридного рецептурного складу. Перший блок експериментів демонструє, що варіювання коефіцієнта екструзії та програмного ступеня заповнення при адитивному виробництві дозволяє регулювати густину композицій у межах 0,15–1,24 г/см³, змінюючи теплопровідність від ізоляційного рівня 0,07 Вт/(м·К) до 0,35 Вт/(м·К). Далі автор впроваджує хімічне спінювання у поєднанні з низьковідсотковим заповненням, отримуючи закритопористі структури, у яких питома теплоємність зростає до 3,35 Дж/(г·К), а анізотропія теплопереносу знижується майже на 30 %. У другому блоці розділу доведено синергетичний ефект комбінування електропровідних і діелектричних домішок: системи з поєднанням графіту, міді та двоокису титану формують тривимірну теплопровідну мережу, що підвищує теплопровідність до 1,93 Вт/(м·К). Розділ завершується порівнянням одно- та гібридно-наповнених композицій, де визначено раціональні співвідношення наповнювачів, здатні забезпечити широкий робочий діапазон теплопровідності і одночасно утримати показники ударної в'язкості у межах 15–25 кДж/м², що підтверджує можливість гнучкого налаштування матеріалу під конкретні функціональні задачі адитивного виробництва.

П'ятий розділ присвячений впровадженню результатів лабораторних досліджень у реальні інженерні рішення: автор описує двоетапну схему виготовлення теплопровідних композитів, де гранульований матеріал спочатку компаундується, а згодом подається у FGF-пристрій для формування великогабаритних заготовок. На базі ТОВ «Лемки Роботікс» відпрацьовано параметри такого циклу, що дало змогу отримати корпуси електронних блоків зі стабілізованою теплопровідністю 0,9–1,3 Вт/(м·К) при збереженні ударної в'язкості понад 18 кДж/м². Окремо наведено опис виготовлення порожнистого теплообмінного елемента.

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 науковому виданні, що індексується науково-метричною базою даних Scopus. Також результати дисертації були апробовані на 3 наукових фахових конференціях.

Наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача. Обсяг наукових публікацій здобувача свідчить про високий рівень теоретичної підготовки, володіння сучасними методами дослідження та глибоке розуміння актуальних проблем у сфері хімічних технологій та інженерії. У публікаціях простежується логічність 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.

Загалом, науковий доробок здобувача характеризується високим рівнем академічної якості та повною відповідністю вимогам до наукових публікацій у вищій освіті та науці.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Автор виконав розгорнутий огляд науково-технічної літератури за тематикою дисертації. Однак в деяких випадках огляд літератури носить декларативний характер без змістовного порівняння існуючих технічних рішень.
2. Сформульовані висновки до Розділу 1 не в повній мірі обґрунтовують вибір напрямів подальших експериментальних робіт, спрямованих на розробку матеріалів із регульованою теплопровідністю, сумісних із сучасними пристроями для адитивного виробництва.

3. В тексті дисертації автор зазначає, що в таблиці 1.2 наведені властивості стандартних теплопровідних наповнювачів та їх теплопровідність, хоча це не відповідає дійсності. В таблиці 1.2 вказані тільки значення теплопровідності.
4. Деякі таблиці наведені без посилання на них в тексті (таблиця 1.3). Також посилання на джерела інформації, наведені в таблиці 1.3, не відповідають списку літератури до дисертації.
5. В розділі 2 в таблицях 2.1–2.10 наведені властивості полімерних матеріалів і наповнювачів, які використані в дослідженні. Вважаю використання в назві таблиць словосполучення «Типові властивості» не доречним, оскільки в кожному конкретному випадку мова йшла не про узагальнені характеристики, а про властивості кожної конкретної марки матеріалів.
6. Обмежене дослідження термостійкості у циклічному режимі. У дисертації докладно висвітлено одноразові вимірювання теплопровідності та механічної міцності, однак відсутні випробування після багаторазових термоциклів, що є типовим для експлуатації корпусів електроніки.
7. Відсутній аналіз ресурсу пристрою для адитивного виробництва при переробці високо наповнених гранул. Хоча наведено температурні режими й продуктивність шнека, не розглянуто зношування гвинта, форсунки та вплив металічного абразиву на довготривалу стабільність подачі.
8. Вимірювання міцності при розриві та ударної в'язкості виконані лише при 23 °С. Для композитів, що працюють за підвищеної температури доцільно провести випробування вище температури теплової деформації матриці та дослідити механічні властивості за підвищених температур.
9. В розділі 5 щодо практичного впровадження розроблених технологій сказано про те, що отримані вироби характеризувалися високим ступенем монолітності, низькою пористістю, але не вказано призначення цих виробів. Можливо варто було б навести фото цих виробів. Також не зроблено порівняння з комерційними філаментами, присутніми на вітчизняному ринку. Для оцінки практичної конкурентоспроможності бракує даних про те, яку перевагу дають розроблені композиції порівняно з серійними теплопровідними матеріалами для FFF-процесів.
10. По тексті дисертації зустрічаються граматичні помилки, неузгодженість слів у реченнях, пропущені слова, деякі формулювання потребують уточнення. Також є певні повтори.

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, 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 рецензент:

Завідувач кафедри
хімічних технологій та ресурсозбереження
Київського національного університету
технологій та дизайну, д.т.н., проф.

 / Вікторія ПЛАВАН/

М.П.

« 23 » 07 2025 року

Підпис *Плаван Вікторія*
засвідчую
Зав. КАНЦ 

