

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Федоріва Тараса Романовича

на тему «Технології адитивного виробництва електропровідних полімерних композитів»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

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

Актуальність теми дисертації. Тематика дисертаційної роботи Федоріва Тараса Романовича є актуальною, оскільки стосується однієї з провідних тенденцій в галузі сучасного матеріалознавства — створення функціоналізованих полімерних композитів для адитивного виробництва. У межах дослідження розглянуто способи підвищення електропровідності, міцності, термостійкості та електромагнітного екранування матеріалів для адитивних виробництв, що є необхідним для забезпечення їх придатності до використання в умовах підвищених навантажень і спеціалізованих завдань. Це зумовлює значний науково-практичний інтерес до виконаного дослідження в цьому напрямі.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів, представлених у дисертації Федоріва Тараса Романовича, полягає насамперед у тому, що автором вперше встановлено кількісні закономірності формування перколяційних структур у полімерних матрицях на основі термопластичного поліуретану і поліетилентерефталат-гліколю залежно від концентрації електропровідних наповнювачів — технічного вуглецю та вуглецевих нанотрубок. Зокрема, визначено критичні концентрації цих наповнювачів, які необхідні для забезпечення високих електропровідних характеристик композитів, та встановлено суттєву різницю у здатності матриць ТПУ та ПЕТГ до формування стабільних перколяційних фаз, що зумовлено їх релаксаційною в'язкістю та гнучкістю молекулярних ланцюгів. Також вперше автором запропоновано модифікацію композиційних матеріалів декабромдифенілетаном та карбонільним залізом, що дозволило суттєво покращити комплекс електричних і антипіренових властивостей полімерних композитів, розширюючи можливості їх застосування в технологіях адитивного виробництва.

Щодо достовірності отриманих результатів, слід наголосити, що у дослідженнях системно застосовувались апробовані стандартизовані методики визначення фізико-механічних, електричних, реологічних властивостей та особливостей структури розроблених матеріалів. Автор проводив експерименти із застосуванням сучасних високоточних приладів, таких як SEM-мікроскоп TESCAN MIRA3 LMU для морфологічного аналізу, чотириелектродний зонд для вимірювання поверхневого опору, розривну машину Р-50 для оцінювання механічних властивостей, що гарантує об'єктивність і точність експериментальних даних. Статистична обробка результатів з використанням сучасних програмних засобів підтверджує стабільність та репрезентативність отриманих даних, а також підсилює їхню наукову аргументованість.

Обґрунтованість отриманих наукових результатів забезпечується логічною структурою дисертаційної роботи та послідовним переходом від постановки мети і завдань до комплексного аналізу одержаних даних. Автор чітко та науково обґрунтовано визначив вибір вихідних матеріалів, наповнювачів і технологічних режимів адитивного формування композитів. Комплексно проаналізовано вплив технологічних параметрів процесу FFF-друку, зокрема орієнтації шарів, температурних і швидкісних умов, на електричні та механічні властивості отриманих композиційних матеріалів. Порівняння одержаних експериментальних результатів з актуальними публікаціями провідних вітчизняних і закордонних дослідників підтверджує високу якість роботи та її відповідність рівню сучасної світової науки у галузі полімерних композитів спеціального призначення.

Отже, у дисертаційній роботі Федоріва Тараса Романовича повною мірою виконано поставлене наукове завдання, отримані результати є новими, достовірними, добре обґрунтованими та мають значну наукову і практичну цінність. Автор продемонстрував високий рівень володіння методологією наукових досліджень у сфері адитивного виробництва електропровідних полімерних композитів.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Федоріва Т.Р. 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».

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 виваженістю.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації 254 сторінки.

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 електропровідних композиційних матеріалів, що дозволило коректно визначити мету, завдання та структуру дослідження.

Перший розділ дисертації Федоріва Тараса Романовича присвячений розгорнутому аналітичному огляду сучасних досягнень у галузі технологій адитивного виробництва електропровідних полімерних композитів. Автором систематизовано основні підходи до класифікації адитивних технологій, зокрема, детально розглянуто особливості формування виробів з рідких, твердих та порошкових матеріалів. Особливу увагу зосереджено на аналізі методів моделювання пошарового наплавлення (FFF), селективного лазерного спікання (SLS) та електронно-променевого плавлення (EBM), з огляду на їхню перспективність для створення електропровідних полімерних композитів спеціального призначення. У розділі проведено аналіз сучасних наповнювачів, таких як технічний вуглець, вуглецеві нанотрубки, декабромдифенілетан та карбонільне залізо, які широко використовуються для забезпечення

функціональних характеристик композитів, у тому числі їх електропровідності, антипіренних та радіопоглинальних властивостей. Автор також розглянув потенційні галузі застосування розроблених матеріалів, наголошуючи на важливості подальшого розвитку технологій адитивного виробництва з огляду на їх переваги щодо складності геометричних форм виробів, економії матеріалів і скорочення часу виробництва. Отже, перший розділ дисертації надає ґрунтовний і системний аналіз стану досліджень у зазначеній галузі, що дозволило чітко сформулювати напрями та завдання подальших експериментальних досліджень.

Другий розділ дисертаційної роботи Федоріва Тараса Романовича присвячений детальному представленню вихідних матеріалів і методик, використаних у ході дослідження. У розділі достатньо охарактеризовано полімерні матриці — термопластичний поліуретан та поліетилентерефталат-гліколь, а також електропровідні наповнювачі, зокрема технічний вуглець та вуглецеві нанотрубки. Автором докладно описано процеси отримання дослідних зразків полімерних композитів, включаючи методики компаундування за допомогою двошнекового екструдера та формування філаменту на одношнековому екструдері. Особливу увагу приділено опису сучасних стандартизованих методик дослідження властивостей композитів, таких як визначення механічних властивостей при розриві, оцінка морфології перколяційної сітки методом сканувальної електронної мікроскопії, вимірювання поверхневого та об'ємного електричного опору за допомогою чотириелектродного зонду, а також методика визначення ефективності радіопоглинальних властивостей матеріалів. Використання сучасного лабораторного обладнання, зокрема SEM-мікроскопа TESCAN MIRA3 LMU, розривної машини Р-50 та високоточних приладів для реологічних досліджень, дозволило автору отримати точні та надійні експериментальні дані з високим рівнем відтворюваності. Отже, другий розділ підтверджує ґрунтовність вибору матеріалів та методів дослідження, що забезпечує достовірність отриманих результатів і належний науковий рівень дисертаційної роботи.

У **третьому** розділі дисертаційної роботи представлено результати комплексних експериментальних досліджень із формування електропровідних полімерних композитів із заданими характеристиками шляхом адитивного виробництва. Автором проведено детальне вивчення впливу різних типів і концентрацій електропровідних наповнювачів (технічного вуглецю, вуглецевих нанотрубок) у матрицях термoplastичного поліуретану та поліетилентерефталат-гліколю на фізико-механічні, електричні й технологічні властивості одержаних матеріалів. Особливу увагу приділено дослідженню

залежності поверхневого та об'ємного опору від концентрації наповнювачів та параметрів процесу FFF-друку. Автором виявлено та кількісно оцінено критичні концентрації наповнювачів для формування стабільних перколяційних структур, що забезпечують необхідну електропровідність композитів. Окремо досліджено вплив орієнтації шарів та щільності заповнення матеріалу при адитивному виробництві на формування анізотропії електричних характеристик. Результати експериментів дозволили визначити оптимальні композиції полімерних композитів, що поєднують високі показники електропровідності з необхідною механічною міцністю та стабільністю експлуатаційних властивостей, і можуть бути рекомендовані для практичного використання в електронній техніці, засобах зв'язку та інших спеціалізованих галузях.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячений дослідженням можливостей модифікації функціональних властивостей електропровідних полімерних композитів шляхом введення додаткових функціональних наповнювачів, таких як карбонат кальцію, декабромдифенілетан, карбонільне залізо та їх комбінації з технічним вуглецем і вуглецевими нанотрубками. Автором встановлено чіткі кількісні залежності впливу гібридного наповнення на електричні, механічні та антипіренні властивості композитів на основі ТПУ та ПЕТГ. У роботі вперше експериментально продемонстровано синергетичний ефект використання вуглецевих нанотрубок разом із карбонільним залізом, що дозволило суттєво знизити поверхневий і об'ємний опір матеріалів та підвищити ефективність поглинання електромагнітного випромінювання у широкому діапазоні частот. Важливим результатом є встановлення позитивного температурного коефіцієнта в досліджуваних композиціях, що дозволяє прогнозувати стабільність електропровідних характеристик композитів при різних температурах експлуатації. Представлені в четвертому розділі дослідження мають значну практичну цінність, зокрема для виробництва деталей, які можуть ефективно використовуватись у конструкціях радіопоглинальних елементів, нагрівальних пристроїв, а також як конструктивні елементи електронних та радіотехнічних систем.

У **п'ятому** розділі дисертаційної роботи висвітлено результати практичної реалізації наукових положень, розроблених у межах дослідження, що свідчить про прикладну спрямованість і технологічну повноту виконаної роботи. Автором наведено приклади використання запропонованих композитів для створення виробів спеціального призначення з електропровідними та радіопоглинальними властивостями. У роботі описано впровадження технологічного підходу до безперервного формування філаменту на основі попередньо модифікованих компаундів, що дозволяє уникнути проміжного

гранулювання та зменшити кількість термічних циклів обробки, зберігаючи стабільність провідної структури. Також наведено приклади апробації матеріалів у виробничих умовах ТОВ «ВІПІДІ ХОЛДІНГ», де були підтверджені функціональні характеристики створених композицій, зокрема їх електропровідність, стійкість до температурних навантажень та можливість масштабування процесу на промислове обладнання. Окремо зазначено впровадження результатів досліджень у навчальний процес на кафедрі хімічних технологій та ресурсозбереження Київського національного університету технологій та дизайну, зокрема у рамках підготовки студентів зі спеціальності «Хімічні технології та інженерія». Таким чином, п'ятий розділ демонструє, що отримані результати не лише мають наукову новизну, але й пройшли практичну апробацію, відповідають вимогам реального сектору промисловості та сприяють інтеграції наукових розробок у прикладні технології.

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 11 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 6 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України. Також результати дисертації були апробовані на 5 наукових науково-технічних 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. У дисертаційній роботі не подано узагальнюючої класифікації створених композитних матеріалів за їх функціональним призначенням. З огляду на широку варіативність застосованих наповнювачів і різноплановість отриманих властивостей, доцільним було б подати підсумкову таблицю з групуванням композицій за цільовим використанням (радіопоглинальні, нагрівальні, електростатично захисні тощо).

2. У низці фрагментів зустрічаються стилістичні повтори, що дещо обтяжує сприйняття тексту. Крім того, окремі технічні терміни, зокрема «терморезистивний ефект», «анізотропія провідності», «сітка перколяцій» вживаються без пояснень чи посилань на джерела, що ускладнює розуміння для менш підготовленого читача.

3. Позначення зразків у деяких розділах не завжди супроводжуються розшифровками або послідовною логікою. Для зручності інтерпретації результатів доцільно було б винести ключ до умовних позначень зразків (наприклад, серії 51*, 91* тощо) у вигляді окремої таблиці або додатку.

4. Розділ, присвячений терморезистивним властивостям композитів, подано без належного теоретичного обґрунтування механізмів поведінки провідної сітки при підвищенні температури. Було б доцільно додати хоча б спрощену модель або посилання на релевантну літературу.

5. Автором вживаються застарілі або стилістично неправильні терміни, зокрема: «ефірних» замість естерних; «Результати одного такого експерименту говорять нам»; «категорія пластику»; «реакції поліприєднання».

6. Для позначення густини автор використовує різні одиниці вимірювання г/см^3 і кг/дм^3 , необхідно привести до єдиного стандарту.

7. Автор часто вживає термін «стабільність структури» проте з тексту дисертації незрозуміло що під цим терміном мається на увазі і яка його фізична суть.

8. В огляді літератури інформація щодо деяких методів адитивного виробництва подана поверхнево, не до кінця розкриті їх переваги та недоліки. Варто було сконцентруватися на методах що мають промислово-практичне значення.

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 Федоріва Тараса Романовича на тему «Технології адитивного виробництва електропровідних полімерних композитів» 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 Федорів Тарас Романович 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 засвідчую

Проректор



Микола ЛОГОЙДА