

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента на дисертаційну роботу

Федоріва Тараса Романовича

на тему «Технології адитивного виробництва електропровідних полімерних композитів», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

в галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія»

за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія»

Актуальність теми дисертації. Швидке прогрес у розвитку адитивного виробництва в оборонній, аерокосмічній та енергетичній галузях потребує матеріалів, що одночасно забезпечують механічну міцність, стабільність у широкому діапазоні температур та здатність до відведення зарядів і екранування електромагнітного випромінювання. Наявні на ринку філаменти часто відповідають лише окремим з цих критеріїв, тому інтеграція вуглецевих наноструктур і металевих частинок у полімерні матриці стала одним із ключових наукових завдань. Дисертація спрямована саме на таке комплексне поліпшення властивостей, що робить її актуальною для розробників пристроїв для адитивного виробництва, які переходять на технологію FFF у критично важливих галузях.

Крім вдосконалення самих композицій, автор акцентує увагу на встановленні кореляції між рецептурою, реологічними параметрами та режимами адитивного виробництва виробів, що дозволяє цілеспрямовано формувати електропровідні і радіопоглинальні властивості без втрати технологічності переробки. Такий підхід відкриває можливості для виготовлення функціональних деталей безпосередньо на робочому місці оператора пристрою для адитивного виробництва.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна дисертації полягає у комплексному підході до формування електропровідних композитів на основі термопластичного поліуретану та ПЕТГ, придатних для адитивного виробництва методом FFF. Уперше кількісно визначено критичні об'ємні концентрації наповнювачів, за яких у матриці вибудовується провідна перколяційна сітка. Показано, що введення 20 % карбонільного заліза або декабромдифенілетану разом із нанотрубками не лише знижує поверхневий опір, а й істотно поліпшує інші властивості композицій, що раніше не описувалося для подібних систем. Додатковою науковою новизною є визначення впливу орієнтації шарів під час адитивного виробництва на анізотропію електропровідності, а також розробка

одностадійної схеми екструзії філамента, яка мінімізує деградацію матриці та забезпечує рівномірний розподіл наповнювачів.

Достовірність результатів підтверджується використанням сертифікованих методик із коректною статистичною обробкою отриманих результатів. Одержані експериментальні дані корелюють із сучасними теоретичними моделями провідності композитів. Логічна послідовність переходу від формулювання гіпотези через добір матриць і наповнювачів до оптимізації параметрів виготовлення на пристрої для адитивного виробництва підкріплює обґрунтованість висновків.

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, в якій розв'язане важливе науково-технічне завдання зі створення нових, більш ефективних, електропровідних полімерних композиційних матеріалів.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Федоріва Тараса Романовича 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.

Стиль викладення відповідає сучасним вимогам до наукових робіт. Текст лаконічний, інформативний, з дотриманням норм академічної культури та доброчесності. Інформація подається доступною мовою, зрозумілою для фахівців відповідної галузі. Разом із тим, автор дотримується загальноприйнятої наукової термінології. Використання ілюстративного матеріалу (таблиць, графіків, схем) додатково підсилює зміст тексту та робить його більш наочним.

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

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульована мета дослідження та завдання, які треба вирішити для її досягнення; сформульовані основні положення наукової новизни та практичної значущості роботи, наведена інформація про особистий внесок здобувача і апробацію отриманих результатів.

Перший розділ дисертації містить доволі розгорнутий огляд науково-технічної літератури щодо створення композиційних електропровідних матеріалів, акцентуючи увагу на класифікації процесів адитивного виробництва з рідких, твердих і порошкових систем, їх перевагах та обмеженнях. Проаналізовано сфери застосування полімерних композитів, зокрема у захисних радіоелектронних оболонках, біомедичних імплантах і системах енергоакумуляції, де потрібні поєднання електропровідності, механічної міцності та хімічної інертності. Значну увагу приділено характеристиці електропровідних полімерних композитів, сформованих у вигляді ниток для технології FFF: розглянуто фоточутливі смоли, порошки, в'язкі фарби й насамперед термопластичні філаменти на базі ТПУ та ПЕТГ, модифіковані вуглецевими нанотрубками, технічним вуглецем, карбонільним залізом і алюмієвим порошком, а також проаналізовано механізми формування перколяційної сітки, що забезпечує низький поверхневий і об'ємний опір матеріалів. Обґрунтовано необхідність комбінування різних наповнювачів для отримання електропровідної структури й наведено перспективи впровадження таких композицій у технологіях адитивного виробництва.

Другий розділ подає вичерпну характеристику вихідних компонентів і методичного апарату дослідження: описано полімерні матриці із наведенням їх характеристик, що обґрунтовує вибір саме цих матеріалів для адитивного виробництва електропровідних виробів. Наведено детальні характеристики електропровідних і функціональних наповнювачів — технічного вуглецю, вуглецевих нанотрубок, карбонільного заліза та декабромдифенілетану. Автор докладно описує методику підготовки зразків: сушіння компонентів, двошнекове компаундування, екструзію філамента й параметри формування шарів у режимі FFF, що забезпечує відтворюваність структури провідної сітки та мінімізацію термодеградації. Також у цьому розділі наведено стандартизовані процедури визначення електропровідності, реологічних показників, механічних властивостей, вимірювання ефективності зниження інтенсивності відбитого електромагнітного випромінювання з урахуванням

статистичної обробки даних, що гарантує достовірність і відтворюваність результатів.

У третьому розділі викладені результати експериментів з формування та оцінки властивостей електропровідних композитів на основі термопластичного поліуретану й ПЕТГ, одержаних на пристрої для адитивного виробництва за технологією FFF. Автор показав, що при введенні $17 \pm 2\%$ технічного вуглецю або $4,5 \pm 0,7\%$ вуглецевих нанотрубок у ТПУ та 20–23% і 6–7% відповідно у ПЕТГ формується перколяційна сітка, яка знижує поверхневий опір до 0,1–0,3 $\Omega/\square$ і забезпечує об'ємний опір на рівні 6–12 $\Omega \cdot \text{м}$. Послідовні варіації температури, швидкості подачі та орієнтації шарів засвідчили, що комбіноване заповнення дає додаткове зниження опору порівняно з односпрямованою укладкою, причому міцність при розриві зберігається у межах 28–32 МПа. Визначено також позитивний температурний вплив: підвищення температури від 20 до 90 $^{\circ}\text{C}$ спричиняє лінійне зростання опору з коефіцієнтом 0,03–0,05 $\Omega/(\text{м} \cdot \text{K})$, що відкриває можливості для створення нагрівальних елементів. Морфологічний аналіз за допомогою скануючої електронної мікроскопії підтвердив рівномірний розподіл нанотрубок і формування провідних містків. Сукупність цих даних дала змогу автору сформулювати рекомендації щодо складу компаундів і параметрів FFF-процесу для виготовлення деталей із заданою електропровідністю, механічною надійністю та радіопоглинальною здатністю.

Четвертий розділ присвячено цілеспрямованій модифікації функціональних властивостей електропровідних композитів шляхом введення гібридних наповнювачів різної природи. Автор послідовно досліджує системи, у яких технічний вуглець та вуглецеві нанотрубки доповнюються дрібнодисперсним карбонільним залізом і декабромдифенілетаном, що дає змогу створити щільні перколяційні сітки та формувати контактні «містки» між частинками наповнювача. Введення 20 % карбонільного заліза підвищує густину та в'язкість розплаву, що потребує коригування температурного профілю екструзії, але не руйнує провідну сітку. Комплексне порівняння складів підтверджує, що гібридне наповнення дозволяє знизити поверхневий та об'ємний опір без критичного погіршення міцності, а також додатково забезпечує ефективне поглинання електромагнітного випромінювання у діапазоні 3–14 ГГц. Таким чином, отримані результати, наведені в розділі, демонструють можливість керувати електричними, механічними та радіопоглинальними властивостями композитів через раціональний добір і комбінування наповнювачів разом з оптимізованими режимами FFF-формування.

В п'ятому розділі наведені результати впровадження наукових здобутків у виробничі процеси: описано одноетапну схему компаундування з подальшою безперервною екструзією філамента, що дозволила мінімізувати кількість термічних циклів і зменшити поверхневий опір виготовлених матеріалів на 15–20% порівняно з традиційною двоетапною схемою. На базі цієї технології автор виготовив серії виробів на промисловому пристрої для адитивного виробництва за технологією FFF, а подальші випробування на підприємстві «ВІПІДІ ХОЛДІНГ» підтвердили стабільність механічних характеристик і однорідну електропровідність у деталях складної геометрії. Заслуговує на увагу два способи застосування: корпусні елементи радіолокаційних антен, у яких інтенсивність відбитого випромінювання в діапазоні 3–14 ГГц знижено до 20 дБ, та гнучкі нагрівальні вставки для літій-іонних акумуляторів, що забезпечують робочу температуру 60–70 °С при напрузі 12 В без деградації після 100 циклів.

У **висновках** наведені основні результати дослідження, їх наукову новизну та практичну значущість.

Загалом 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

Основні 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 фахових конференціях.

Здобувач дотримується принципів академічної доброчесності, зокрема, коректно використовує джерела та надає посилання на праці інших дослідників, при цьому не виявлено фактів запозичень. Наукові публікації здобувача за обсягом, якістю, науковим рівнем, повністю відповідають вимогам до наукових публікацій у вищій освіті та науці.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. В першому розділі дисертаційної роботи здобувачем наведена класифікація методів адитивного виробництва з рідких, твердих і порошкових систем, їх переваги та обмеження. Однак цей огляд зроблений дуже узагальнено, хоча варто було б приділити увагу саме можливостям застосування різних технологій адитивного виробництва для переробки електропровідних композицій. Така деталізація тільки

підтвердила б правомірність вибору технології екструзійного нашарування для електропровідних композицій.

2. В розділі 2 наведені характеристики основних матеріалів, але на мою думку автор неправомірно застосовує словосполучення «типові властивості», коли мова йде про характеристики конкретних марок матеріалів. Крім того, назва характеристик деяких матеріалів параметрами з наукової точки зору не коректна, оскільки параметри зазвичай використовуються для опису технологій.
3. У третьому та четвертому розділах подано великі масиви числових даних, але бракує узагальнюючих графіків чи схем, які б швидко демонстрували взаємозв'язок між складом, режимами адитивного виробництва та властивостями виготовлених зразків.
4. Крім того, інтерпретація власних експериментальних даних у розділах 3 і 4 зроблена без належного порівняння отриманих показників із даними інших дослідників (останній пункт у списку літератури 132 зазначається у другому розділі). Отримані ефекти варто було б більш детально розглянути, опираючись на результати фундаментальних досліджень. Хоча таке порівняння тільки б підкреслило те, що розроблені матеріали у ряді випадків перевищують відомі аналоги за комплексом електричних, механічних та функціональних характеристик.
5. У формулюванні наукової новизни і висновків зустрічається інформація про те, що декабромдифенілетан забезпечує ефективні антипіренні властивості електропровідних композицій, суттєво знижуючи горючість матеріалів та підвищуючи їхню термічну стабільність. Однак в роботі відсутні експериментальні дані здобувача, які б це підтвердили.
6. Розділи дисертаційної роботи не збалансовані за обсягом. Зокрема розділи 3 і 4 мають обсяг 57-62 сторінки, тоді як розділ 5 має всього 13 сторінок. Крім того, окремі підрозділи розділу 1, які стосуються класифікації технологій адитивного виробництва, мають обсяг до 1 сторінки і могли би бути об'єднані і краще систематизовані.
7. На рисунку 5.1 не розшифрована нумерація і відсутня специфікація обладнання.
8. В роботі зустрічаються граматичні, стилістичні, орфографічні помилки, які не впливають на зміст дослідження, але потребують додаткового редагування.

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» є закінченим науковим дослідженням, виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та в сукупності теоретичних та практичних результатів 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 рецензент:

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

/  / Вікторія ПЛАВАН

М.П.

«25» 07 2025 року

Підпис Плаван Вікторія
засвідчую
Зав. КАНЦ Вікторія

