

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Масючок Ольги Павлівни «**Закономірності адитивного формування 3D виробів із полілактиду та композитів на його основі**», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології

### **Загальна характеристика, актуальність та новизна роботи.**

Активний розвиток різних галузей промисловості вимагає створення таких програмно-апаратних комплексів, які на вході сприймали б геометричний образ виробу (цифрову модель), а на виході безпосередньо формували його фізичну модель. Досягнення даної мети можливо з використанням адитивних технологій, зокрема 3D друку, тому робота по відпрацюванню раціональних режимів цього процесу і встановленню загальних закономірностей впливу на структуру та властивості 3D виробів процесу та параметрів 3D друку, а також розробка нових витратних матеріалів для адитивного формування тривимірних моделей з функціональними властивостями є **актуальною**, а її **практична доцільність** є беззаперечною.

Оцінюючи найважливіші здобутки дисертаційного дослідження, варто вказати на результати, що серед багатьох досягнень даної роботи мають найбільше **наукове значення** і найбільш вагому **новизну**, а саме:

- 1) Вперше виявлено зміни у фазовій структурі полілактиду при 3D друці по технології FDM.
- 2) Встановлено закономірності впливу процесу FDM 3D друку на структуру та властивості отриманих 3D об'єктів із полілактиду, які дають можливість направлено керування характеристиками кінцевих виробів.
- 3) Досліджено закономірності впливу сегрегованого розподілу дисперсного електропровідного наповнювача та його об'ємного вмісту на формування електропровідної фази в мікрокомпозитах, філаментах на їх основі та 3D виробках з них.

4) Визначено ефективний вміст нанорозмірного наповнювача (срібла) зі статистичним розподілом в полімерній матриці нанокompозитів, філаментів на їх основі та 3D виробів з них, що в результаті володіють антимікробною та протівірусною активністю.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт відділу «Зварювання пластмас» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України за темами відомчого замовлення НАН України, конкурсної програми Національного фонду досліджень України, міжнародного білатерального польсько-українського проєкту спільної програми міжнародного співробітництва ПАН-НАН України та діяльності міжнародної польсько-української науково-дослідної лабораторії ADPOLCOM, у яких авторка приймала активну участь.

**Зміст та структура дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота містить усі необхідні елементи та складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 179 найменувань та 4 додатків, в яких зокрема надані акти про апробацію результатів роботи. Обсяг основного тексту дисертації відповідає вимогам до кандидатських дисертацій і складає 149 сторінок, що містять 19 таблиць та 74 рисунки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й основні завдання дослідження, описані об'єкт і предмет дослідження, методи досліджень, висвітлено наукову новизну та практичну значимість одержаних результатів. Відзначено особистий внесок авторки, наведено відомості про апробацію результатів та публікації за темою дисертаційної роботи.

У **Розділі 1** авторкою проведено аналіз сучасного стану та класифікацію технологій 3D друку виробів із полімерних матеріалів. Визначено, що найбільш універсальною та поширеною технологією адитивного виробництва

в світі є моделювання методом пошарового наплавлення (англ. Fusing Deposition Modeling, FDM). Розглянуто матеріали, які можуть бути використані при формуванні 3D виробів за даною технологією та проведена аналітична оцінка наукових робіт з дослідження впливу на властивості витратних матеріалів (філаментів) на основі полімерних композитів різних способів їх виготовлення, а також їх якісного і кількісного складу.

На основі проведеного аналізу сучасного стану відповідних досліджень здобувачкою сформульовано мету і завдання роботи, а також об'єкт і предмет дослідження.

**Розділ 2** дисертаційної роботи традиційно включає методичну частину роботи, в якій авторкою наведено характеристики використаних матеріалів, опис експериментального обладнання та параметрів 3D друку по технології FDM, опис технології формування мікрокомпозитів (а також філаментів та 3D виробів з них) з сегрегованим розподілом мікронаповнювача та нанокомпозитів (філаментів та 3D виробів з них) із рандомізованим розподілом нанопоповнювача в полілактидній матриці. Наведено опис методик дослідження структур та властивостей отриманих композитів, філаментів і 3D виробів, а саме 3D комп'ютерна томографія, ширококутове розсіювання рентгенівських променів, оптична та трансмісійна електронна мікроскопія, вимірювання електропровідності на постійному струмі, механічні дослідження на одновісний розтяг та динамічний механічний аналіз, диференціальна сканувальна калориметрія, термогравіметричний аналіз.

У **Розділі 3** дисертації на основі представлених результатів математичного моделювання теплових процесів під час адитивного формування виробів за FDM технологією 3D друку та теоретичних даних були вибрані найбільш вагомні параметри і проведені експериментальні дослідження їх впливу на формування, структуру та властивості кінцевих виробів та описані результати. Встановлено, що найбільш сприятливими умовами для формування напівкристалічної структури в полілактиді, а отже виробів з підвищеними експлуатаційними характеристиками, є умови, що забезпечують

повільний нагрів філаменту в філь'єрі екструдера 3D принтера до плавлення і повільне його охолодження в сформованому виробі. За результатами проведених експериментів були розроблені технологічні рекомендації для адитивного формування виробів з прогнозованими показниками механічних властивостей 3D об'єктів, роздільної здатності поверхні та часових витрат при їх виробництві.

У **Розділі 4** дисертації наведені результати дослідження особливостей формування полімерних мікрокомпозитів на основі полілактиду і технічного вуглецю, розроблених з них електропровідних філаментів та створених 3D виробів з них. Для визначення просторового розподілу частинок ( $d=30$  мкм) провідного дисперсного наповнювача різної концентрації (1% об.; 2,5% об.; 5% об. та 7% об.) в полілактидній матриці (розмір частинок  $d=200-400$  мкм) проведено комп'ютерне моделювання структури сегрегованих мікрокомпозитів за геометричною моделлю Мамуна. Близькість змодельованих структур до структури реальних зразків підтверджено оптичною мікроскопією сформованих мікрокомпозитів, філаментів та 3D виробів. Визначені основні закономірності впливу об'ємного вмісту та розподілу мікронаповнювача на властивості (електропровідність, механічні характеристики та теплофізичні властивості) отриманих композитних матеріалів та виробів.

**Розділ 5** присвячений дослідженням полімерних наноккомпозитів на основі полілактиду та наночастинок срібла, розроблених з них філаментів для 3D друку виробів з антимікробною та противірусною активністю та сформованих 3D виробів. На підставі результатів проведеного моделювання вмісту і просторового розподілу наповнювача (наночастинок Ag) в об'ємі полілактидної матриці встановлено, що при вмісті нанонаповнювача 4% мас. в полімерній матриці забезпечується отримання максимальної площі активної поверхні, яка безпосередньо впливає на антимікробні та противірусні властивості. Показано, що результати моделювання добре узгоджуються з результатами трансмісійної електронної мікроскопії розроблених матеріалів.

Проведені дослідження антимікробної та противірусної активності розроблених нанокомпозитних філаментів та 3D виробів з них, показали їх біологічну активність щодо штамів умовно-патогенних мікроорганізмів *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* та дріжджоподібних грибів *Candida albicans*, а також противірусну активність до аденовірусу людини 2 типу та вірусу грипу типу А – H1N1.

Завершується робота досить розгорнутими **висновками**, які впливають зі змісту роботи, є логічними і відображають основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

**Практичне значення дисертаційної роботи та впровадження її результатів.** Результати наукових досліджень, технологічні рекомендації, висновки, отримані в дисертації, були враховані і використані при виготовленні зразків промислової продукції. Високу ефективність розроблених режимів та параметрів 3D друку було підтверджено актами від міжнародної науково-дослідної лабораторії ADPOLCOM, ТОВ «ТТехнології» та ТОВ «РП Україна». Результати досліджень закономірностей впливу мікро- та нанорозмірного наповнювача на структуру та властивості сформованих 3D виробів характеризуються теоретичною та практичною значущістю і можуть бути використанні як наукова основа для визначення їх концентраційного вмісту та впорядкованого або випадкового розподілу в полімерній матриці для створення 3D виробів із необхідними властивостями.

Розроблені філаменти можуть бути практичного застосовані для адитивного формування функціональних виробів, зокрема з антимікробною та противірусною активністю для вирішення нагальних проблем медичної, харчової та сільськогосподарської промисловості.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій і їхня достовірність.** Представлені до захисту висновки і рекомендації є обґрунтованими і достовірними, що підтверджується результатами експериментів, при проведенні яких використовувались такі сучасні методи дослідження, як інфрачервона реєстрації температури при 3D

друці виробів, 3D комп'ютерна томографія, ширококутове розсіювання рентгенівських променів, оптична та трансмісійна електронна мікроскопія, вимірювання електропровідності на постійному струмі, механічні дослідження на одновісний розтяг у відповідності до вимог державного стандарту України та динамічний механічний аналіз, диференціальна сканувальна калориметрія та термогравіметричний аналіз. Також, в роботі використано математичне моделювання методом скінченних елементів та комп'ютерне моделювання.

Наукові положення і висновки, сформульовані в дисертації, обґрунтовані з наукової і технічної точки зору і підтверджуються їх практичною реалізацією.

**Повнота викладу основних результатів дисертації.** Результати роботи відображені у 21 опублікованій науковій праці, серед яких: 7 статей у фахових виданнях, 3 з яких входять до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS (1 з яких у журналі кuartилію Q1), 14 тез доповідей та матеріалів конференцій. Опубліковані результати у повній мірі відповідають положенням та змісту дисертаційної роботи та автореферату.

**Ідентичність змісту автореферату та основних положень дисертації.** Автореферат дисертації достатньо повно висвітлює результати досліджень, що наведені в дисертаційній роботі. Зміст дисертації та автореферату ідентичний.

**Зауваження та питання до матеріалу дисертації, автореферату та їх оформленню:**

1. В розділі 1 наведений перелік полімерних матеріалів, які використовуються в технологіях 3D друку. З метою обґрунтування вибору полімерної матриці для розвитку перспективних адитивних технологій бажано було б привести таблицю порівняльних фізико-механічних характеристик відомих стандартних, інженерних і високотехнологічних полімерних матеріалів.

2. При аналізі робіт по оптимізації властивостей мікрокомполімерів виникло питання, чому вміст дисперсних наповнювачів у складі

мікрокомпозитів, зокрема технічного вуглецю оцінюється в %об, а наночастинок срібла – %мас?

3. На рисунках 3.2, 3.18, 3.19, 4.7, 4.8 дисертації та 3 і 4 автореферату замість абсолютної величини теплового потоку варто було б використовувати відносну величину теплоємності, оскільки вона характеризує одну з теплофізичних властивостей безпосередньо самих матеріалів.

4. По всьому тексту дисертації автором почергово використовуються скорочення англійською та українською мовою. Варто було б наводити їх однією мовою.

5. Відсутні ключові слова в анотаціях автореферату, що, швидше за все, є технічною помилкою, оскільки в анотаціях дисертації вони наявні.

6. У тексті дисертації та авторефераті неодноразово, зайві рази повторюються визначення умовних скорочень, зокрема полілактид – PLA, СВ – англ. carbon black та ін., які вже попередньо визначені у переліку умовних скорочень та тексті.

Незважаючи на зауваження щодо оформлення дисертаційної роботи та автореферату, слід відмітити, що їх матеріал насичений результатами та викладений у послідовній, логічній формі.

Вказані зауваження не зменшують загальне позитивне враження від роботи і спрямовані лише на її подальший розвиток. Поставлені завдання успішно виконані за допомогою вдало підібраних і взаємно доповнюючих методів досліджень. Це робить встановлені закономірності і зроблені висновки повністю **достовірними**. Дисертація виконана й викладена на високому науковому рівні, містить великий обсяг нових систематизованих результатів, які є значним внеском для розширення можливостей по застосуванню технології FDM 3D друку і адитивного формування виробів з прогнозованими та функціональними властивостями, що має суттєве значення для застосування в різних сферах медицини, харчової промисловості, будівельної та сільськогосподарської галузей України.

## Висновок

З огляду на актуальність розглянутих матеріалів, важливість одержаних авторкою наукових результатів, їх новизну, ступінь обґрунтованості висновків, достовірність та практичну значимість вважаю, що дисертаційна робота Масючок Ольги Павлівни «Закономірності адитивного формування 3D виробів із полілактиду та композитів на його основі» є самостійною, оригінальною та завершеною науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що вирішують важливі та конкретні науково-технічні задачі. Назва та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології, як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень, сама робота відповідає вимогам п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» щодо кандидатських дисертацій, а її авторка Масючок Ольга Павлівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології.

### Офіційний опонент,

завідувач кафедри технологій природних і  
синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції  
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний  
університет», лауреат Державної премії України  
в галузі науки і техніки,  
доктор технічних наук, професор

О.В. Черваков

Підпис Червакова Олега Вікторовича засвідчую:

Вчений секретар ДВНЗ УДХТУ



Л.Л. Руднева