

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Тумарченко Лариси Олександрівни

на тему **«Оптимізація процесу виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення»**,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань **13 Механічна інженерія**

за спеціальністю **131 Прикладна механіка**

Актуальність теми дисертації.

Адитивне виробництво методом пошарового наплавлення (FDM) відкриває нові можливості для створення індивідуалізованих анатомічних моделей в ортопедичній хірургії, забезпечуючи швидке виготовлення складних геометричних форм, економічну доцільність процесу та гнучкість у реалізації персоналізованих медичних рішень. Зростання попиту на якісні анатомічні моделі для передопераційного планування, хірургічного тренінгу та комунікації з пацієнтами обумовлює необхідність подальшого розвитку та вдосконалення FDM-технології для медичних застосувань.

Відсутність комплексних, науково обґрунтованих технологічних рекомендацій щодо налаштування процесу FDM та постдрукарської обробки для медичних завдань створює потребу у розробці системного підходу до оптимізації технологічних параметрів.

Дисертаційна робота Тумарченко Л.О. вирішує актуальну науково-прикладну задачу оптимізації технологічних параметрів процесу FDM для виконання різноспрямованих клінічних потреб. Завдяки оптимізації параметрів процесу FDM відповідно до конкретних вимог медичного застосування показана можливість оптимального балансу між точністю, якістю поверхні та часом виготовлення анатомічних моделей як для невідкладних випадків з мінімізацією часу виробництва, так і планових втручань з вимогами високої точності відтворення. Це дозволяє підвищити якість медичних виробів, адаптувати адитивне виробництво до клінічних завдань і сприяє розвитку прикладної механіки у контексті біомедичних застосувань.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше встановлено комплексні закономірності впливу основних параметрів процесу FDM на розмірну точність, шорсткість поверхні, пористість та час виготовлення моделей з акрилонітрилбутадієнстиролу (ABS+), модифікованого поліетилентерефталату (CoPET) та поліаміду-6 (РА6, нейлону). Це дозволило провести оптимізацію параметрів процесу FDM відповідно до вимог, які висуваються до анатомічних моделей, які використовуються в ортопедичній хірургії.

2. Удосконалено уявлення про взаємозалежний вплив параметрів процесу FDM та термічної обробки на якість анатомічних моделей. Обґрунтовано необхідність урахування комплексної дії технологічних параметрів при проєктуванні процесу виготовлення, що сприяє підвищенню ефективності використання анатомічних моделей у клінічній практиці ортопедичної хірургії.

3. Отримано подальший розвиток уявлення про оптимальні параметри процесу FDM, залежно від вибраного термопластичного матеріалу та вимог до моделі в конкретному клінічному сценарії. Це дозволило сформулювати обґрунтовані технологічні рекомендації щодо підбору матеріалу, параметрів процесу FDM та термічної обробки анатомічних моделей для різних етапів хірургічного планування та навчання.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційного дослідження чітко сформульована й логічно викладена з належним розкриттям змісту. Сформульовані авторкою положення є обґрунтованими і відповідають цілям та завданням дисертаційної роботи. Теоретичні положення й практичні рекомендації підтверджуються результатами комплексних експериментальних досліджень, що забезпечує надійну верифікацію та практичну значущість отриманих результатів.

Таким чином, науково-прикладна задача щодо оптимізації процесу виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення з урахуванням клінічних вимог до точності, якості поверхні та часу виготовлення виконана в повному обсязі, а здобувачка

продемонструвала високий рівень володіння методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувачки Тумарченко Л.О. повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 131 Прикладна механіка галузі знань 13 Механічна інженерія та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Прикладна механіка». Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені в ній результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувачки у відповідний науковий напрям.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Тумарченко Лариси Олександрівни є результатом самостійних досліджень здобувачки 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. Наведені в дисертаційній роботі відомості та представлені дисертанткою результати досліджень логічно розподілені на окремі розділи. Структура дисертаційної роботи забезпечує можливість чітко зрозуміти послідовність етапів виконання досліджень. Сутність дисертаційної роботи представлена послідовно з використанням загальноприйнятої технічної термінології, що сприяє повному розумінню наведених результатів досліджень.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та 7 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 197 сторінок, у тому числі основного тексту дисертації 163 сторінки, 67 рисунків, 39 таблиць, 7 додатків і список використаних джерел із 92 бібліографічних найменувань.

У вступі розкрита і обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та завдання дослідження, які необхідно виконати

для досягнення мети роботи, приведені основні методи дослідження, представлені наукова новизна та практична цінність.

Перший розділ дисертації присвячено обґрунтуванню доцільності використання анатомічних моделей у сучасній хірургічній практиці. Докладно сформульовано критерії до їх точності, якості поверхні, строків виготовлення та функціональних можливостей. Автор здійснює глибокий аналіз сучасних адитивних технологій, зосереджуючи увагу на перевагах FDM для клінічних застосувань, передусім у ортопедії. Окрему увагу приділено перспективам дослідження термопластичних матеріалів та оптимізації параметрів процесу FDM з метою отримання анатомічних моделей високої якості. Описано основні підходи до постдрукерської обробки моделей, що сприяють підвищенню експлуатаційних характеристик друкованих виробів та їх відповідності медичним вимогам. На основі проведеного аналізу сформовано мету та завдання роботи.

У другому розділі представлена методика проведення досліджень. Розділ містить детальний опис методики дослідження розмірної точності, шорсткості поверхні, пористості та механічних характеристик виробів. Значну увагу приділено обґрунтуванню вибору експериментальних планів – дробно-факторних, повнофакторних та планів Бокса-Бенкена, що дозволило ефективно проаналізувати вплив десяти технологічних параметрів процесу FDM. Також висвітлено процедури оптимізації параметрів із використанням сучасних математичних методів, зокрема метод послідовного квадратичного програмування та алгоритм диференційної еволюції. Розроблений методологічний комплекс забезпечує достовірність результатів та створює підґрунтя для встановлення закономірностей впливу параметрів FDM на якість анатомічних моделей, а також для розробки технологічних рекомендацій.

Третій розділ містить результати експериментальних досліджень, спрямованих на визначення комплексного впливу параметрів процесу FDM на якісні властивості анатомічних моделей (точність, шорсткість, пористість та час друку), виготовлених із термопластичних матеріалів. На основі проведених експериментів розроблено регресійні моделі, що забезпечують можливість прогнозування та оптимізації параметрів процесу FDM відповідно до конкретних вимог медичного застосування, дозволяючи досягти оптимального балансу між точністю, якістю поверхні та часом виготовлення анатомічних моделей. В межах розділу виявлено основні чинники, які

найбільше впливають на кінцеві властивості виробів, а також проаналізовано взаємодії між параметрами процесу FDM, зокрема синергетичні ефекти їх поєднання. Окрема частина присвячена особливостям термообробки поліаміду-6, за результатами якої отримано дані про зміну міцності та пластичності залежно від температурного профілю, тривалості нагрівання й методу охолодження моделі.

Четвертий розділ присвячений комплексній оптимізації параметрів процесу FDM для двох різних клінічних застосувань: невідкладних випадків (з акцентом на мінімізацію часу виробництва) та планових втручань (з пріоритетом високої точності відтворення). Авторкою визначено оптимальні комбінації параметрів процесу, що гарантують дотримання заданих меж для розмірних відхилень, шорсткості поверхні та тривалості виготовлення. Сформовано технологічні рекомендації стосовно підбору матеріалів та налаштувань процесу FDM відповідно до клінічного запиту. Валідацію побудованих регресійних моделей та адекватність обраних критеріїв оптимізації в умовах реального 3D-друку здійснено через виготовлення трьох анатомічних моделей четвертого поперекового хребця з різними налаштуваннями (оптимізованими під швидкість, точність та неоптимізованими параметрами). Використання оптимізованих режимів забезпечило досягнення як найкоротшого циклу виробництва при збереженні необхідної якості, так і максимальної геометричної точності за рахунок відповідного збільшення часових витрат, що підтверджує можливість гнучкого налаштування параметрів процесу FDM відповідно до специфічних вимог клінічної або промислової практики.

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 дисертаційної роботи висвітлені в 4 статтях у наукових виданнях, що включені до переліку наукових фахових видань України, з яких 1 стаття у періодичному науковому виданні, яке індексується у міжнародних наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus. Апробація отриманих результатів відбулася на науково-технічних конференціях національного та міжнародного рівнів, а також

міжнародному науковому конгресі. При підготовці дисертації авторка дотримувалась принципів академічної доброчесності. Публікації здобувачки мають достовірну наукову базу та є результатом самостійних досліджень. Наукові положення та висновки дисертації, що виносяться на захист, належать здобувачці і повністю висвітлені у її наукових публікаціях.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Незважаючи на детальне дослідження впливу параметрів FDM на якісні характеристики виробів з ABS+, CoPET та PA6, у роботі відсутній системний компаративний аналіз характеру виявлених залежностей між досліджуваними матеріалами. Побудова окремих регресійних моделей для кожного матеріалу, хоча й забезпечує локальну точність, обмежує можливості узагальнення отриманих результатів та знижує їх прикладну цінність для прогнозування поведінки нових матеріалів. Доцільним було б розробити уніфіковану математичну модель, що враховує як технологічні параметри процесу, так і властивості матеріалу як додатковий фактор, що дозволило б розширити область застосування отриманих результатів на ширший спектр полімерних матеріалів.

2. У дисертаційній роботі для оцінки значущості факторів використано як дисперсійний аналіз, так і діаграми Парето. Оскільки обидва методи по суті ілюструють однакову інформацію щодо впливу факторів на вихідні характеристики, доцільно було б чітко розмежувати їхні функціональні призначення у тексті або зосередитися на одному з них. Це дозволило б уникнути дублювання інформації та зробити виклад більш лаконічним і цілеспрямованим.

3. Валідація побудованих математичних моделей виконана лише на одному типі анатомічної моделі – хребці L4. З метою підтвердження універсальності запропонованих моделей та технологічних рекомендацій доцільним було б здійснити валідацію для анатомічних об'єктів різної складності та геометричних параметрів.

Однак, наведені зауваження не є визначальними та не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів роботи, не впливають на загальну позитивну оцінку представленої дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що представлена дисертаційна робота здобувачки ступеня доктора філософії Тумарченко Лариси Олександрівни на тему «Оптимізація процесу виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення» 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 13 Механічна інженерія. 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.

Здобувачка Тумарченко Лариса Олександрівна у повній мірі заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Офіційний опонент:

доцент кафедри ракетно-космічних
та інноваційних технологій
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара,
кандидат технічних наук, доцент



Олена КАРПОВИЧ

