

РЕЦЕНЗІЯ

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.

Персоналізовані анатомічні моделі відіграють важливу роль у сучасній ортопедичній хірургії, зокрема у передопераційному плануванні, тренуванні хірургів, комунікації з пацієнтами та валідації нових медичних технологій. Серед адитивних технологій метод пошарового наплавлення (FDM) вирізняється доступністю та економічною доцільністю, однак характеризується високою варіабельністю якісних показників виробів. Невирішеними залишаються питання науково обґрунтованого вибору параметрів процесу (висоти шару, швидкості друку, щільності заповнення, температурних режимів тощо) та постдрукарської термообробки для поширених термопластів (ABS+, CoPET, PA6) з урахуванням їх специфічних властивостей. Відсутність уніфікованих критеріїв та методик обумовлює непередбачуваність геометричної точності, шорсткості поверхні, пористості, механічних властивостей і часу виготовлення, що ускладнює досягнення оптимального балансу між швидкістю та якістю у різних клінічних сценаріях.

Усунення зазначених методичних та технологічних прогалин є важливим для підвищення надійності та безпеки передопераційного планування, скорочення термінів підготовки, зниження витрат і забезпечення широкої доступності персоналізованої медичної допомоги. У цьому контексті дисертаційна робота Лариси Тумарченко, присвячена оптимізації процесу виготовлення анатомічних моделей методом пошарового наплавлення з урахуванням клінічних вимог, є актуальною та відповідає сучасним науково-технічним пріоритетам розвитку адитивного виробництва, а також запитам клінічної практики на відтворювану й стандартизовану якість анатомічних моделей.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукові результати дисертаційної роботи є методично обґрунтованими та логічно виведеними з чітко окресленої проблематики. Вихідні вимоги сформовано з огляду на клінічні критерії придатності анатомічних моделей до застосувань в ортопедичній хірургії: допуски на розмірні відхилення,

шорсткість поверхні, пористість, тривалість виготовлення та необхідні механічні властивості. Здобувач коректно пов'язує ці критерії з технологічними змінними процесу пошарового наплавлення та параметрами термічної обробки, що забезпечує адекватний вибір функцій відгуку і обмежень. Набір досліджуваних факторів охоплює ключові параметри FDM (висота шару, швидкість, щільність заповнення, екструзійний множник, температурні режими тощо) і режими постдрукерської термообробки з урахуванням особливостей застосовуваних термопластів, а дослідні діапазони відповідають реальним умовам медично-інженерної практики. Побудова регресійних моделей для зв'язку між параметрами процесу та показниками якості, а також застосування сучасних процедур оптимізації (зокрема SLSQP і диференційної еволюції) узгоджені з метою дослідження і дають змогу системно шукати компроміс між швидкістю виготовлення та якістю відповідно до клінічних сценаріїв.

Достовірність одержаних висновків підтверджується комплексністю експериментальних досліджень, використанням стандартизованих методик вимірювань і коректною статистичною верифікацією моделей. У роботі показано узгодженість прогнозів з експериментом у межах досліджених діапазонів факторів і матеріалів; межі застосовності моделей окреслено коректно, що унеможливорює їх некоректну екстраполяцію. Важливою складовою є предметно-орієнтована валідація на реальному анатомічному об'єкті (модель хребця L4), яка засвідчила придатність запропонованих налаштувань як у режимах мінімізації часу за умови прийнятної якості, так і в режимах досягнення максимальної точності з відповідним збільшенням тривалості процесу.

Наукова новизна дисертації полягає у системній формалізації та кількісному описі комплексних залежностей між клінічними вимогами до анатомічних моделей і керувальними параметрами процесу пошарового наплавлення та термічної обробки. Вперше у клінічно релевантних діапазонах встановлено вплив основних технологічних змінних та їхніх взаємодій на розмірну точність, шорсткість поверхні, пористість і тривалість виготовлення, що створює підґрунтя для цілеспрямованого проектування процесу відповідно до потреб ортопедичної хірургії. Удосконалено уявлення про взаємозалежну дію параметрів FDM і режимів термічної обробки та обґрунтовано необхідність їх комплексного врахування під час планування технології. На цій основі подальшого розвитку набули підходи до вибору оптимальних режимів друку залежно від обраного термопластичного матеріалу і конкретного клінічного сценарію, що дозволило сформувати обґрунтовані технологічні рекомендації щодо підбору матеріалу, параметрів FDM і термообробки для різних етапів хірургічного планування та навчання.

Сукупно це свідчить про те, що результати дослідження є науково обґрунтованими, достовірними і містять релевантну новизну для сучасних завдань прикладної механіки, пов'язаних із моделюванням та оптимізацією процесів адитивного виробництва для медичних застосувань.

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

Дисертація справляє враження цілісної, технічно насиченої та добре скомпонованої наукової праці. Логіка викладу витримана: від чітко окресленої проблематики і потреб клінічної практики – до побудови методичної бази, експериментального дослідження, математичного моделювання, оптимізації та прикладної валідації.

За обсягом і наповненням робота відповідає вимогам до кваліфікаційних праць: 197 сторінок загального обсягу (з них 163 сторінки основного тексту), 67 рисунків, 39 таблиць, 7 додатків та 92 джерела.

У вступі обґрунтовано актуальність у контексті завдань ортопедичної хірургії та розвитку адитивного виробництва, послідовно сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет, визначено методи, що забезпечує прозорість подальшої постановки.

Перший розділ містить аналіз сучасного стану виробництва анатомічних моделей. У ньому систематизовано сфери їх застосування та відповідні вимоги до якості, висвітлено технології виготовлення для потреб ортопедичної хірургії з акцентом на методі пошарового наплавлення (FDM). Проаналізовано вплив параметрів процесу FDM на точність, шорсткість, пористість та тривалість друку. Розглянуто особливості термопластичних матеріалів ABS+, CoPET і PA6, а також методи постдрукарської обробки, спрямовані на досягнення заданих показників якості. Важливо, що проведений огляд не обмежується констатацією відомих ефектів, а чітко ідентифікує наукову нішу – відсутність системної кількісної ув'язки клінічних вимог з параметрами процесу FDM та термообробки.

Другий розділ подає матеріали та методики проведення досліджень. Викладено процедуру виготовлення виробів методом FDM, наведено підхід до планування експериментів та оброблення результатів, який передбачає формування факторних планів, перетворення коефіцієнтів регресійних рівнянь у натуральні значення та оцінювання адекватності побудованих моделей. Подано методики визначення показників якості, зокрема шорсткості поверхні, механічних властивостей, точності та пористості виробів. Окреслено підхід до термічної обробки та сформульовано процедуру оптимізації параметрів процесу FDM з урахуванням встановлених критеріїв та обмежень.

Третій розділ присвячено дослідженню впливу параметрів процесу FDM та термічної обробки на ключові показники якості. Встановлено залежності тривалості друку, шорсткості поверхонь і розмірної точності у напрямках X, Y, Z від технологічних налаштувань процесу. Досліджено закономірності формування пористості, а також оцінено зміну механічних властивостей виробів після термічної обробки. За результатами дослідження встановлено комплексні закономірності та взаємодії між параметрами процесу FDM і термічної обробки, що обґрунтовує необхідність їх інтегрованого врахування під час проєктування технологічного процесу та здійснення подальшої оптимізації.

Четвертий розділ присвячено оптимізації параметрів процесу FDM для виготовлення анатомічних моделей. Виконано оптимізацію за критеріями тривалості 3D-друку та розмірної точності та встановлено оптимальні значення параметрів. На цій основі сформовано практичні рекомендації щодо вибору матеріалу, налаштувань FDM і необхідності термообробки. Валідація на реальному анатомічному об'єкті (модель хребця L4) підтверджує керованість процесу та досяжність цільових показників залежно від сценаріїв виготовлення моделей.

Дослідження характеризується високим рівнем завершеності. Усі поставлені завдання виконані. Зокрема реалізовано повну експериментальну програму на репрезентативних матеріалах, побудовано та верифіковано багатофакторні моделі, інтегровано їх у цілісну процедуру технологічного планування з урахуванням клінічних обмежень та проведено прикладну перевірку на анатомічному прикладі.

За результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги (звіт подібності) встановлено, що дисертація Тумарченко Лариси Олександрівни є результатом самостійних досліджень здобувача. Ознак фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату чи несанкціонованих запозичень не виявлено. Ідеї, результати та фрагменти текстів інших авторів, які використані в роботі, належним чином процитовано з посиланням на відповідні джерела.

Мова та стиль викладення результатів.

Мова та стиль викладення результатів відповідають вимогам наукового письма. Текст характеризується чіткістю формулювань, логічною послідовністю викладу та витриманим науковим стильовим реєстром із переважанням безособових конструкцій (проведено, встановлено, показано). Термінологія, що застосовується в роботі вжита коректно. Використовуються поняття, які пов'язані з процесом FDM, термічною обробкою та показниками якості (тривалість друку, шорсткість, розмірна точність у напрямках X, Y, Z, пористість). Це, в свою чергу, забезпечує однозначність трактування

результатів. Переходи між підрозділами є плавними, а висновки локально підсумовують наведені дані й коректно співвідносяться з метою та завданнями дослідження.

Подання матеріалу є структуровано-інформативним. Зокрема ілюстративні матеріали та таблиці мають змістовні підписи й належні посилання в тексті а математичні моделі супроводжено необхідними поясненнями символів. Баланс між описовою частиною та кількісним аналізом збережено. Інтерпретації результатів подано виважено, без надмірної категоричності.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Результати дослідження пройшли апробацію та фахове обговорення на наукових форумах різного рівня, зокрема на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях та науковому конгресі, де було представлено основні положення дисертації. За тематикою роботи підготовлено шість публікацій. З них чотири статті у фахових виданнях України (серед яких одна – у періодичному виданні, що індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus) та дві тези доповідей. Таким чином, отримані результати набули належного публічного висвітлення у національному та міжнародному науковому просторі.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У підрозділі 1.1 огляд галузей застосування анатомічних моделей поданий надто широко та значною мірою виходить за межі головних завдань дисертації. Істотна частина викладу присвячена застосуванням анатомічних моделей у навчанні, комунікації з пацієнтами та інших клінічних напрямках, які далі у роботі не аналізуються експериментально й не визначають постановку задач оптимізації процесу FDM. Така широта розмиває фокус дослідження і послаблює логічний зв'язок між оглядом літератури, обґрунтуванням вибору технологічних рішень і методикою експериментів. Доцільно суттєво скоротити загальний міждисциплінарний огляд, зосередивши підрозділ на потребах ортопедичної хірургії.

2. У розділі 3 дисертації авторка послідовно встановлює статистично значущі закономірності впливу параметрів процесу FDM на точність, шорсткість, пористість і час друку, що підтверджено дисперсійним аналізом і побудовою регресійних моделей. Водночас ряд пояснень, якими супроводжується інтерпретація отриманих залежностей (зокрема твердження про неоднорідне ущільнення матеріалу на межі між периметрами, зниження якості з'єднання при великих висотах шару, роль переповнення/недоекструзії

тощо), подано у вигляді обґрунтованих, але все ж гіпотез і не має прямої експериментальної верифікації на шляхом дослідження структури матеріалу. посилення причинно-наслідкової аргументації доцільно доповнити наведені статистичні моделі незалежними спостереженнями структури зразків і зв'язати виявлені ефекти з підтвердженими механізмами переносу тепла й маси та дифузійного зрощення полімерних волокон. Зокрема, у підрозділі 3.3, присвяченому пористості, корисним було б, окрім гравіметричної оцінки, провести дослідження формування міжшарової адгезії як ключового структуроутворювального чинника й таким чином кількісно оцінити якість з'єднання між суміжними нитками та шарами. Крім того, визначення пористості методом гідростатичного зважування забезпечує лише її інтегральне значення і погано відображає анізотропію та розподіл відкритих/закритих пор у FDM-виробах, що критично для міцності й клінічної функціональності тонкостінних моделей. Доцільно було б додати підтвердження за допомогою інших методів досліджень, що забезпечують детальний аналіз розміру та морфології пор.

3. У роботі не визначено діапазон геометричних розмірів, для якого запропоновані моделі впливу параметрів та рекомендовані налаштування параметрів процесу є коректними. Доцільно чітко задати область застосовності: вказати граничні розміри моделей (наприклад, інтервал довжини/висоти, допустимі мінімальні перетини та тонкостінні елементи) і визначити, чи поширюються висновки на повномасштабні сегменти кісток, дрібні анатомічні структури та хірургічні гідри. Слід також надати аргументацію або валідаційні приклади масштабної інваріантності чи, навпаки, показати зміни точності, шорсткості та пористості при переході між типорозмірами з відповідними корективами параметрів друку.

4. Термообробка й механічні властивості опрацьовані лише для матеріалу PA6, водночас для ABS+ і CoPET відсутня експериментальна механіка. Це залишає технологічні рекомендації неповними для двох третин досліджуваних матеріалів.

5. Клінічне підтвердження отриманих результатів обмежено лише виготовленням трьох зразків хребця L4 з різними налаштуваннями. Це корисно, але замало для клінічної узагальнюваності. Бажано б мати оцінку з боку хірургів, перевірити збирання багатокомпонентних моделей та сумісності з інструментами, стерилізації/очищення та біосумісності матеріалів.

6. Авторка детально досліджує FDM, але практично не порівнює отримані результати з іншими адитивними методами, які також використовуються для виготовлення анатомічних моделей (SLA, SLS, PolyJet

тощо). Це дещо ускладнює оцінку того, наскільки обґрунтованим є вибір саме FDM для заявлених клінічних сценаріїв.

Водночас слід зауважити, що 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.

Вище наведене дозволяє стверджувати, що представлена дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Тумарченко Лариси Олександрівни на тему «Оптимізація процесу виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення» виконана на високому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, а сукупність її теоретичних та практичних результатів розв'язує важливе наукове завдання, яке має суттєве значення для галузі знань Механічна інженерія. За своєю актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною представлена дисертаційна робота 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 доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

За змістом, рівнем наукової новизни, обґрунтованістю і достовірністю отриманих результатів та їх практичною цінністю дисертаційна робота Тумарченко Л.О. відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка, а її авторка у повній мірі заслуговує на присудження цього ступеня.

Рецензент:

доцент кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка», кандидат технічних наук, доцент



Руслан КУЛИКОВСЬКИЙ