

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Національного університету

«Запорізька політехніка», д.т.н., проф.

Вадим ШАЛОМЄЄВ



2025 р.

ВИТЯГ

з протоколу №12

розширеного засідання кафедри технології машинобудування машинобудівного факультету Національного університету «Запорізька політехніка» (НУ «Запорізька політехніка»)

від « 19 » червня 2025 р.

ПРИСУТНІ:

Головуючий на засіданні – Дядя С. І. – завідувач кафедри технології машинобудування, к.т.н., доцент;

Секретар – Козлова О. Б., доцент кафедри технології машинобудування.

5 співробітників кафедри технології машинобудування:

Гончар Н. В. – доцент кафедри технології машинобудування, канд. техн. наук, доцент;

Степанов Д. М. – доцент кафедри технології машинобудування, канд. техн. наук, доцент;

Тришин П. Р. – доцент кафедри технології машинобудування, д-р філософії, доцент;

Вишнепольський Є. В. – доцент кафедри технології машинобудування, канд. техн. наук, доцент;

Пухальська Г. В. – доцент кафедри технології машинобудування, канд. техн. наук, доцент;

3 запрошених:

Капустян О. Є. – завідувач кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, канд. техн. наук., доцент;

Міщенко В. Г. – професор кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, д-р. техн. наук, професор;

Лаптева Г. М. – доцент кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій, канд. техн. наук, доцент;

ПОРЯДОК ДЕННИЙ

1. Про попередній розгляд дисертації аспірантки кафедри технології машинобудування Тумарченко Лариси Олександрівни на тему «Оптимізація процесу виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення» (науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент Є. В. Вишнепольський).

СЛУХАЛИ: Доповідь аспірантки Л. О. Тумарченко по завершенню дисертаційної роботи.

ПИТАННЯ: Під час обговорення учасники засідання поставили доповідачу 13 запитань.

Міщенко В. Г.: Яким методом проводилися вимірювання пористості та шорсткості анатомічних моделей?

Тумарченко Л.О.: Пористість матеріалів визначалась методом гідростатичного зважування, що дозволяє встановити об'ємну густину зразків шляхом порівняння мас у повітрі та у рідкому середовищі, після чого розраховується пористість за різницею з теоретичною густиною матеріалу.

Шорсткість поверхні оцінювалася з використанням контактного профілографа.

Міщенко В. Г.: Який відсоток усадки спостерігається після термічної обробки зразків?

Тумарченко Л.О.: У рамках даного дослідження усадка після термічної обробки не вимірювалася, оскільки основна увага зосереджувалась на аналізі зміни механічних властивостей.

Дядя С. І.: Для яких саме органів були виготовлені анатомічні моделі у межах дослідження?

Тумарченко Л.О.: У межах дослідження як приклад застосування в ортопедичній хірургії були виготовлені анатомічні моделі хребців поперекового відділу хребта.

Дядя С. І.: Чим обумовлені вимоги до виготовлення анатомічних моделей?

Тумарченко Л.О.: Вимоги до виготовлення анатомічних моделей визначаються їх функціональним призначенням у клінічній практиці. Зокрема, моделі застосовуються для передопераційного планування, симуляцій хірургічних втручань, виготовлення пацієнт-специфічних імплантатів та хірургічних шаблонів. У зв'язку з цим встановлюються такі ключові вимоги: висока точність геометрії, що забезпечує відповідність моделі даним медичної візуалізації (КТ, МРТ); достатня гладкість поверхні, оскільки надмірна шорсткість може ускладнити встановлення інструментів або шаблонів і призвести до механічних пошкоджень, зокрема розшарування в зоні фіксації; оптимальна тривалість виготовлення, що є критичною при підготовці до екстрених втручань у стислі строки.

Козлова О. Б.: Як у дослідженні оцінювалася точність?

Тумарченко Л.О.: Точність оцінювалась на основі відносного відхилення лінійних розмірів, яке розраховувалося шляхом порівняння фактично виміряних з номінальними розмірами.

Козлова О. Б.: Чому для оцінки точності використовувалося відносне відхилення у відсотках?

Тумарченко Л.О.: Використання відносного відхилення у відсотках обумовлено необхідністю уніфікованої оцінки точності для елементів різного масштабу. Абсолютне відхилення не враховує розмір досліджуваного елемента, тоді як відносне відображає величину похибки стосовно розміру, що є більш інформативним для анатомічних структур різного масштабу.

Пухальська Г.В.: Рівняння регресійної моделі досить велике. Чи всі параметри є статистично значущими? Чому не були вилучені елементи з малими коефіцієнтами?

Тумарченко Л.О.: Оцінка статистичної значущості параметрів регресійної моделі проводилася на основі t-критерію Стьюдента для кожного коефіцієнта. До моделі були включені лише ті головні ефекти та взаємодії, які показали статистичну значущість на рівні довіри не менше ніж 95 %.

Щодо коефіцієнтів із малими числовими значеннями, вони не були вилучені, оскільки рівняння було приведено до натуральних змінних, тобто із кодованого вигляду виконано перехід до фізичних одиниць. Така трансформація призводить до масштабування коефіцієнтів, що природно зменшує їх числові значення, але не впливає на статистичну значущість або реальний вплив фактора в межах досліджуваного інтервалу. Отже, невеликі коефіцієнти не свідчать про незначущість, а є наслідком переходу до фізично інтерпретованої форми моделі.

Пухальська Г.В.: Як саме слід користуватись побудованим рівнянням регресійної моделі?

Тумарченко Л.О.: Для використання рівняння регресійної моделі задаються значення параметрів процесу у натуральних одиницях (наприклад, висота шару – 0,1 мм, щільність заповнення – 40 % тощо), після чого ці значення підставляються у відповідні змінні моделі для розрахунку прогнозованого результату.

Пухальська Г.В.: Чи побудовано узагальнену модель, яка б об'єднувала всі окремі моделі для різних матеріалів?

Тумарченко Л.О.: У межах даного дослідження узагальнена модель, яка б охоплювала всі матеріали, не створювалась, оскільки фізико-механічні властивості, термопластична поведінка, а також характер впливу параметрів FDM суттєво відрізняються залежно від матеріалу. Для кожного з матеріалів були побудовані окремі регресійні моделі, оскільки не лише значення коефіцієнтів, а й перелік значущих параметрів та характер їх впливу на точність, шорсткість і час друку істотно відрізняються. Це свідчить про недоцільність об'єднання таких моделей у єдину загальну формулу без втрати точності або інтерпретованості.

Тришин П.Р.: Що відображає графік відповідності прогнозованих значень спостережуваним (слайд 20)?

Тумарченко Л.О.: Графік показує, наскільки добре модель відтворює реальні експериментальні дані. Якщо точки розташовані близько до діагональної лінії, це означає, що розраховані значення добре збігаються з вимірними, і модель є точною.

Тришин П.Р.: Чи проводився кореляційний аналіз між вхідними параметрами?

Тумарченко Л.О.: Кореляційний аналіз не проводився, оскільки всі вхідні параметри задавалися вручну в програмному забезпеченні, без автоматичних прив'язок або внутрішньої корекції. Таким чином, варіювання кожного параметра здійснювалося незалежно.

Капустян О. Є.: У дослідженні щільність заповнення варіювалася в межах 20–100 %. Чи можна було використовувати менше ніж 20 %?

Тумарченко Л.О.: Так, технічно щільність можна зменшити до 10 % або навіть нижче. Проте в дослідженні мінімальне значення встановлено на рівні 20 % для забезпечення жорсткості зразків і стабільності друку. При менших значеннях зростає ризик провисання верхніх шарів та погіршення якості поверхні, що ускладнює подальші вимірювання.

Капустян О. Є.: Чи не дублюють за змістом пункти 2 і 3 наукової новизни? Як їх розмежувати?

Тумарченко Л.О.: Пункт 2 стосується взаємозалежного впливу параметрів процесу FDM і термічної обробки. Основна увага зосереджена на комплексній дії параметрів та їх взаємодії в рамках одного процесу виготовлення. Це дозволяє краще зрозуміти, як зміна одного параметра може посилювати або послаблювати вплив іншого на якість моделей.

Пункт 3 стосується підбору оптимальних параметрів залежно від матеріалу та клінічного сценарію застосування. Тут наголос зроблено на адаптації технологічних режимів до конкретних вимог.

ВИСТУПИЛИ: канд. техн. наук., доцент О. Є. Капустян відзначив актуальність поставленої проблеми, високий рівень роботи та глибоке теоретичне опрацювання питань, що досліджено в дисертації. Окремо було відзначено практичну значущість отриманих результатів.

Науковий керівник, кандидат технічних наук, доцент Є. В. Вишнепольський, який відзначив актуальність проведеного наукового дослідження, практичне і теоретичне значення одержаних результатів, виступив із позитивною оцінкою щодо розроблених технологічних рекомендацій з виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення. Науковий керівник надав позитивну характеристику особі здобувача та його науковій діяльності, відзначив широту набутих компетентностей та сформованих навичок дослідника. Було підкреслено, що дисертаційна робота відповідає вимогам щодо дисертацій доктора філософії за спеціальністю 131 – «Прикладна механіка» і може бути рекомендована до подання у разову спеціалізовану вчену раду на розгляд.

УХВАЛИЛИ: Прийняти такий висновок щодо дисертаційної роботи Л. О. Тумарченко.

ВИСНОВОК

наукового семінару кафедри технології машинобудування машинобудівного факультету НУ «Запорізька політехніка» про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації «Оптимізація процесу виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення» здобувача ступеня доктора філософії Лариси ТУМАРЧЕНКО за спеціальністю 131 Прикладна механіка (галузь знань 13 Механічна інженерія)

Актуальність теми дисертаційної роботи визначається сучасними тенденціями розвитку механічної інженерії, що супроводжуються широким впровадженням адитивних технологій у сферу біомеханіки. Зростаюча потреба в індивідуалізованих рішеннях для моделювання клінічних ситуацій зумовлює активне використання анатомічних моделей, які застосовуються для передопераційного планування, хірургічного тренінгу, комунікації з пацієнтами та апробації медичних технологій.

Серед методів адитивного виробництва особливе місце посідає технологія пошарового наплавлення (Fused Deposition Modelling, FDM), яка поєднує доступність, гнучкість і економічну доцільність. Утім, її застосування у клінічно орієнтованих задачах ускладнене варіативністю якості друку, недостатньою точністю відтворення, підвищеною шорсткістю поверхні та потребою у додатковій обробці моделей для відповідності медичним стандартам.

Окремою проблемою є необхідність урахування особливостей клінічного сценарію: для планових втручань критичним є забезпечення високої точності та якості поверхні, тоді як в екстрених випадках пріоритетною стає мінімізація часу виготовлення. Це зумовлює потребу у гнучкому підході до вибору параметрів процесу FDM та постдрукерської обробки з урахуванням конкретної клінічної задачі.

Незважаючи на активний розвиток досліджень у цій сфері, на сьогодні відчувається брак комплексних, науково обґрунтованих рекомендацій, що поєднують клінічні вимоги до анатомічних моделей із технічними можливостями адитивного виробництва.

Таким чином, дослідження, спрямоване на оптимізацію процесу виготовлення анатомічних моделей методом пошарового наплавлення для потреб ортопедичної хірургії, є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору, та сприяє розвитку прикладної механіки в контексті біомедичних застосувань.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні комплексних закономірностей впливу параметрів процесу пошарового наплавлення і термічної обробки на функціональні характеристики анатомічних моделей для ортопедичної хірургії. При цьому:

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 (PA6, 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 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.

Методи дослідження. У роботі застосовано комплексний підхід, що включає експериментальні, статистичні та чисельні методи дослідження. Оптимізація параметрів процесу виготовлення анатомічних моделей методом пошарового наплавлення здійснювалась на основі факторних планів експериментів. Вивчення впливу технологічних параметрів та термічної обробки проводилося шляхом оцінки точності, шорсткості поверхні, пористості та механічних властивостей зразків.

Обробка результатів здійснювалася з використанням регресійного і дисперсійно-го аналізів у програмному комплексі STATISTICA. Для пошуку оптимальних параметрів процесу застосовувались методи математичної оптимізації, зокрема послідовне квадратичне програмування (SLSQP) та диференційна еволюція (DE). Взаємозв'язки між параметрами процесу та характеристиками анатомічних моделей описано за допомогою багатфакторних математичних моделей, результати яких було експериментально верифіковано та валідовано.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розроблених науково обґрунтованих технологічних рекомендацій, спрямованих на забезпечення показників якості анатомічних моделей для ортопедичної хірургії відповідно до клінічних вимог щодо точності, шорсткості, пористості та часу виготовлення. Побудовані математичні моделі дають змогу прогнозувати якісні характеристики моделей (пористість, шорсткість, роз-мірна точність, тривалість друку) залежно від параметрів процесу FDM, що забезпечує обґрунтований вибір параметрів на етапі планування виготовлення анатомічних виробів у медичній практиці. Застосування результатів роботи сприяє підвищенню технологічної керованості процесу, зменшенню витрат часу та забезпеченню стабільної якості моделей для передопераційного планування та хірургічного навчання.

Впровадження результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес НУ «Запорізька політехніка» в межах викладання дисциплін «Теоретичні основи технології виготовлення деталей та складання машин» та «Методи та параметри формоутворення поверхонь деталей авіаційних двигунів» при підготовці фахівців за спеціальностями 131 «Прикладна механіка» та 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка». Результати роботи Тумарченко Л.О. отримали позитивний експертний висновок від лікарів медико-санітарної частини АТ «Мотор Січ» щодо їх високої наукової та практичної значущості та можливості ефективного застосування в ортопедичній хірургії, медичній освіті та промисловому виготовленні анатомічних моделей.

Повнота викладення матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок у них автора. Основні положення та результати дисертації опубліковано у 4 публікаціях, які розкривають основний зміст дисертації, зокрема опубліковано 4 статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (1 статтю включено до міжнародної наукометричної бази Scopus). Опубліковано 2 тез доповідей у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

Список публікацій Тумарченко Л. О., в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Тумарченко, Л., & Вишнепольський, Є. (2024). Забезпечення якості деталей з Nylon отриманих моделюванням методом наплавлення. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, 3, 39–47. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2024-3-6>
2. Тумарченко, Л., & Вишнепольський, Є. (2024). Оцінка впливу параметрів процесу Fused Deposition Modelling на пористість надрукованих деталей. Mechanics and Advanced Technologies, 8(3(102)), 302–309. [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.3\(102\).311016](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.3(102).311016)

3. Tumarchenko, L., Vyshnepolskyi, Y., & Pavlenko, D. (2025). Effect of heat treatment on the mechanical properties of nylon parts in additive manufacturing. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 121–128. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-2/121>

4. Тумарченко, Л., & Вишнепольський, Є. (2023). Вплив режимних параметрів моделювання методом наплавлення на час виготовлення деталей БПЛА. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, 4, 25–31. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2023-4-4> ¶

Оцінка мови та стилю дисертації. Дисертаційна робота є завершеним і цілісним дослідженням, її матеріал є досить добре структурованим і логічно викладеним. Роботу написано з використанням сучасної науково-технічної термінології. Оформлення дисертації відповідає встановленим вимогам до докторських дисертацій згідно «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а також вимогам МОН України до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Застосована в роботі наукова термінологія є загальновизнаною, стиль викладення наукових положень, результатів роботи та висновків логічний, обґрунтований та забезпечує доступність їх сприйняття та використання.

Апробація результатів дисертації. Результати наукових досліджень доповідались на Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих учених з міжнародною участю «Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології» (Запоріжжя, 21-22 листопада 2024р.); VI міжнародному науковому конгресі «Society of ambient intelligence 2023» (20-25 листопада 2023 р.); IEEE 10th International Conference «Nanomaterials: Applications & Properties» (09-13 листопада 2020 р.); the International Scientific and Technical Conference “Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering”– Synergetic Engineering (18-20 листопада 2022 р.).

УХВАЛИЛИ: з урахуванням зазначеного, на розширеному засіданні кафедри технології машинобудування НУ «Запорізька політехніка».

Дисертація Лариси ТУМАРЧЕНКО «Оптимізація процесу виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення» є завершеною науковою працею, у якій розв’язано актуальну науково-прикладну задачу оптимізації процесу виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення з урахуванням клінічних вимог до точності, якості поверхні та часу виготовлення.

У 4 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них 4 статті у наукових фахових виданнях України; 1 стаття у виданні України, яке входить до міжнародної наукометричної бази.

Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти,

наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44).

З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Лариси ТУМАРЧЕНКО дисертація «Оптимізація процесу виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення» рекомендується для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді.

Присутні на розширеному засіданні кафедри технології машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка» подають вченій раді закладу пропозицію щодо кандидатур до складу разової ради для розгляду та захисту дисертаційної роботи Лариси ТУМАРЧЕНКО у такому складі:

1. НАУМИК Валерій Владиленович, д.т.н., професор, професор кафедри «Машини та технологія ливарного виробництва» Національного університету «Запорізька політехніка» – голова ради;
2. КАРПОВИЧ Олена Володимирівна, к.т.н., доцент, доцент кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара – опонент;
3. КОНОНЕНКО Ганна Андріївна, д-р. техн. наук, професор кафедри конструювання, технічної естетики та дизайну Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» - опонент;
4. ТКАЧ Дар'я Володимирівна, к.т.н., доцент, доцент кафедри «Фізичне матеріалознавство» Національного університету «Запорізька політехніка» – рецензент;
5. КУЛИКОВСЬКИЙ Руслан Анатолійович, к.т.н., доцент, доцент кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка» – рецензент.

Результати голосування: за рекомендацію голосування дисертації Лариси Олександрівни Тумарченко «Оптимізація процесу виготовлення анатомічних моделей для ортопедичної хірургії методом пошарового наплавлення» до захисту – 10, проти – 0, утримались – 0.

Головуючий на засіданні,

завідувач кафедри технології машинобудування

кандидат технічних наук, доцент

Секретар,

доцент кафедри технології машинобудування



Сергій ДЯДЯ

Олена КОЗЛОВА