

## **ВІДГУК**

опонента Пасічника Віталія Анатолійовича  
на дисертаційну роботу Гаращенка Ярослава Миколайовича  
«Основи технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів при  
матеріалізації 3D-моделей адитивними методами»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.02.08 - технологія машинобудування

### **Актуальність теми.**

Адитивні технології мають переважні відмінності порівняно з конвенціональними технологіями, що в першу чергу визначається можливістю пошарового формоутворення виробів складної форми. Ефективність адитивних технологій значною мірою залежить від правильного вибору методу виготовлення та оптимізації технологічних параметрів процесу пошарового формоутворення. Незважаючи на те, що численні дослідження сприяли вдосконаленню цих процесів та їх технологічного підготовлення, залишається актуальною проблема ефективного (максимального) використання робочого простору. Не вирішеність комплексу науково-технічних завдань збільшує собівартість виробництва, особливо в контексті масового виготовлення індивідуалізованих виробів за допомогою адитивних технологій.

Для ефективного вирішення задач технологічного підготовлення слід науково обґрунтувати вибір та розробити методи, які дозволять оптимізувати процеси формоутворення з урахуванням складності виробів та особливостей використовуваних матеріалів. Дисертаційна робота, виконана на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ «ХП», присвячена вирішенню цих актуальних питань. Вона базується на результатах ряду держбюджетних науково-дослідних тем, що виконувалися з 2005 по 2023 роки, у яких здобувач брав особисту участь, будучи автором окремих розділів.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.**

Наукові положення, висновки та рекомендації, представлені в дисертаційній роботі Гаращенка Я.М., відзначаються високим ступенем обґрунтованості. Це

підтверджується детальним аналізом науково-технічної літератури з досліджуваної проблематики, чітким формулюванням мети та завдань дослідження, використанням сучасних методів дослідження, а також критичним розглядом отриманих результатів інших дослідників. Висновки є логічними та науково доведеними.

Теоретичні дослідження виконано із застосуванням сучасного математичного апарату, враховують особливості адитивних технологій, адитивних машин та супутнього технологічного обладнання, що використовуються в адитивному виробництві на даному етапі їх розвитку. Достовірність отриманих результатів підтверджується їхньою узгодженістю з раніше відомими формулами в межових умовах, що додатково підкреслює обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, викладених у дисертації.

#### **Достовірність результатів досліджень.**

Результати дисертаційного дослідження відзначаються високим рівнем достовірності, що підтверджується кількома ключовими аспектами. Передусім, це чітке формулювання та ґрунтовне обґрунтування математичних задач, що демонструє науковість підходу. Використання сучасних методів математичного аналізу та алгоритмів в першу чергу для вирішення складних обчислювальних задач (NP-задач) обумовлює наукову значущість дослідження. Розроблені математичні моделі достатньо адекватно відображають реальні фізичні процеси, що є важливим для забезпечення надійності та валідності отриманих результатів.

Практичне значення роботи підтверджено успішним впровадженням наукових розробок автора в умовах промислового виробництва. Результати дослідження знайшли ефективне застосування у виробничих циклах адитивного виготовлення продукції на кількох провідних підприємствах України. Це не лише підтверджує актуальність і корисність дослідження, а й свідчить про його важливий внесок у розвиток вітчизняного виробництва та впровадження інноваційних технологій.

**До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

- єдину методологію статистичного аналізу вихідної полігональної (триангульованої), похідної воксельної, та результуючої пошарової 3D-моделей виробу чи групи виробів;
- наукові основи оцінки технологічності конструкції виробів шляхом аналізу

триангуляційної, воксельної та пошарової 3D-моделі за наступними складовими складності виробу: геометричної, структури матеріалів, ієрархічної та функціональної, що дозволяє забезпечити науково обґрунтовану оцінку відповідності конструкторських вимог до вибраної стратегії виготовлення;

- математичну модель статистичного аналізу розподілу фрактальної розмірності контурів областей пошарового формоутворення, що дозволяє науково-обґрунтовано визначати геометричну складність контурів і виконувати оцінку можливості їх одержання пошаровим формоутворенням. Фрактальна розмірність, яка є незалежною від масштабу виробу, використовується при порівняльному аналізі складності контурів;

- принципи ефективного використання робочого простору установок на основі статистичного аналізу просторового розподілу елементарних об'ємів окремих виробів та їх композицій з використанням їхніх воксельних 3D-моделей для оцінювання спільного вирішення таких трьох задач технологічної підготовки як: структурна оборотна декомпозиція, орієнтація та розміщення у робочому просторі пошарового формоутворення;

- попередній аналіз полігональної 3D-моделі з оцінкою геометричної складності для визначення технологічності виробу та прийняття рішення щодо стратегії виготовлення. Оцінка геометричної складності поверхні виробів виконується шляхом аналізу впливу параметрів триангуляції (допустимої похибки, максимально допустимих значень розміру ребра, а також двогранного кута між суміжними гранями) на кількість трикутних граней 3D-моделі, що замінюють поверхню в САД-системі;

- моделі вирішення задач технологічного підготовки в частині раціональної орієнтації виробу в робочому просторі адитивної машини використовують цільову функцію мінімізації площі поверхні з найбільшою величиною похибки формоутворення, що є основою збільшення кількості варіантів орієнтації для подальшого використання у задачі розташування виробу;

- математичну модель адаптивного розсічення (формування пошарової моделі), яка заснована на статистичному аналізі розподілу кутів між вектором напрямку побудови та нормаліями поверхонь з урахуванням відносної площі полігонів, які потрапили у шар побудови, що дозволяє обґрунтовано зменшити кількість шарів, а відповідно технологічний час виготовлення виробів при

забезпеченні заданої точності формоутворення;

- метод візуального аналізу технологічності конструкції виробу, що ґрунтується на математичній моделі колірної візуалізації площі граней 3D-моделі виробу на основі відображення на триангуляційну модель сфери за напрямком векторів нормалей у сферичній системі координат, що істотно підвищує рівень наочності при оцінці придатності конструкції до раціональної орієнтації виробу в робочому просторі пошарового формоутворення.

### **Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.**

Здобувач розробив інноваційну комплексну систему технологічного підготовки адитивного виробництва складних виробів. Ця система завдяки детальному аналізу як вихідних, так і похідних 3D-моделей забезпечує науково обґрунтоване визначення та оптимізацію параметрів адитивного процесу пошарового формоутворення.

Особливо важливою є розробка ефективного алгоритму розміщення 3D-моделей у робочому просторі. Зазначений алгоритм базується на сучасних методах, зокрема методі Монте-Карло та генетичних алгоритмах. Інтеграція цих методів підвищила ефективність використання робочого простору адитивного обладнання, що відповідає меті дослідження.

Здобувач представив низку інноваційних методик і алгоритмів, що охоплюють структурну оборотну декомпозицію, оптимальну орієнтацію та розміщення виробів. Ці підходи спрямовані на досягнення максимальної ефективності використання робочого простору та реалізацію вдосконаленої адаптивної стратегії розсічення 3D-моделей. Впровадження таких методик дозволило суттєво зменшити потребу в експериментальних дослідженнях, скоротити строки технологічного підготовки виробництва, ефективно інтегрувала їх у виробничі процеси.

Значущість наукових досягнень підтверджена патентуванням ряду технічних рішень в Україні. Серед запатентованих розробок — методи структурної оборотної декомпозиції (пат. 117760), оптимальної орієнтації (пат. 117776), розміщення у робочому просторі (пат. 117760), стратегій розсічення (пат. 117764) та формоутворення шарів (пат. 117759, 117768, 117777).

Практичне значення роботи підтверджується успішним впровадженням цих

рекомендацій у виробничих процесах НТУ «ХП», ТОВ «НВЦ Європейські технології машинобудування» та ТОВ «Геополімер».

### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані в 53 наукових працях, у тому числі 28 статей (з них 15 – у наукових фахових виданнях України, 8 – у виданнях, включених до наукометричної бази Scopus; 5 – у зарубіжних періодичних спеціалізованих виданнях); 6 патентів України на корисну модель; 1 – монографія; 14 – у матеріалах конференцій. У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України.

### **Оцінка змісту дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота Гаращенко Я.М. демонструє чітку логічну структуру, що включає вступ, шість основних розділів, висновки, список використаних джерел та сім додатків.

У вступі дисертації обґрунтовано актуальність теми, що підкреслює її значущість, і чітко сформульовано ключові наукові питання та практичну важливість дослідження.

Перший розділ обсягом 35 сторінок присвячено аналізу наукової та технічної літератури. Автор детально розглянув сучасні тенденції в розвитку адитивних технологій, зацентрувавши увагу на аспектах технологічного підготовки. Важливе місце займають питання планування, оптимізації та вибору параметрів процесів пошарового формоутворення у машинобудуванні.

Другий розділ обсягом 26 сторінок містить детальний опис методологічну основу дослідження. Автор обґрунтовує вибір методів, описує умови експериментів, використане обладнання та матеріали. Значну цінність має опис розроблених методів та програмного забезпечення для аналізу тріангуляційних 3D-моделей промислових виробів, що демонструє глибоке розуміння предмету дослідження.

У третьому розділі обсягом 48 сторінок представлено інноваційні методики для оцінки технологічності конструкцій виробів, виготовлених адитивними методами. Автор розробив комплексний набір показників складності виробу, який враховує різні аспекти, такі як геометрична складність, структура матеріалів, ієрархічний рівень та функціональні вимоги. Ці показники адаптовані до специфіки

адитивних технологій пошарового формоутворення. Розширення набору показників дозволяє науково обґрунтовано вибирати стратегії виготовлення на етапі технологічної підготовки, що суттєво підвищує ефективність виробничого процесу.

Четвертий розділ обсягом 58 сторінок присвячений теоретичному обґрунтуванню методології комплексного технологічного підготовки для виготовлення складних виробів адитивними методами. Запропонована методологія визначає інтегроване вирішення таких задач, як структурна декомпозиція виробів, їх оптимальна орієнтація та розміщення в робочому просторі, а також подальше пошарове розсічення за обраною стратегією. Модельні дослідження дозволили сформулювати принципи ефективного використання робочого простору адитивних машин, а також на основі статистичного аналізу просторового розподілу елементарних об'ємів виробів запропонувати новий підхід до визначення показників ефективності.

П'ятий розділ обсягом 96 сторінок присвячений обґрунтуванню концепції технологічного підготовки для матеріалізації складних машинобудівних виробів адитивними методами. Автор визначає комплекс умов для виконання завдань технологічного підготовки, розробляє структуру та ключові елементи відповідної системи. Розроблена система забезпечує всебічний аналіз триангуляційних, воксельних та пошарових 3D-моделей, що дозволяє надати обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації підготовки процесів адитивного виробництва.

Шостий розділ обсягом 72 сторінки містить детальний опис результатів експериментальних досліджень та їх практичне впровадження в систему технологічної підготовки. На основі експериментальних даних та результатів моделювання автор сформулював комплекс рекомендацій для розв'язання задач структурної оборотної декомпозиції, оптимального розміщення виробів у робочому просторі, а також для вибору ефективної стратегії пошарового формоутворення.

Практичне впровадження розробленої технологічної підготовки здійснювалося на платформі, створеній для методу селективного лазерного спікання. Запропоновані методи забезпечують значне покращення точності пошарового формоутворення та ефективного використання робочого простору, що сприяє підвищенню продуктивності виготовлення складних виробів.

Висновки розділів та загальні висновки роботи сформульовані чітко,

відповідають основному змісту дисертації.

Список використаних джерел є достатнім і охоплює як сучасні вітчизняні публікації (83 найменування – 23% від загальної кількості), так і зарубіжні (277 найменувань – 77%).

Зміст автореферату адекватно відображає основні результати дисертації, детально розкриваючи внесок здобувача в наукові досягнення та практичну цінність проведеного дослідження.

#### **По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:**

У першому розділі наведено огляд сучасних тенденцій розвитку адитивного виробництва, однак аналіз джерел обмежується переважно загальними даними. Було б доцільно поглибити аналіз вузькоспеціалізованих джерел, що стосуються конкретних технологій (адитивних методів), які використовуються в дослідженнях здобувача.

В другому розділі бажано було уточнити на можливі обмеження запропонованої методології та використаних методів дослідження.

У третьому та четвертому розділі при визначенні показників технологічності та складності виробу використовується воксельна модель. На мою думку слід було б більш детально подати опис процесу створення воксельної моделі та її наступного аналізу. Важливою також є інформація щодо вибору розміру вокселя і яким чином це буде впливати на розрахункові показники технологічності щодо ефективності оборотної структурної декомпозиції виробу.

У п'ятому розділі розглядалась задача визначення раціональної орієнтації виробу на базі мінімізації певної функції щодо показників точності поверхні. Чи розглядалися альтернативні підходи до визначення орієнтації, які могли б врахувати інші технологічні фактори, наприклад, енергоефективність або оптимізацію часу друку.

В кінці шостого розділу варто було б узагальнити практичні рекомендації для впровадження розроблених підходів у виробництво. Наприклад, які конкретні заходи слід здійснити, щоб інтегрувати адаптивну стратегію розсічення моделі виробу в існуючі виробничі процеси.

Текст дисертації містить незначну кількість орфографічних і стилістичних помилок.

### Висновок

Дисертаційна робота Гаращенко Ярослава Миколайовича «Основи технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів при матеріалізації 3D-моделей адитивними методами» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.02.08 - технологія машинобудування. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу наукову задачу, суть якої полягає в підвищенні ефективності технологічного підготовки процесів адитивного виробництва. Дисертація «Основи технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів при матеріалізації 3D-моделей адитивними методами» Гаращенко Я.М. виконана із дотриманням принципів академічної доброчесності. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а здобувач Гаращенко Ярослав Миколайович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 - технологія машинобудування.

### Опонент

професор кафедри конструювання машин  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», доктор технічних наук, професор

02.09.2024



Віталій ПАСІЧНИК

Підпис проф. Пасічника В.А. ЗАСВІДЧУЮ  
Проректор з наукової роботи




Сергій СТИПЕНКО