

ВІДГУК

опонента Марчука Віктора Івановича

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.

В сучасному машинобудуванні активно поширюються адитивні технології, що використовують пошарове формоутворення для створення прототипів і готових виробів. Ефективність цих технологій залежить від правильного вибору методу виготовлення та оптимізації технологічних процесів. За останні десятиліття було проведено багато досліджень для вдосконалення цих процесів, але залишається проблема низького рівня використання робочого простору (лише 1-4%), що збільшує собівартість адитивного виготовлення. Також збільшується попит на масово індивідуалізовані вироби, що вимагає підвищення вимог до часу виготовлення та технологічної підготовки для рішення оптимізаційних задач по забезпеченню достатнього рівня якості поверхонь при мінімальній собівартості. Для вирішення цих задач необхідно розробити наукові основи технологічної підготовки, які дозволять оптимізувати процеси формоутворення з урахуванням складності виробів і специфіки матеріалів. Дисертаційна робота, виконана на кафедрі "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семка НТУ "ХПІ", присвячена цим питанням і базується на результатах кількох державних науково-дослідних тем (ДР №0105U000576, 2005-2007 рр.; ДР №0108U001446, 2008-2009 рр.; ДР №0110U001238, 2010-2012 рр.; ДР №0117U004882, 2017-2018 рр.; ДР №0120U001008, 2020-2021 рр.; ДР №0122U001435, 2022-2023 рр.), у яких здобувач був активним учасником і автором окремих підрозділів.

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

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, викладених у дисертаційній роботі Гаращенка Я.М., можна оцінити як високий. Це

підтверджується ґрунтовним аналізом науково-технічної літератури з досліджуваної проблеми, чітким формулюванням мети та завдань дослідження, застосуванням сучасних методів дослідження, а також критичним аналізом отриманих результатів інших дослідників. Варто відзначити логічність та чіткість формулювання висновків.

Теоретичні дослідження проведено з використанням сучасного математичного апарату та з урахуванням специфіки адитивних технологій та обладнання, що застосовуються в адитивному виробництві. Достовірність отриманих результатів підтверджується їх узгодженістю з відомими раніше формулами при граничних умовах, що додатково свідчить про обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, представлених у дисертаційній роботі.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження підтверджується низкою факторів. Перш за все, це правильність та обґрунтованість постановки математичних задач. Важливим аспектом є використання загальноприйнятих методів математичного аналізу та вирішення NP-задач. Особливу увагу слід звернути на те, що математичні моделі, розроблені автором, адекватно відображають фізичну природу досліджуваних процесів.

Практична цінність роботи підтверджується успішним впровадженням наукових результатів здобувача у виробничий процес. Зокрема, його розробки були ефективно застосовані під час технологічної підготовки процесів адитивного виготовлення виробів на ряді промислових підприємств України. Це свідчить про високу практичну значимість та актуальність проведеного дослідження в контексті розвитку вітчизняного виробництва.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

- розроблено єдину методологію статистичного аналізу вихідної полігональної (тріангульованої), похідної воксельної, та результуючої пошарової 3D-моделей виробу чи групи виробів;

- створено основи для оцінки технологічності конструкції виробів шляхом аналізу тріангуляційної, 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;

- запропоновано 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;

- сформульовано 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 CAD-системі;

- моделі вирішення задач технологічної підготовки щодо раціональної орієнтації виробу у робочому просторі використовують цільову функцію мінімізації площі поверхні з найбільшою величиною похибки формоутворення, таким чином збільшуючи кількість варіантів орієнтації для подальшого використання у задачі розташування виробу у робочому просторі;

- математичну модель адаптивного розсічення (формування пошарової моделі), яка заснована на статистичному аналізі розподілу кутів між вектором напрямку побудови і нормаллями 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;

- візуальний аналіз технологічності конструкції виробу. Розроблена

математична модель колірної візуалізації площі граней 3D-моделі складного виробу на основі відображення на триангуляційну модель сфери за напрямком векторів нормалей у сферичній системі координат істотно підвищує рівень наочності при оцінці придатності конструкції до раціональної орієнтації виробу у робочому просторі пошарового формоутворення.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Здобувач розробив комплексну систему технологічної підготовки для виготовлення складних виробів адитивними методами. Ця система дозволяє визначати оптимальні параметри процесів пошарового формоутворення на основі детального аналізу як вихідних, так і похідних 3D-моделей.

Особливу увагу приділено вирішенню задачі ефективного розміщення 3D-моделей виробів у робочому просторі. Для цього були застосовані різні методи, включаючи метод Монте-Карло та генетичні алгоритми. Інноваційний підхід до комбінування цих методів значно підвищив ефективність використання робочого простору адитивного обладнання.

Здобувач запропонував ряд оригінальних методик та алгоритмів, які охоплюють структурну оборотну декомпозицію, оптимальну орієнтацію та розміщення виробів. Ці розробки спрямовані на максимально ефективне заповнення робочого простору та реалізацію удосконаленої адаптивної стратегії розсічення 3D-моделей. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити обсяг необхідних експериментальних досліджень та успішно впровадити ці методики у виробничий процес.

Результати досліджень знайшли своє відображення у ряді технічних рішень, захищених патентами України. Зокрема, були запатентовані методи структурної оборотної декомпозиції (пат. 117760), раціональної орієнтації (пат. 117776), оптимального розміщення у робочому просторі (пат. 117760), визначення стратегій розсічення (пат. 117764) та формоутворення шарів (пат. 117759, 117768, 117777).

Практичне значення роботи підтверджується впровадженням розроблених рекомендацій з технологічної підготовки у виробничих умовах 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. має логічну структуру і складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та 7 додатків.

Вступ роботи містить обґрунтування актуальності обраної теми, підкреслює важливість досліджуваних питань, а також чітко формулює основні наукові положення та практичну значущість проведених досліджень.

Перший розділ (на 35 стор.) присвячений аналізу науково-технічної літератури. Автор розглядає сучасні тенденції розвитку адитивних технологій, зосереджуючи особливу увагу на аспектах технологічної підготовки. Детально висвітлюються питання планування, оптимізації та вибору параметрів процесів пошарового формоутворення виробів у машинобудуванні.

Другий розділ (на 26 стор.) охоплює методологічну базу дослідження. Тут автор надає обґрунтування вибору методів дослідження, описує загальні умови проведення експериментів, використане обладнання та матеріали. Особливу цінність представляє опис розроблених автором методів та програмного забезпечення для аналізу тріангуляційних 3D-моделей промислових виробів.

У третьому розділі (на 48 стор.) представлено інноваційні методики оцінки технологічності конструкції виробів, що виготовляються адитивними методами. Автор пропонує комплексний набір показників складності виробу, який враховує всі аспекти поняття "складність": геометричний, структуру матеріалів, ієрархічний та функціональний. Ці показники розроблені з урахуванням специфіки адитивних методів пошарового формоутворення. Розширення набору показників дає можливість здійснювати науково обґрунтований вибір стратегії виготовлення виробу на етапі технологічної підготовки, що підвищує ефективність виробничого

процесу.

Четвертий розділ (на 58 стор.) присвячений теоретичному обґрунтуванню методологічних засад комплексної технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів адитивними методами пошарового формоутворення.

Запропонована методологія технологічної підготовки передбачає інтегроване вирішення таких завдань: структурна декомпозиція виробів, їх оптимальна орієнтація та розташування в робочому просторі, а також подальше пошарове розсічення за обраною стратегією.

На основі модельних досліджень сформульовано принципи ефективного використання робочого простору АМ-установок. Автор пропонує новий підхід до визначення показників ефективності використання робочого простору, базуючись на статистичному аналізі просторового розподілу елементарних об'ємів виробів та їх композицій.

П'ятий розділ (на 96 стор.) присвячений обґрунтуванню концепції технологічної підготовки матеріалізації складних машинобудівних виробів адитивними методами. Автор формулює комплекс необхідних умов для виконання завдань технологічної підготовки та розробляє структуру і ключові елементи відповідної системи.

Розроблена система призначена для всебічного аналізу тріангуляційної, воксельної та пошарової 3D-моделей виробу. Це дозволяє отримати обґрунтовані рекомендації щодо оптимального виконання завдань підготовки процесів адитивного виробництва.

Шостий розділ (на 72 стор.) містить результати експериментальних досліджень та практичної реалізації комплексу завдань в системі технологічної підготовки. На основі експериментальних і модельних даних розроблено рекомендації щодо вирішення завдань структурної оборотної декомпозиції, оптимальної орієнтації та розміщення в робочому просторі, а також вибору стратегії пошарового формоутворення.

Практичне втілення комплексної технологічної підготовки виготовлення групи виробів здійснювалось у розробленій системі для методу селективного лазерного спікання (SLS). Запропоновані підходи спрямовані на підвищення точності пошарового формоутворення та ефективності використання робочого простору адитивного обладнання.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел досить повний і охоплює сучасні вітчизняні (83 найменувань – 23% від загальної кількості) та зарубіжні (277 найменувань – 77%) публікації.

Зміст автореферату відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

У першому розділі приділяється увага глобальним тенденціям розвитку адитивних технологій, проте не висвітлено їх використання у конкретному локальному контексті, наприклад, в Україні. Було б доцільно додати інформацію про стан і перспективи розвитку цієї галузі в Україні.

В другому розділі бажано було уточнити, які має переваги розроблена методика оцінки якості тріангуляційних 3D-моделей (розд 2.6, стор. 69-75). Бажано навести приклади візуалізації результатів досліджень або посилання на відповідні рисунки в інших розділах які продемонстрували можливості даної методики.

У третьому розділі було б доцільно більш детально обґрунтувати вибір показників складності виробу, а також навести порівняння з існуючими підходами до оцінки складності виробів.

У четвертому розділі необхідно більш детально розглянути питання практичної реалізації запропонованої схеми технологічної підготовки, враховуючи її високу трудомісткість.

У п'ятому розділі потрібно звернути увагу на можливі обмеження адаптивної стратегії розсічення зі змінним кроком, особливо в контексті використання її для виробів з дуже складною геометрією.

Шостий розділ, присвячений експериментальним дослідженням та практичному застосуванню розроблених підходів до адитивного виробництва, виглядає досить добре структурованим і наповненим детальною інформацією. Проте, деякі формулювання можуть бути важко зрозумілими або надто загальними. Наприклад, фрази на кшталт "усічення щільності розподілу кутів" або "раціональна орієнтація виробів" потребують більш чіткого пояснення, що мається на увазі та як саме це впливає на пошарову побудову виробів.

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 технологічної 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 прикладної механіки та
мехатроніки Луцького національного
технічного університету,
доктор технічних наук, професор

02.09.2024



Віктор Марчук