

ВІДГУК

офіційного опонента д.т.н., проф. Дмитрієва Д.О.

на дисертаційну роботу

Кушнірчука Андрія Сергійовича

на тему «Технологічне забезпечення якості деталей машин, отриманих з пластмас методом 3D-друку», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка

1. Актуальність теми та зв'язок з науковими планами і програмами

Технологія FDM-друку (Modeling by Fused Deposition) є найпоширенішою формою адитивного виробництва завдяки своїй доступності та низькій вартості як обладнання, так і витратних матеріалів. Широкий вибір філаментів дає змогу виготовляти компоненти з урахуванням специфічних експлуатаційних вимог. Сучасні полімери, що використовуються для 3D-друку, можуть забезпечувати такі характеристики, як стійкість до впливу масел і бензину, необхідні діелектричні властивості, витривалість до ультрафіолету, інертність до кислот та води тощо.

Якість геометрії надрукованих виробів значною мірою залежить від конструкції самого принтера, технічного стану його рухомих вузлів, правильного налаштування, а також стабільності роботи електронної системи управління. Зокрема, точність переміщення по осях визначається відсутністю пропусків імпульсів на крокових двигунах. Повністю справне та відкаліброване обладнання здатне забезпечити стабільну якість друку з мінімальними відхиленнями від цифрової 3D-моделі. У таких випадках надруковані об'єкти можуть використовуватись без додаткової обробки — це, як правило, деталі корпусів, кріплення, заглушки та інші елементи без високих вимог до точності чи посадок. Проте для покращення функціональних властивостей виробів часто доцільним є застосування додаткової механічної обробки. Це можуть бути

операції фрезерування, токарної обробки, шліфування або інші методи доробки поверхонь з метою підвищення точності чи якості зовнішнього вигляду.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності до державних і науково-технічних програм за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки України та відповідає положенням Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» від 08.09. 2011р. № 3715-VI та Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності» від 13 січня 2024р. № 3534-IX, а також в рамках науково-дослідних робіт кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету.

2. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, як містить анотацію, зміст, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки.

У вступі наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульована мета, завдання, об'єкт та предмет дослідження, вказана наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, визначений особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

Розв'язання науково-технічної задачі, пов'язаної з забезпеченням якості деталей, виготовлених методом FDM-друку, ґрунтується на комплексному підході, який охоплює: досягнення високої точності відповідальних поверхонь відповідно до технічних вимог, забезпечення заданої шорсткості, оптимальні міцнісні властивості матеріалу та конструкторські рішення з мінімізацією маси виробу. Це завдання є актуальним у контексті сучасного машинобудування та розвитку адитивних технологій.

У першому розділі виконано комплексний аналіз факторів, що впливають на якість поверхонь деталей, виготовлених за допомогою FDM-друку.

Продемонстровано перспективність застосування 3D-друкованих деталей у машинобудуванні, однак підкреслено, що у багатьох випадках їх геометрична точність і якість поверхні не відповідають експлуатаційним вимогам. Для досягнення необхідного зовнішнього вигляду або точності розмірів часто потрібна додаткова обробка поверхонь.

Огляд літературних джерел свідчить, що досягнення низької шорсткості та високої точності поверхонь після FDM-друку є складним через конструктивні та технологічні обмеження обладнання. Тому для покращення геометричних параметрів деталей доцільно застосовувати механічну постобробку відповідальних зон. На основі аналізу результатів експериментальних і теоретичних робіт виявлено ключові чинники, що впливають на якість поверхні: параметри самого процесу друку, властивості обраного матеріалу, а також ефективність постоброблення.

Одержані висновки дозволили чітко сформулювати наукову мету та окреслити завдання подальших досліджень.

У *другому розділі* досліджено фізичні чинники, які визначають перебіг процесів обробки високоточних поверхонь, надрукованих із пластмасових матеріалів, шляхом точіння та фрезерування.

Було побудовано аналітичну модель процесу різання з урахуванням пружних деформацій поверхні заготовки, що дозволило кількісно оцінити вплив технологічних параметрів на точність обробки.

Окремо проаналізовано специфіку фрезерування FDM-деталей на верстатах з ЧПК. Встановлено, що вибір оптимальної стратегії обробки потребує вдосконалення з урахуванням нестационарного та замкненого характеру процесу. Запропоновано розробити алгоритм обчислення траєкторії руху інструмента, який враховує процеси формування поверхні та дозволяє інтегрувати ці дані у програмне забезпечення для ЧПК, що забезпечить автоматизоване управління процесом.

Застосування запропонованих підходів у процесі побудови керуючих програм дозволить компенсувати похибки, спричинені деформаціями, та підвищити ефективність обробки.

Також наведено результати моделювання обробки поверхонь за оптимальною стратегією, яка забезпечує мінімальний час виконання при заданому значенні шорсткості (висоті гребінця).

При цьому отримані наступні наукові результати:

1. Отримала подальший розвиток побудова математичної моделі процесу різання точінням та фрезеруванням поверхонь деталей з пластмас, виготовлених 3D-друком, у порівнянні з процесом різання металів з урахуванням пружних відтискань поверхонь матеріалу. Отримані результати у вигляді номограм дають можливість прогнозувати неточність розмірів поверхонь при різних видах оброблення для матеріалів, отриманих 3D-друком, при чистових та чорнових режимах різання;

2. Отримав подальший розвиток процес визначення механічних характеристик зразків, надрукованих за допомогою адитивних технологій FDM. Встановлено, що зниження внутрішнього заповнення матеріалу пропорційно зменшує межу міцності зразка. ABS-пластик виявився менш міцним на розрив у порівнянні з CoPet пластиком. При дослідженні діаграм руйнувань зафіксовано пластичну поведінку у зразків з CoPet, тоді як зразки з ABS демонструють крихке руйнування. Найкращий результат було отримано в парі матеріалів ABS+ та CoPet, величина зносу склала 30 мкм, що робить таку пару тертя найбільш оптимальним вибором.

3. Експериментально визначені співвідношення параметрів режимів різання та конструктивних особливостей різального інструменту, що забезпечують найбільшу точність та низьку шорсткість відповідальних поверхонь деталей отриманих 3-D друком при оптимальних температурах різання.

У третьому розділі представлено загальний підхід до проведення досліджень, який ґрунтується на системному аналізі для розв'язання поставленої мети. Було створено спеціалізовану експериментальну установку, що імітує процеси тертя між зразками з пластмас і контртілами. В рамках роботи також здійснено підбір обладнання та параметрів різального інструменту, необхідних для точіння та фрезерування на верстатах з числовим

програмним керуванням. Для випробувань зразків з матеріалів ABS і CoPET на міцність використовувалася розривна машина типу УМ-5. Описано засоби вимірювання, за допомогою яких визначались точність геометричних параметрів і шорсткість відповідальних поверхонь. Також наведено методичні підходи до оптимізації конструкції машинних деталей для адитивного виробництва із застосуванням модуля SolidWorks Simulation. Окремо розглянуто вибір і модернізацію конструкції поворотного стола, що дозволяє розширити функціональні можливості фрезерних ЧПК-верстатів. У розділі також викладено методику аналізу експериментальних результатів і способи оцінювання точності отриманих даних.

У четвертому розділі наведено результати експериментів, які підтверджують, що найвищу точність розмірів та якість обробленої поверхні вдалося досягти при використанні твердосплавної фрези з полірованим покриттям. Для фрези діаметром 8 мм визначено оптимальні режими різання: частота обертання шпинделя — 2240 об/хв, подача — 400 мм/хв.

За підсумками досліджень фрезерування деталей з CoPET-пластику, виготовлених методом FDM-друку, встановлено, що найкращі результати обробки пазів і уступів досягаються при застосуванні фрези з твердого сплаву з полірованою поверхнею. Інструменти з швидкорізальної сталі (HSS) виявилися лише частково придатними. Уточнено режими обробки, які дозволяють досягти високої точності — шпиндель обертається з частотою 2240 об/хв, подача становить 400 мм/хв.

Також встановлено, що при чорновому точінні CoPET із глибиною різання 3 мм та дотриманні вказаних режимів температура в зоні різання не перевищує 70,9°C, що є значно нижчим за температуру термічного розм'якшення матеріалу (190°C). Це свідчить про відсутність термічного пошкодження поверхневого шару при забезпеченні заданої шорсткості й високої продуктивності.

Під час вивчення зношування тертьових пар, виготовлених з ABS та CoPET за технологією FDM-друку, було встановлено різну схильність

матеріалів до зносу. Найбільш ефективною виявилася пара з матеріалів ABS і CoPET, у якій глибина зношування становила лише 30 мікрометрів, що робить її найкращим варіантом серед усіх протестованих.

Модернізація конструкції поворотного стола дозволила підвищити ефективність його використання в процесі обробки на ЧПК-верстатах.

За допомогою SolidWorks проведено топологічну оптимізацію моделей, що враховує особливості адитивного виготовлення. Такий підхід забезпечує отримання кінцевого виробу без необхідності додаткової механічної обробки, водночас зменшуючи масу конструктивних елементів на 40–60% при збереженні їх міцнісних характеристик. Це сприяє економії матеріалів, скороченню часу підготовки виробництва та зменшенню обсягів механічної обробки.

Висновки по роботі сформульовані технічно грамотно з наукової точки зору і повністю висвітлюють отримані в роботі результати. За своїм рівнем висновки відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Список літератури має широкий спектр сучасних наукових видань, включаючи іноземні, на достатньому рівні для якісного аналізу охоплює предметну область по темі дисертації.

Додатки до роботи містять список публікацій здобувача, акти впровадження результатів дисертації та матеріали досліджень, що не увійшли в основну частину роботи.

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи Кушнірчука Андрія Сергійовича обґрунтовані на основі положень теорії технології машинобудування, математичним і комп'ютерним моделюванням, розрахунковими і натурними експериментами, практичним впровадженням результатів дисертаційних досліджень.

3. Наукова новизна одержаних результатів

До найбільш суттєвих і науково нових результатів дисертаційної роботи, на мою думку, можна віднести:

1. Отримала подальший розвиток побудова математичної моделі процесу різання точінням та фрезеруванням поверхонь деталей з пластмас, виготовлених 3D-друком, у порівнянні з процесом різання металів з урахуванням пружних відтискань поверхонь матеріалу. Отримані результати у вигляді номограм дають можливість прогнозувати неточність розмірів поверхонь при різних видах оброблення для матеріалів, отриманих 3D-друком, при чистових та чорнових режимах різання;

2. Отримав подальший розвиток процес визначення механічних характеристик зразків, надрукованих за допомогою адитивних технологій FDM. Встановлено, що зниження внутрішнього заповнення матеріалу пропорційно зменшує межу міцності зразка. ABS-пластик виявився менш міцним на розрив у порівнянні з CoPet пластиком. При дослідженні діаграм руйнувань зафіксовано пластичну поведінку у зразків з CoPet, тоді як зразки з ABS демонструють крихке руйнування. Найкращий результат було отримано в парі матеріалів ABS+ та CoPet, величина зносу склала 30 мкм, що робить таку пару тертя найбільш оптимальним вибором.

3. Експериментально визначені співвідношення параметрів режимів різання та конструктивних особливостей різального інструменту, що забезпечують найбільшу точність та низьку шорсткість відповідальних поверхонь деталей отриманих 3D- друком при оптимальних температурах різання.

Вважаю, що наукові результати отримані в дисертаційній роботі є суттєвим внеском у розвиток створення, теоретичного обґрунтування та експериментальному дослідженні технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D-друком.

4. Достовірність отриманих результатів і висновків

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректною постановкою задачі, мети та завдань дисертаційного дослідження, які розв'язуються послідовно та аргументовано. Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується відповідністю методології

дослідження поставленої науково-технічної задачі, повнотою розгляду на теоретичному та експериментальному рівнях об'єкта дослідження, застосуванням комплексу методів, адекватних предмету дослідження.

Теоретичні дослідження процесу різання заготовок, отриманих 3D-друком, здійснювалися шляхом математичного аналізу системи інструмент-заготовка на основі положень теорії математичного моделювання із застосуванням обчислювальної техніки.

В основі роботи лежать аналітичні та експериментальні методи дослідження. Дослідження проведено з використанням сучасних засобів руйнівного контролю; для визначення точності поверхонь використовувався сучасні мікрометричні вимірювальні прилади, мікрогеометрія поверхні виробів, виготовлених за технологією швидкого прототипування, визначалася на основі стандартних методів, з використанням сучасних цифрових засобів вимірювальної техніки.

Достовірність результатів ґрунтується на застосуванні коректних теоретичних припущень, результатах експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів. Виконано достатній обсяг апробації отриманих результатів на науково-технічних конференціях.

5. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання

Практична цінність отриманих у дисертації результатів для галузі машинобудування полягає в розробці методичних підходів до вибору оптимальних режимів точіння та фрезерування поверхонь деталей, виготовлених методом 3D-друку, з метою забезпечення необхідного рівня їх якості.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження реалізовані у вигляді методології вибору раціональної стратегії обробки поверхонь та створення алгоритму для розрахунку траєкторії інструмента, яка враховує закономірності формування оброблюваної поверхні. На основі цього розроблено програмно-математичне забезпечення, яке дозволяє автоматизовано

керувати процесом обробки відповідно до розрахованого алгоритму. Інтеграція таких рішень у керуючі програми дозволяє компенсувати похибки, спричинені пружними деформаціями, і підвищити ефективність обробних операцій.

Результати досліджень зносостійкості пар тертя, виготовлених з ABS і CoPET за технологією FDM-друку, показали відмінності у зносі поверхонь залежно від матеріального поєднання.

Виконано модернізацію поворотного столу, що забезпечує підвищення ефективності використання верстатів з числовим програмним керуванням, зокрема на малих виробництвах, при цьому не потребуючи значних фінансових витрат. Встановлення крокового двигуна замість ручного приводу дозволило не лише збільшити надійність та довговічність вузла, а й покращити точність обробки.

Розроблено придатну до інженерного застосування методологію топологічної оптимізації в поєднанні з адитивними технологіями, яку призначено створювати деталі, що не потребують додаткової обробки, зменшуючи їх масу на 40–60% без втрати необхідних статичних властивостей. Даний підхід сприяє економії матеріалів, зменшенню часу на підготовку виробництва та скороченню обсягів подальшої механічної обробки.

Результати виконаних досліджень та окремі теоретичні положення прийнято до впровадження на підприємстві ПВКФ «Бджілка» (м. Хмельницький).

Теоретичні та практичні результати, отримані в дисертаційному дослідженні, впроваджені у навчальний процес кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету при викладанні дисципліни «Технологічні методи забезпечення якості виробів».

6. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях

Дисертаційна робота має чітку структуру. Основні висновки і рекомендації сформульовано у відповідності до результатів, які наведено у

розділах роботи.

Проведено перевірку дисертації на наявність академічного плагіату, отримані результати свідчать про індивідуальність і унікальність роботи.. У дисертації не виявлено текстових запозичень і використання наукових результатів інших науковців без посилань на відповідні джерела.

Усі основні положення та найбільш важливі результати дисертації, подані до захисту, опубліковані в необхідному обсязі у фахових наукових виданнях України, пройшли відповідну апробацію на міжнародних науково-технічних конференціях. Основні результати дисертації опубліковані у 17 наукових працях, у тому числі 4 статті у фахових виданнях України, що входять до переліку ДАК, одна стаття, що додатково відображає наукові результати дисертації, 8 публікацій апробаційного характеру у матеріалах та тезах конференцій. Вимоги щодо кількості та якості публікацій виконано.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

7. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. В першому розділі дисертаційної роботи бажано було б навести класифікацію деталей машин, що можуть бути тримані 3D друком у машинобудівній промисловості і відповідну групу деталей з ABS та CoPet – пластику, які саме підлягали експериментальним дослідженням механічної постобробки.

2. В другому розділі дисертаційної роботи виконано математичне моделювання процесів різання з припущеннями про лінійну пружність та однорідність матеріалу, тоді необхідне пояснення щодо технологічного врахування пористості, анізотропії властивостей якщо вони наявні у FDM-друкованих деталях машин.

3. В третьому розділі проведено ґрунтовні дослідження зразків на міцність де враховано ступінь заповнення матеріалу та тип заповнення, але виникає необхідність мати дані про анізотропію властивостей готових виробів в залежності від орієнтації друку і як вони вплинуть на складові зусилля різання

під час механічної постобробки.

4. В дисертаційній роботі розглянуто стаціонарний процес формоутворення розмірів і мікрогеометрії оброблюваних поверхонь, однак не розглянуто вплив динамічних факторів щодо вібраційних процесів, що мають ключовий вплив при верстатній обробці різанням деталей з низькою жорсткістю.

5. В експериментальній частині п.4.5 бажано вказати застосовувану швидкість навантаження при випробуванні зразків з ABS і CoPET пластику на розтяг, при цьому в методологічному розділі вказано п'ять значень швидкостей в технічних характеристиках розривної машині УММ-5: 2; 4; 10; 20; 50, мм/хв.

6. По тексту роботи зустрічається застосування загальнопоширених визначень «бурхливий», «гарний», «найкращий», тому бажано їх було конкретизувати в залежності від контексту.

Вказані зауваження носять характер рекомендацій та не знижують наукового змісту, практичної цінності і значущості отриманих результатів дисертаційної роботи, яку виконано на високому науково-технічному рівні.

8. Висновки

Представлена дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить нові науково обґрунтовані результати. У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу машинобудування, яка має важливе народногосподарське значення, що полягає у вирішенні технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D- друком.

Тема і зміст дисертації відповідають спеціальності 131 – Прикладна механіка.

Враховуючи вищезазначене вважаю, що дисертаційна робота «Технологічне забезпечення якості деталей машин, отриманих з пластмас методом 3D-друку» має актуальність, обґрунтовано всі наукові положення, висновки і рекомендації, робота містить наукову новизну та практичну цінність, автором виконано достатню кількість наукових публікацій за результатами досліджень, порушення академічної доброчесності відсутні. Тому, дисертація цілком відповідає вимогам пп. 6, 7, 8 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, її автор Кушнірчук Андрій Сергійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 Прикладна механіка.

Офіційний опонент – доктор технічних наук, професор, професор кафедри Автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету



Дмитро ДМИТРИЄВ

