

ВІДГУК

офіційного опонента 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

Як найпоширеніший вид адитивного виробництва, FDM-друк застосовується в багатьох галузях, а низька вартість обладнання та витратних матеріалів робить цю технологію доступною та поширеною. Використання FDM-друку дозволяє виготовляти складові компоненти відповідно до експлуатаційних вимог майбутніх виробів. Сучасні пластмаси забезпечують такі властивості виробів, як маслостійкість, бензостійкість, висока діелектрична міцність, стійкість до ультрафіолетового випромінювання, відсутність реакції з кислотами, водостійкість та ін. Геометрична точність виробів, виготовлених за допомогою 3D-принтерів, залежить від типу механічної частини конструкції принтера, правильної роботи елементів конструкції, рівня зносу рухомих частин і того, що крокові двигуни повністю залежать від стабільної роботи електроніки принтера, яка повинна гарантувати, що кроки не будуть пропущені. Повністю функціонуючий, налаштований і відкалібрований принтер виробляє високоякісні вироби зі стабільними геометричними розмірами з мінімальним відхиленням від заданої 3D-моделі. Отримані деталі можна відразу використовувати за призначенням без будь-якої постобробки, за умови, що виріб не вимагає критично важливих з'єднань, точної підгонки або взаємного розташування поверхонь, наприклад, корпусні деталі, кронштейни, тримачі та заглушки. Одним із рішень проблеми покращення функціональності є механічна обробка деталей, виготовлених методом FDM-друку. Це можна зробити за допомогою різноманітних інструментів і способів, таких як точіння, фрезерування, шліфування тощо.

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

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 працею, що включає анотацію, зміст, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки.

У *вступі* подано загальний огляд досліджень, актуальність теми, наукову програму, план, зв'язок роботи з науковими програмами, мету, задачі та об'єкти дослідження, наукову новизну отриманих результатів, їх практичне значення, особистий внесок здобувача, апробацію, публікації, структуру та дані про обсяг роботи. Вирішення науково-технічної проблеми – забезпечення технічних параметрів якості деталей, отриманих методом FDM-друку, є актуальним завданням за рахунок комплексного підходу до якості продукції, що включає точність критичних поверхонь відповідно до технічних вимог, необхідну шорсткість, міцнісні властивості матеріалу та конструкцію прес-форми, що мінімізує масу деталі.

У *розділі 1*. Наведено деякі з найбільш важливих питань, які необхідно вирішити за допомогою 3D-друку. Це означає, що ефективність використання деталей машин, виготовлених методом 3D-друку, продемонстрована, але в багатьох випадках до якості та точності відповідальних поверхонь пред'являються високі вимоги, і для забезпечення високої якості конструкції

виробу або точності розмірів за низької шорсткості поверхні необхідна механічна постобробка поверхні. Аналіз використаних джерел показує, що через технічні характеристики і властиві обмеження друкарського обладнання важко отримати низьку шорсткість поверхні та високу точність розмірів критичних поверхонь після процесу FDM-друку. Тому для отримання більш якісних і точних поверхонь необхідно проводити додаткові процеси механічної обробки критичних поверхонь. На основі аналізу результатів теоретичних та експериментальних досліджень різних авторів щодо процесу виготовлення виробів методом 3D-друку встановлено, що основними факторами, які впливають на якість поверхні виробів, є технологічні параметрами процесу друку, вибір матеріалів для друку та постобробка поверхні для отримання необхідної шорсткості та точності критичних поверхонь. Результати аналізу літературних джерел та патентного огляду дозволили сформулювати мету та завдання для досягнення поставленої мети.

У розділі 2 визначено основні фізичні фактори, що діють під час точіння та фрезерування високоточних поверхонь 3D-друкованих виробів. Побудовано та проаналізовано аналітичну модель процесу різання пластичного матеріалу з урахуванням пружної деформації поверхні виробу; проаналізовано особливості процесу фрезерування пластику після 3D-друку на верстаті з ЧПК. Результати аналізу показали, що процес вибору оптимальної стратегії обробки такої поверхні потребує вдосконалення шляхом врахування її не стаціонарності та замкненості, розробки певних алгоритмів розрахунку траєкторій руху інструменту з урахуванням процесів, що відбуваються під час формування поверхні деталі, та можливості керування процесом обробки за заданим алгоритмом. Виявлено необхідність використання програмного забезпечення. Розробка та використання цих компонентів при проектуванні керуючої програми дозволяє компенсувати похибки, спричинені пружною деформацією, та підвищити продуктивність обробки. На прикладі оброблення складної поверхні представлені результати прогнозованої обробки деталей з оптимальною стратегією підготовки стратегії оброблення поверхні, яка гарантує найкоротший час обробки при заданій висоті гребінки.

У розділі 3 описано загальну методику проведених в роботі досліджень, яка базується на системному підході до вирішення науково-технічних завдань. В ході дисертаційного дослідження розроблено експериментальну установку для моделювання фізичних процесів тертя між пластиковими зразками та контртілом; підібрано технологічне обладнання та характеристики різального інструменту для точіння та фрезерування на верстатах з ЧПК; досліджено міцнісні властивості пластикових зразків з АБС та CoPet, які досліджувалися на розривній машині УМ-5. Описано вимірювальні прилади для вимірювання точності та шорсткості відповідальних поверхонь; проаналізовано, як за допомогою SolidWorks Simulation можна оптимізувати конструкцію деталей машин; Вибрано конструкцію поворотного столу для верстата з ЧПК для модернізації, що підвищить ефективність роботи верстата з ЧПК. Представлено методику обробки експериментальних даних та оцінки точності отриманих результатів.

У четвертому розділі наведено результати експериментального дослідження, які показують, що найвищої точності розмірів і якості поверхні можна досягти під час використання твердосплавних фрез з полірованою поверхнею. Згідно з результатами дослідження, оптимальними режимами різання для даної фрези Ø8 мм були частота обертання шпинделя – 2240 об/хв і подача – 400 мм/хв. Аналіз результатів дослідження – фрезерування пластикових деталей, виготовлених методом FDM-друку з матеріалу CoPET – показує, що найвищі оброблені поверхні (канавки і уступи) точність і якість оброблених поверхонь (пазів і уступів) досягається під час використання твердосплавних фрез з полірованими поверхнями. Також встановлено, що оптимальний режим різання відповідає частоті обертання шпинделя 2240 об/хв і подачі 400 мм/хв. Рекомендовані режими різання для чорнового точіння пластиків CoPET (температура, при якій пластик починає розм'якшуватися – 190 °C), при глибині різання $t = 3$ мм температура в зоні різання – 70,9°C не була перевищена. Це свідчить про те, що поверхневі шари поверхні не порушуються за необхідної шорсткості та досягається необхідна продуктивність процесу обробки. Експериментальні дослідження показали, що

величини зносу пар тертя, виготовлених методом FDM-друку з пластиків ABS і COPET, відрізняються за своєю здатністю до зношування поверхні. Найкращі результати були досягнуті з парою матеріалів ABS+ і CoPet зі значенням зносу 30 мкм, що робить цю пару тертя найкращим варіантом вибору з досліджуваних пар. Модернізація конструкції поворотного столу підвищує ефективність роботи верстата з ЧПК. з метою розширення технічних можливостей фрезерного верстата з ЧПК розроблено автоматизований поворотний стіл для обробки деталей з АБС і ПЕТ, що дозволяє підвищити точність та знизити шорсткість поверхонь, що обробляються.

За допомогою програмного забезпечення SolidWorks була оптимізована конструкція виробу з використанням адитивної технології, що дозволило отримати кінцевий продукт без значної додаткової механічної обробки. Це дозволило зменшити вагу компонента на 40–60% при збереженні всіх статичних властивостей, заощадити матеріал, скоротити час підготовки виробництва та обсяг обробки.

Висновки є чіткими та повністю висвітлюють результати, отримані в дослідженні. На цьому рівні висновки відповідають вимогам до дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Список літератури достатньо повно охоплює предметну галузь і відображає опрацювання автором патентних матеріалів та літературних джерел.

Додатки до дисертаційної 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 коректним використанням математичного апарату, практичним впровадженням результатів дисертаційних досліджень.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, логічно випливають із результатів, отриманих за допомогою чітких викладок з коректним використанням принципів системного аналізу, методів аналізу та моделювання процесів, принципів побудови баз знань та формування

логічного висновку.

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 здобувача є вагомим 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 сучасний вимірювальний прилад Мікрометр гладкий МКЦ 0–25. Шорсткість поверхні виробів, виготовлених за технологією швидкого прототипування, визначалася на основі стандартних методів, з використанням цифрового приладу профілометра Mahr MarSurf PS10. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана з використанням сучасного математичного апарату.

Достовірність результатів базується на обґрунтованості припущень, результатах експериментальних досліджень, правильному аналізі отриманих результатів, а також на успішній їх апробації на науково-технічних конференціях.

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

Практичне значення отриманих результатів для машинобудування полягає у створенні методології вибору режимів різання на операції точіння та фрезерування поверхонь деталей для технологічного забезпечення якості деталей машин, отриманих 3D-друком.

Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень

реалізовані у методології процесу оптимальної стратегії обробки її поверхонь та розробленню алгоритм розрахунку траєкторії руху інструмента, який враховує процеси, що протікають під час формоутворення поверхні деталі та застосовувати програмно-математичне забезпечення, що дозволить управляти процесом обробки за заданим алгоритмом. Використання цих компонентів під час проектування керуючої програми дозволить компенсувати похибку, викликану пружними деформаціями та підвищити продуктивність обробки. У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що величини зношування пар тертя, отриманих за допомогою FDM-друку із ABS та COPET пластику розрізняються за здатністю до зношування поверхонь. Найкращий результат було отримано в парі матеріалів ABS+ та CoPet, величина зносу склала 30 мкм, що робить таку пару тертя найбільш оптимальним вибором серед пар, що досліджувались.

Проведена модернізація конструкції поворотного стола підвищує ефективність застосування верстатів з ЧПК, особливо для малих підприємств та не призводить до значного дорожчання оснащення. Заміна ручного приводу на кроковий двигун не тільки збільшує експлуатаційний ресурс роботи поворотного стола, але й підвищує точність виконання робіт.

Для конструкторів та проєктантів рекомендована методологія топологічної оптимізації за допомогою адитивних технологій, що дозволяє отримати кінцевий продукт без потреби в додатковій обробці. Це знижує масу деталі від 40 до 60 % за збереження всіх статичних характеристик, що дозволяє економити матеріали, скоротити час на підготовку виробництва та значно зменшити обсяги механічної обробки.

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

Теоретичні та практичні результати, отримані в дисертаційному дослідженні, впроваджені у навчальний процес кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету під час викладання 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 логічну структуру. Основні висновки і рекомендації логічно витікають із результатів, які наведено у розділах роботи.

Проведено перевірку дисертації на наявність академічного плагіату, отримані результати свідчать про високу індивідуальність роботи. За всім текстом дисертації простежується авторський стиль. У дисертації не виявлено текстових запозичень і використання наукових результатів інших науковців без посилань на відповідні літературні 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 огляді літературних джерел недостатньо уваги приділено висвітленню інших технологій 3-D друку, наприклад, з металу.

2. В аналітичних дослідженнях процесу різання пластмас бажано було вказати межі режимів чорнового та чистового оброблення.

3. У результаті аналітичних досліджень встановлено, що швидкість різання пластмас має малий вплив на сили різання. Бажано було би узагальнити отриманий матеріал за впливом на силу різання глибини та подачі різання у вигляді реологічних формул з коефіцієнтами.

4. Мінімальна шорсткість і найвища точність обробленої поверхні деталей, які можна отримати за допомогою обробки різанням, коливаються в досить широких межах і залежать від великої кількості факторів. Геометричні параметри інструментів значний мають вплив на величину сил різання P_z , P_y , P_x . Найбільш сильний вплив має передній кут, при збільшенні якого від 20 до 40° зменшується значення сил від 2 до 4 разів. У роботі цього не досліджено, а вибрано стандартні параметри фрез.

5. У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що величини зношування елементів пар тертя, отриманих за допомогою FDM друку із ABS та COPET пластику розрізняються за здатністю до зношування поверхонь. Бажано було би порівняти отримані результати з відомими дослідженнями зношування цих матеріалів, одержаними іншими авторами.

6. Виявлено незначні наявні орфографічні помилки та недоречності у використанні розділових знаків.

Однак зазначені зауваження не є принциповими, істотно не впливають на зміст дисертаційної роботи та не знижують її наукової та практичної цінності.

8. Висновки

Представлена дисертація є завершеною науково-дослідною працею, 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.

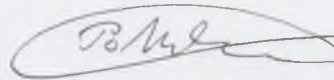
Отже, з огляду на актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх новизну та практичну цінність, повноту викладення в наукових публікаціях, відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю, що дисертація цілком відповідає 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. Здобувач 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
комп'ютеризованого машинобудування

Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу

23 червня 2025 р.



Любомир РОП'ЯК

Особистий підпис: Л.Я. Роп'яка посвідчую:

Учений секретар ІФНТУНГ

23.06.25



Володимир ХОМИН