

До спеціалізованої вченої ради

ДФ 70.052.034

Хмельницький національний університет

29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора **Стаценка Володимира Володимировича**

на дисертаційну роботу **Поліщука Андрія Олеговича**

«Удосконалення обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості»,

подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії

з галузі знань 13 Механічна інженерія

за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

### **Актуальність теми дисертаційної роботи**

Нааявний досвід використання адитивних технологій у різних галузях промисловості підтверджує їх високу ефективність та зацікавленість компаній у їх розвитку. Передусім це пов'язано з можливістю швидко та без суттєвих додаткових витрат змінювати конструктивні параметри виробів, виготовляти унікальні деталі, створювати прототипи, що дозволяє суттєво спростити та прискорити виконання конструкторських робіт та досліджень.

Водночас, сучасні технології мають ряд обмежень, які пов'язані з конструктивними та технологічними характеристиками 3D принтерів, продуктивністю та вартістю обладнання і матеріалів. Розширення номенклатури матеріалів, що можуть використовуватись у 3D друці, потребує створення нових конструкцій 3D принтерів, які враховуватимуть їх властивості. Також важливо враховувати проблеми, пов'язані з утилізацією і повторним використанням виробів, що містять полімерні матеріали.

У представленій дисертаційній роботі автор вирішує задачу удосконалення обладнання для 3D друку деталей легкої промисловості. При цьому враховані специфічні вимоги до виробів взуттєвої, швейної та інших промисловостей,

запропоновані підходи до зниження вартості продукції, зокрема за рахунок використання вторинної сировини. Це дозволяє стверджувати, що обраний напрям досліджень є актуальним, а отримані результати дозволять підвищити технічні та економічні характеристики обладнання для 3D друку та сприятимуть підвищенню конкурентоздатності підприємств легкої промисловості.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота виконувалась в рамках договору між ПП «Кредо» та Хмельницьким національним університетом: «Розробка обладнання для рециклінгу полімерних відходів взуттєвого виробництва» (№ 02-2021ТС, номер державної реєстрації 0121U110126), 2021-2024 р.р.

### **Наукова новизна результатів дисертаційної роботи**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у наступному:

1) Вперше отримано регресійні рівняння, що враховують залежність об'ємної продуктивності шнекового екструдера від його конструктивних та технологічних параметрів та фізико-механічних властивостей матеріалу. Експериментально підтверджена адекватність отриманої математичної моделі.

2) Отримав подальший розвиток аналітичний метод розрахунку параметрів шнекового екструдера, а саме: коефіцієнту опору сопел, об'ємної продуктивності, тиску в шнековому каналі, потужності приводу.

3) Розроблено систему охолодження шнекового екструдера, що передбачає використання теплового бар'єру і повітряного обдуву. Проведено дослідження запропонованої системи із використанням програмного комплексу SolidWorks Simulation.

4) На основі експериментальних досліджень характеристик подрібнених полімерних відходів створено математичну модель залежності насипної густини матеріалу від діаметру його частинок.

### **Структура та зміст дисертації**

Дисертація складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту роботи складає 179 сторінок.

У **вступі** наведено відомості щодо актуальності дисертаційної роботи, сформульовані мета, завдання, задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, розкриті методи дослідження, показано особистий внесок здобувача, наведено інформацію щодо апробації роботи та наукових публікацій.

У **першому розділі** проведено аналіз використання адитивних технологій та обладнання для 3D друку. Визначено можливості їх застосування для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості. Проведено детальне порівняння конструкцій вітчизняного та закордонного обладнання, визначено напрями його вдосконалення. Зокрема проаналізовано конструкції екструзійних сопел 3D принтерів та визначено основні параметри, що впливають на їх ефективність. Також у розділі представлені результати аналізу властивостей пластиків, що спрощує вибір полімерних матеріалів відповідно до задач виробництва. Визначено можливості використання полімерних відходів у процесах 3D друку, що спрощує їх утилізацію та сприяє підвищенню економічної ефективності використання адитивних технологій. На основі отриманих результатів визначені задачі дослідження.

У **другому розділі** представлено результати аналітичного дослідження параметрів шнекового екструдера для обладнання 3D друку. Здобувачем розроблено математичну модель роботи екструдера в зоні живлення шнеку, що дозволяє на основі заданих параметрів шнека визначати об'ємну продуктивність. Також запропонована модель враховує фізичні та геометричні параметри матеріалу. На основі отриманих результатів, рекомендовано використання двох конструкцій сопел шнекового екструдера, що дозволяють підвищити точність друку та міцність надрукованих деталей. Також автором розроблено математичну модель, яка на основі конструктивних та технологічних параметрів шнеку і властивостей полімерних матеріалів дозволяє визначити необхідну потужність електроприводу шнеку та, відповідно, здійснити обґрунтований вибір електродвигуна.

У **третьому розділі** запропоновано конструкцію екструдера 3D принтера. Розраховано та виготовлено експериментальний зразок шнекового екструдера.

Проведено розрахунки режимів роботи за допомогою програмного комплексу SolidWorks, що дозволило поліпшити його конструктивні та технологічні параметри. Наведена технічна документація на основі якої було виготовлено деталі шнекового екструдера, обрані електропривод, нагрівальний блок та система охолодження. Показано, що використання запропонованого екструдера у складі 3D-принтера дозволяє здійснювати друк з гранулами полімерних матеріалів та подрібненою вторинною сировиною. Також у розділі представлені результати проведених експериментальних досліджень теплових режимів роботи обладнання та на їх основі обрано матеріали для системи охолодження та її конструкцію. Перевірка роботи 3D-принтера з шнековим екструдером здійснювалась на основі аналізу дефектів роздрукованих деталей «куб» та «шестерня».

У **четвертому розділі** представлені результати експериментальних досліджень використання подрібнених відходів ABS, PLA та TPU пластиків, підтверджено можливість їх використання як сировини для 3D-друку. Показано залежності насипної густини подрібнених матеріалів від діаметрів їх частинок. Також досліджено вплив діаметрів частинок, частоти обертання шнеку та температури плавлення матеріалу на об'ємну продуктивність запропонованого обладнання. Перевірено адекватність отриманої математичної моделі та її відповідність теоретичним результатам, що були представлені у другому розділі роботи.

**П'ятий розділ** містить результати дослідження деталей, що були надруковані з використанням 3D-принтера з запропонованим шнековим екструдером. Експериментально визначено механічні властивості отриманих деталей та здійснено їх порівняння з деталями роздрукованими на 3D-принтері, що серійно виробляється промисловістю. Аналіз цих даних дозволив виявити та чисельно оцінити переваги шнекових екструдерів запропонованої у роботі конструкції. Також визначено вплив сировини на механічні характеристики роздрукованих деталей. На основі отриманих даних розроблено рекомендації щодо проектування та виготовлення 3D-принтерів запропонованої конструкції.

Представлено результати впровадження отриманих результатів у освітній процес та промисловість, наведено дані щодо отриманого економічного ефекту.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірності**

Наукові положення, отримані результати, висновки та рекомендації в достатній мірі підтверджені теоретично та експериментально. Підставою для цього є коректна постановка мети та завдань, ґрунтовний аналіз стану актуальних розробок в галузі адитивних технологій, результати теоретичних та експериментальних досліджень, використання відомих методів наукових досліджень та планування експерименту. При проведенні досліджень автор спирався на положення теорії механіки полімерних матеріалів, механіки твердого тіла, теорії переробки полімерів. Експериментальні дослідження виконувались із використанням розробленого автором дослідного стенду, що включає шнековий екструдер запропонованої конструкції. Вимірювання здійснювалось із використанням приладів, що забезпечують необхідну точність. При обробці результатів експериментальних даних використовувались методи математичної статистики, чисельні розрахунки здійснювались із використанням сучасних програмних засобів, зокрема, SolidWorks та Mathcad.

Таким чином, наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи Поліщука А. О. мають достатній ступінь обґрунтованості та достовірності.

### **Практичні результати дисертаційної роботи**

Запропонована у дисертаційній роботі конструкція шнекового екструдера для 3D-принтера дозволяє розширити можливості використання вторинної сировини в якості вихідних матеріалів для друку. Таким чином, вирішуються дві актуальні задачі: знижується собівартість деталей і виробів надрукованих із використанням запропонованого обладнання та спрощується вирішення проблеми утилізації полімерних матеріалів за рахунок їх повторного використання. Розроблене обладнання може використовуватись на підприємствах легкої промисловості для виготовлення виробів та окремих деталей методом 3D-друку.

Практична значимість результатів дисертаційної роботи підтверджується актами впровадження у виробництво ПМП «Вінтел», ПП «КМ-Поділля», ТОВ «Спарк-Швейне обладнання» та освітній процес Хмельницького національного університету, що представлені у додатках.

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

Дисертаційна робота має логічну структуру. До її складу входять: анотація, зміст, перелік умовних скорочень, вступ, п'ять розділів, висновок, список використаних джерел та додатки. Повний обсяг дисертації складається з 262 сторінок друкованого тексту, основний текст викладено на 179 сторінках. Робота містить 134 рисунки та 12 таблиць. У дисертації не виявлено текстових запозичень, використання матеріалів з робіт інших авторів позначені посиланнями на відповідні джерела. Розділи роботи пов'язані між собою, теоретичні дослідження підтверджуються відповідними експериментами і на їх основі зроблені висновки.

Результати наукових досліджень повністю викладено у 38 опублікованих працях, з яких 13 наукових статей у фахових наукових журналах України, 2 статті індексовані у наукометричній базі Scopus, 1 патент України на корисну модель. Апробація засвідчена публікаціями 16 праць в матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій.

### **Мова та стиль дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота написана українською мовою. Матеріал викладено послідовно та доступно. Автор дотримується наукового стилю, використовує наукову термінологію за темою дослідження. Структурні схеми, таблиці, креслення та ілюстрації виконані якісно та достатньою мірою доповнюють текстовий матеріал. В цілому, мова та стиль відповідають вимогам, що висуваються до дисертаційних робіт.

## Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації

1. На с. 91 наведено рекомендації щодо вибору кроку гвинтової нарізки (формула 2.42) та ширини гребеня витка (формула 2.43), доцільно вказати посилання на джерело цих рекомендацій.

2. На с. 114 (абзац 2) зазначено, що «Привод шнеку підбирався експериментальним шляхом», доцільно детальніше пояснити чому був обраний саме такий метод. Адже у розділі 2 представлено розроблений автором розрахунок потужності приводу, та на с. 119 вказано, що цей розрахунок використовувався для розрахунку потужності приводу шнекового екструдера.

3. На с. 119 вказано, що використання SolidWorks Simulation дозволило провести симуляцію процесу заклинювання шнека. І це дало змогу детально вивчити і проаналізувати умови та фактори, які можуть призвести до механічних збоїв у роботі шнека та екструдера в цілому. Але не наведені результати цього дослідження, тобто не вказано за яких саме умов та факторів виникають механічні збої.

4. На с. 124 вказано, що «Програмне забезпечення принтера, включаючи слайсер та інтерфейс керування, було оновлено та адаптовано, щоб вони могли адекватно обробляти параметри друку шнекового екструдера, включаючи швидкість екструзії, температуру та інші спеціальні налаштування». Але інформація про те як саме здійснювалась ця адаптація в роботі не наведена. Її доцільно було б викласти в додатках до роботи.

5. На рис. 4.10, 4.11, 4.12 наведені рівняння регресії розподілу подрібнених часток пластиків різних типів. Не вказано чому для ABS та PLA пластиків використані рівняння 2-го порядку, а для TPU – третього. Також доцільно було б зробити аналіз отриманих рівнянь регресії.

6. Результати обробки експериментальних досліджень (рис. 4.13, 4.14, 4.15) представлені у вигляді рівнянь регресії 2-го порядку, але не наведено інформацію про перевірку адекватності цих моделей.

7. У роботі зустрічаються недоліки у оформленні та механічні помилки. Зокрема, дрібні написи на рис. 4.16; на рис. 4.12 – масова доля фракцій у рівнянні регресії позначена літерою «у», а на рис. 4.10 та 4.11 – літерами « $M_{\phi}$ »; на с.46 у

фразі «При введенні ключових слів «3D-printer» у патентну базу було отримано 105 результатів» пропущене слово «тисяч» після цифри «105».

Разом з тим, хочу зазначити, що вказані вище зауваження істотно не знижують наукову новизну та практичну цінність роботи.

### **Загальні висновки щодо дисертації**

Дисертаційна робота Поліщука Андрія Олеговича «Удосконалення обладнання тривимірного друку для виготовлення деталей та виробів легкої промисловості», подана до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» виконана на високому рівні, є самостійним та завершеним дослідженням, що має наукову та практичну цінність. Дисертація відповідає вимогам пп. 6, 7, 8, 9 «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, а її автор, Поліщук Андрій Олегович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».

Офіційний опонент:

д.т.н., проф., доцент кафедри комп'ютерної  
інженерії та електромеханіки

Київського національного університету

технологій та дизайну

 Володимир СТАЦЕНКО

*Директор заповідника*  
*Вз. секрет*



*Дерває Д.В.*