

УДК 678.027.3

ПОЛІЩУК А. О.

Хмельницький національний університет, Україна

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА, ЩО ВИКОРИСТОВУЄ ГРАНУЛИ АБО ПОДРІБНЕНІ ЧАСТКИ ПОЛІМЕРУ В ЯКОСТІ ВИХІДНОЇ СИРОВИНИ

Мета. Розробка конструкції шнекового екструдера 3D-принтера, який використовує гранули або подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини і забезпечує точний та стабільний процес екструзії полімеру для 3D-друку моделей.

Методика. У роботі використано метод системного, теоретичного та порівняльного аналізів. Теоретичні та практичні дослідження базуються на фундаментальних принципах і знаннях в області галузевого машинобудування, теплотехніки, а також враховують особливості та вимоги, пов'язані з переробкою полімерів, забезпечуючи ефективність цього процесу.

Результати. Проведено огляд способів виготовлення виробів та деталей та обґрунтовано адитивний метод як перспективний для створення виробів 3D-друком. Розглянуто різні типи та підходи до адитивного виробництва на основі екструзії та запропоновано використати шнекову екструзію в екструдері, що друкує гранулами чи подрібненими частками полімеру. Розроблено геометрію шнека, що оптимізує процес плавлення та подачі полімерних матеріалів, підвищуючи якість друку та скорочуючи час екструзії. Удосконалено конструкцію завантажувального бункера, яка забезпечує рівномірну та ефективну подачу гранул та подрібнених часток полімеру в матеріальний циліндр обертовим шнеком. Розроблено систему охолодження корпусу екструдера та завантажувального бункера. Спроектовано сопло з внутрішньою геометрією, що оптимізує потік розплавленого полімеру, підвищує точність друку. Встановлено розроблений шнековий екструдер замість екструдера, що друкує філаментом на 3D-принтер. Синхронізовано роботу основних елементів 3D-принтера з розробленим екструдером та оптимізовано режими їх роботи. Проведено процес друку тестових зразків та готових деталей з використанням розробленого шнекового екструдера.

Наукова новизна. Встановлено раціональні співвідношення між конструктивними параметрами елементів шнекового екструдера 3D-принтера, що дозволяють збільшити ефективність подачі полімеру, зменшити час друку та забезпечити більш рівномірне розплавлення і екструзію пластику.

Практична значимість. Розроблено екструдер з обертовим шнеком для 3D-принтера, що друкує гранулами чи частками подрібненого полімеру. Синхронізовано роботу запропонованого шнекового екструдера з елементами 3D-принтера, що забезпечило високу якість друку, надійність та загальну ефективність обладнання після удосконалення.

Використання гранул або подрібнених частин полімеру може бути значно дешевшим, ніж використання традиційного філаменту. Це робить 3D-друк більш доступним та економічно вигідним, особливо для великомасштабного виробництва. Використання перероблених матеріалів сприяє поліпшенню екологічної безпеки, дозволяє зменшити об'єм полімерних відходів. Шнековий екструдер дозволяє використовувати ширший спектр полімерних матеріалів, включаючи полімери, які можуть бути непридатними для філаментного друку. Розробка шнекового екструдера для 3D-принтера відкриває нові горизонти в практичному використанні 3D-друку, забезпечуючи більш економічно вигідні, екологічно сталі та інноваційні рішення для різних сфер застосування.

Ключові слова: полімерний матеріал; гранули; подрібнені частки; шнековий екструдер; шнек; 3D-принтер.

Вступ. Актуальні економічні умови чітко підкреслюють, що машинобудівна галузь становить фундаментальну основу розвитку будь-якої держави, оскільки відіграє ключову роль у прискоренні технологічного та наукового розвитку. Ця галузь надає необхідне

устаткування для інших секторів економіки, сприяючи тим самим їхньому оновленню та збільшенню капітальних активів. Окрім цього, машинобудівний сектор є однією з лідируючих галузей за обсягом виробництва, інвестиційною привабливістю та кількістю працівників, займаючи провідні позиції в структурі світової промисловості [1].

Світовий промисловий ринок рухається під впливом технологічних нововведень у машинобудівній галузі та прогресу в управлінні виробничими процесами. Виробничі підприємства інтенсифікують зусилля з метою розширення виготовлення високотехнологічного обладнання, інтегруючи останні технологічні досягнення. Машинобудування відіграє ключову роль у розвитку інших секторів економіки, надаючи необхідне устаткування та технології, що варіюються від виробництва споживчих товарів до спеціалізованого обладнання. Це включає забезпечення обладнанням галузей, таких як гірничодобувна промисловість, легка промисловість, енергетика, аграрний сектор, медицина, будівельна індустрія тощо [2, 3].

Основною задачею галузевого машинобудування є створення новітнього устаткування. Розробка такого обладнання є актуальною задачею, оскільки вона стимулює технологічний розвиток та інноваційні процеси в промисловості. Це дозволяє компаніям підвищувати ефективність виробництва, знижувати витрати та оптимізувати робочі процеси. Оновлення технічного парку допомагає впроваджувати передові методи виробництва, зокрема автоматизацію та роботизацію, що є ключовими факторами у забезпеченні конкурентоспроможності на глобальному ринку.

Багато в чому ефективність новітнього обладнання залежить від способів його виготовлення, оскільки кожен аспект процесу виробництва впливає на якість, надійність та ефективність кінцевого продукту. Використання передових технологій і матеріалів у процесі виготовлення забезпечує високу точність, тривалий термін служби та оптимальну продуктивність обладнання. Сучасні способи виготовлення обладнання мають вирішальне значення для його загальної ефективності та конкурентоспроможності на ринку. Підходи до виробництва, які орієнтовані на інновації, якість та сталість, є ключовими у створенні високоефективного та надійного обладнання [4, 5].

Постановка завдання. Розробити шнековий екструдер, який використовує гранули або подрібнені частки TPU, PLA, ABS тощо як вихідну сировину та забезпечити його сумісність з існуючими конструкціями 3D-принтерів.

Результати дослідження. На сьогоднішній день існують різні способи виготовлення виробів. Провівши аналіз технічної літератури [6–9], їх можна розділити на три групи. Класифікація способів виготовлення виробів та деталей представлена на рис. 1.

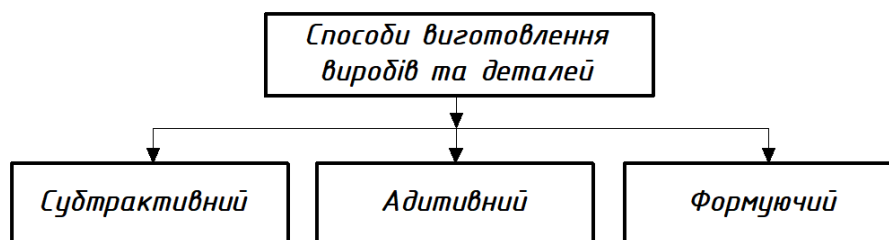


Рис. 1. Класифікація способів виготовлення виробів і деталей

Субтрактивний, адитивний та формуючий методи виробництва представляють собою різні підходи до створення фізичних об'єктів. Кожен з них має свої особливості та застосування.

Метод субтрактивного виробництва передбачає видалення матеріалу із заготовки для досягнення потрібної форми. Типові приклади субтрактивного виробництва включають

фрезерування, токарну обробку, свердління, шліфування та інші види механічної обробки. Перевага цього методу полягає у високій точності та якості поверхні, що обробляється. Він також часто супроводжується значними відходами матеріалу та обмеженнями у складності форми готового виробу.

Метод адитивного виробництва (3D-друк) включає послідовне накладання матеріалу шар за шаром для створення об'єкта. Він, зазвичай, використовує пластик, метал, кераміку або інші матеріали у вигляді порошку, смоли, ниток тощо. Адитивне виробництво дозволяє створювати складні геометричні форми з високою ступеню індивідуалізації, що є недосяжним для більш традиційних методів. Проте, цей метод може мати обмеження щодо якості поверхні та механічних властивостей виробів.

Метод формуючого виготовлення виробів включає створення об'єктів шляхом впливу робочого інструменту на матеріал у м'якому або рідкому стані для його формування в потрібну конфігурацію. Формуючі методи включають лиття під тиском, вакуумне формування, лиття з використанням форм, екструзію тощо. Ці методи дозволяють здійснювати масове виробництво виробів із стабільними розмірами та властивостями. Однак, вони часто вимагають значних витрат на виготовлення прес-форм та обмежують можливості їх зміни без додаткових затрат.

Для розробки шнекового екструдера 3D-принтера, що використовує гранули чи подрібнені частки полімеру було вибрано адитивний спосіб виготовлення виробів та деталей.

При субтрактивному виробництві виникає більша кількість відходів, ніж при адитивному. Проте при адитивному виробництві, в процесі виготовлення виробів за допомогою 3D-друку, утворюються полімерні відходи. Основними типами полімерних відходів, що виникають у цьому процесі, можуть виступати: невдало надруковані деталі через неправильну форму чи друк з дефектами; підтримуючі структури, які необхідні для стабілізації деталей під час друку та які в подальшому видаляються; підложки та краї першого шару, необхідні для виключення деформації та відлипання деталі від платформи 3D-принтера тощо. Відходи пластику ABS, що утворилися в процесі 3D-друку деталей та виробів приведені на рис. 2.



Рис. 2. Відходи пластику ABS, що утворилися під час 3D-друку

На сьогодні, основним матеріалом, який використовується для 3D-друку методом FDM, є мононитка. За останні кілька років 3D-принтери стали дуже популярними, і мононитки стали основним витратним матеріалом для цієї технології. Мононитками легко користуватися і зберігати. Однак, окрім полімерних ниток, для FDM 3D-друку також використовують інші види витратних матеріалів. Наприклад, гранули або дрібні частки полімерного матеріалу можуть бути альтернативою. У більшості випадків гранули є вихідним матеріалом для

виробництва пластикових виробів за допомогою ливарного обладнання. Щодо мононитки, гранули є початковим матеріалом для її виробництва.

Виготовлення мононитки із гранул збільшує вартість витратного матеріалу та, відповідно, вартість виробів, виготовлених за допомогою 3D-друку, у порівнянні з використанням гранул або подрібнених часток пластику.

3D-друк гранулами має ряд переваг, таких як більша швидкість друку та зменшення вартості готових виробів. Однак цей підхід технологічно складніший. Навіть якщо гранули добре ущільнені, між ними завжди існують повітряні проміжки, які потрапляють в сопло 3D-принтера разом із розплавленим полімером і можуть порушити однорідність шару. Рівномірність подачі такого матеріалу також залежить від конструкційних особливостей механізму подачі, форми гранул та їх розмірів [10]. Усі ці аспекти необхідно враховувати при проєктуванні шнекового екструдера. Наразі, цей вид принтерів знаходиться на стадії розробки та потребує експериментальних досліджень [11–16].

У майбутньому 3D-друк полімерними гранулами чи подрібненими полімерними відходами у промисловості стане конкурентоспроможним порівняно з іншими методами 3D-друку та видами витратних матеріалів.

Однією з найпоширеніших форм адитивного виробництва та форм 3D-друку є використання методів екструзійного осадження матеріалів, відомих як Fused Deposition Modeling (FDM) або Fused Filament Fabrication (FFF) [13, 17]. Цей процес включає подачу термопластичного полімеру через екструдер, що нагрівається та який точно наносить розплавлений матеріал шар за шаром на робочу платформу для створення тривимірного об'єкта.

Перевагою FDM-технології є її відносна простота та доступність, що робить її популярною серед користувачів. FDM-принтери підтримують велику кількість полімерних матеріалів, таких як PLA, ABS, PETG, TPU, і навіть спеціалізованих композитних матеріалів, що вміщують частки: деревини; металу (мідь, сталь, бронза), вуглецевих та скляних волокон [18, 19].

Однак, існують деякі обмеження, пов'язані з FDM-друком, такі як нижча точність деталізації порівняно з іншими адитивними технологіями, такими як стереолітографія (SLA) або селективне лазерне спікання (SLS) [20]. Також FDM може стикатися з проблемами при друку перекриття та мостів без підтримки матеріалу, хоча сучасні програмні рішення частково допомагають подолати ці проблеми.

Загалом, метод екструзійного осадження матеріалів в адитивному виробництві продовжує еволюціонувати, пропонуючи більшу гнучкість, якість та ефективність для широкого спектра застосувань.

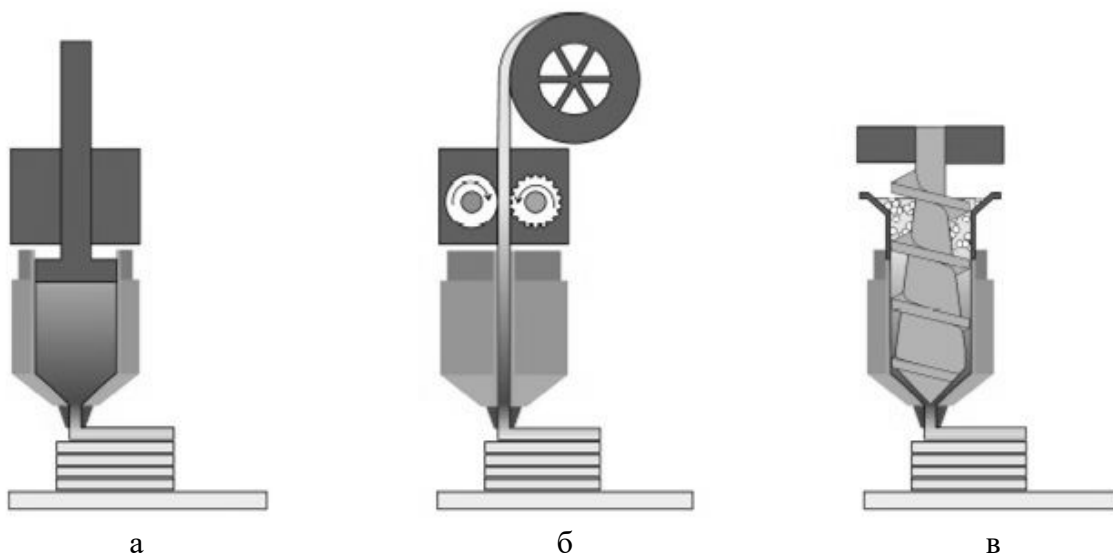
В першу чергу для того, щоб розробити конструкцію екструдера 3D принтера для друку виробів гранулами чи подрібненими полімерами, необхідно вивчити процес шнекової екструзії.

Адитивне виробництво на основі екструзії може використовувати різні механізми для подачі полімерного матеріалу: плунжерний (поршневий); філаментний (нитка-основа) та шнековий (рис. 3) [16, 21, 22]. Кожен з цих типів має свої особливості та призначення.

При плунжерному методі (Piston Extrusion) матеріал (зазвичай глина або інший пастоподібний матеріал) поміщається у відсік, з якого він витісняється через сопло під тиском плунжера або поршня (рис. 3,а). Цей метод наприклад використовується для виробництва керамічних деталей у промисловості або в мистецтві. Він дозволяє контролювати кількість матеріалу, що витісняється, і є ефективним для матеріалів з високою в'язкістю.

Одним з найпоширеніших методів 3D-друку є метод FFF з використанням нитки-основи (рис. 3,б). У цьому процесі термопластичний філамент змотується з котушки і

подається через екструдер, що нагрівається. В ньому він розплавляється, видавлюється через сопло на якому встановлено нагрівальний елемент і осаджується шар за шаром на платформі принтера. Метод FFF підходить для великої кількості пластиків, включаючи PLA, ABS, TPU та інші [23].



Джерело: [21].

**Рис. 3. Різні типи та підходи до адитивного виробництва на основі екструзії:
а – плунжерний; б – філаментний; в – шнековий**

При шнековому методі (Screw Extrusion) використовується шнек для подачі матеріалу через сопло (рис. 3,в). Вони часто використовуються в промислових 3D-принтерах для обробки великої кількості матеріалу, включаючи високов'язкі та композиційні матеріали. Обертовий шнек (рис. 3,в) застосовується для забезпечення безперервної подачі матеріалу та створення достатньо високого тиску в камері екструдера, що, в свою чергу, збільшує швидкість та роздільну здатність друку в порівнянні з виготовленням методом наплавлення (FDM) (рис. 3,б) та процесами 3D-друку на основі поршня (рис. 3,а). Екструзія з обертовим шнеком забезпечує кращий контроль над потоком матеріалу і дозволяє більш точно дозувати його кількість, порівняно з екструзією з використанням філаменту. Крім того, обертовий рух шнеку розширює змішувальні можливості системи, тим самим поліпшуючи однорідність матеріалу, що екструдується. Таким чином, це дозволяє обробляти більш широкий спектр сировини та переробляти вторинний полімерний матеріал під час екструзії.

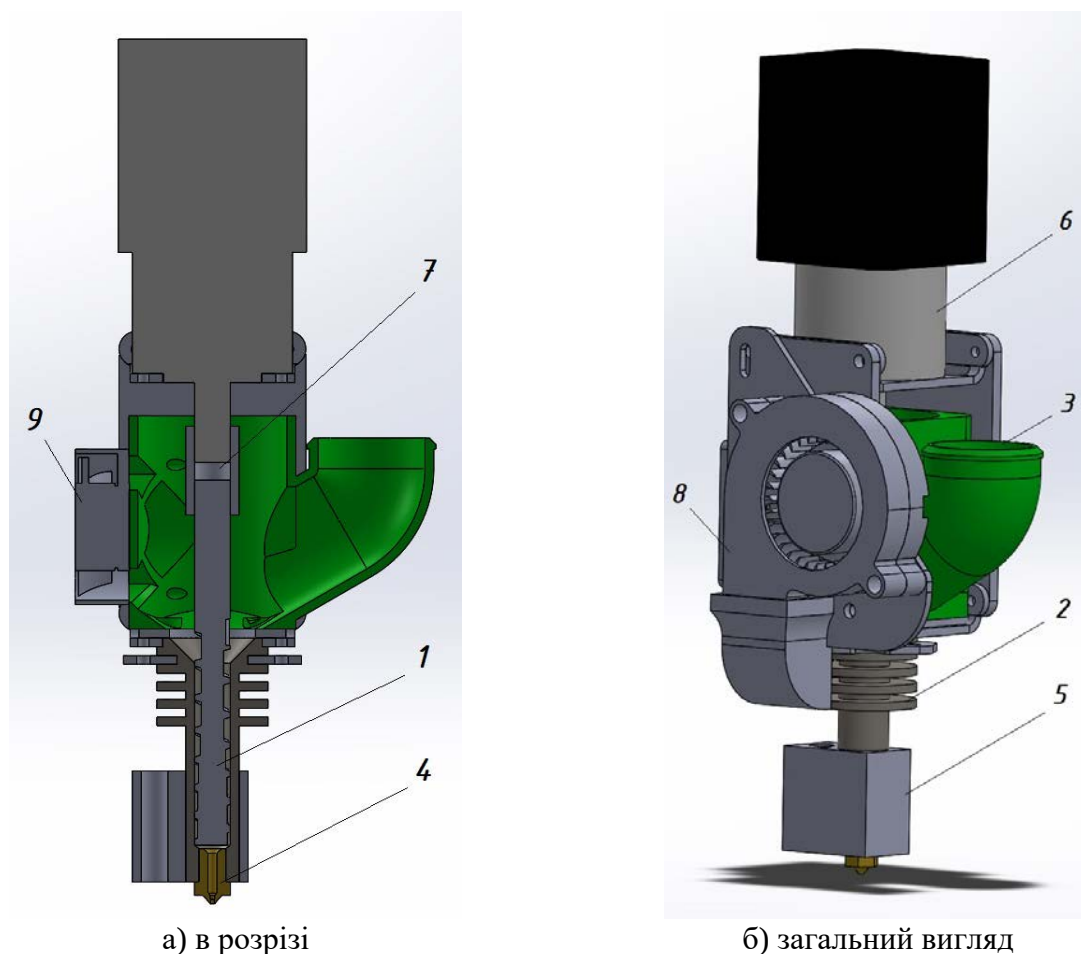
Кожен з цих методів екструзійного адитивного виробництва має свої переваги та обмеження та може бути вибраний в залежності від матеріалу, який потрібно переробити та вимог до кінцевого виробу.

В екструдері 3D-принтера, що друкує гранулами або подрібненими частками полімеру в якості робочого органу було вибрано шнек. Було спроектовано та виготовлено експериментальний екструдер з використанням обертового шнеку.

Першим етапом при його створенні була розробка моделі в програмному середовищі SolidWorks [24, 25]. 3D-модель спроектованого екструдера приведена на рис. 4.

Створення 3D-моделі шнекового екструдера для 3D-принтера в програмному середовищі SolidWorks включало моделювання основних елементів: шнека; матеріального

циліндра; завантажувального бункера; сопла; нагрівального блоку; механізму приводу шнека та вентиляторів охолодження [26, 27, 28].



а) в розрізі

б) загальний вигляд

Легенда: 1 – шнек; 2 – матеріальний циліндр; 3 – завантажувальний бункер; 4 – сопло; 5 – нагрівальний блок; 6 – мотор-редуктор; 7 – з'єднувальна муфта; 8 – вентилятор обдуву охолоджувальних ребер; 9 – вентилятор обдуву завантажувального бункера.

Рис. 4. Шнековий екструдер

Центральною частиною екструдера є шнек, який відповідає за переміщення матеріалу із завантажувального бункера в зону плавлення, а в подальшому розплавленого полімеру через сопло на платформу 3D-принтера. Тому моделювання шнека екструдера у SolidWorks вимагало точності, оскільки шнек є ключовою частиною екструдера, що відповідає за подачу та однорідне перемішування матеріалу.

Процес моделювання даного робочого органу включав наступне. Першим кроком було визначення основних параметрів шнека, таких як діаметр, крок гвинта, довжина та глибина каналів. Ці параметри впливають на ефективність шнека при виконанні операції переміщення та розплавлення полімеру. У SolidWorks моделювання шнеку розпочиналося зі створення основного профілю гвинта, який може бути виконаний за допомогою інструменту «Helix/Spiral». Профіль спіралі визначає форму та розташування спіральної каналів шнека. Після створення гвинта, наступним кроком було моделювання фактичного тіла шнека, яке виконувалося за допомогою інструменту «Sweep» з використанням основного профілю спіралі.

До моделі додавалися додаткові деталі, такі як кінець шнека, зони подачі та розплавлення, а також інші функціональні елементи, які можуть знадобитися в залежності від застосування. За допомогою SolidWorks було виконано аналіз, з метою переконатися, що шнек ефективно виконує свої функції. Він включав аналіз механічних напружень, теплового розподілу та динаміки руху матеріалу. Після завершення моделювання та оптимізації, готова модель шнека була підготовлена для виробництва, з урахуванням специфіки виготовлення (наприклад, обробка на токарному чи фрезерному станку).

Створення моделі шнека в SolidWorks дозволило отримати детальне уявлення про його конструкцію та функціональність, що є критично важливим для розробки ефективних та надійних шнекових екструдерів.

В матеріальному циліндрі екструдера розміщується шнек і обладнання для його приводу. Він включає монтажні отвори, вхід для подачі твердого матеріалу та вихід для розплавленого полімеру. В SolidWorks для моделювання корпусу використовувалися інструменти екструзії. Починалося моделювання зі створення циліндричної форми з потрібним діаметром та довжиною. Верхня частина циліндра оснащується охолоджуючими ребрами, які допомагають розсіювати тепло, що генерується під час екструзії. Моделювання дозволило визначити розміри та інтервали між ребрами, щоб оптимізувати процес охолодження. Це включало врахування висоти, ширини та кількості ребер. За допомогою аналітичних інструментів SolidWorks було проведено тепловий аналіз для оцінки ефективності охолоджуючих ребер у розсіюванні тепла. Модель враховує, як циліндр з охолоджуючими ребрами інтегрується з шнеком та іншими компонентами екструдера, такими як завантажувальний бункер, нагрівальний блок та механізми кріплення. Моделювання матеріального циліндра з охолоджуючими ребрами у SolidWorks дозволило не тільки точно відтворити його фізичні характеристики, але й довело, що циліндр буде ефективно виконувати свої функції в межах системи шнекового екструдера.

Створення моделі завантажувального бункера у програмному середовищі SolidWorks включало ряд ключових етапів, виходячи з функціональних вимог та його конструктивних характеристик. Зазвичай, початок проектування включав створення основної форми бункера. Це міг бути прямокутний або циліндричний завантажувальний контейнер. В SolidWorks це можна зробити за допомогою інструментів екструзії та обертання для створення основної геометрії. Додавалися вхідні та вихідні отвори в бункері потрібної форми та розмірів. Передбачені кріпильні елементи для інтеграції бункера з іншими частинами 3D-принтера. За допомогою SolidWorks було здійснено аналіз напружень, динаміки гранульованих матеріалів всередині бункера, щоб переконатися в його ефективності та надійності. Проведено оптимізацію дизайну для зниження вартості виготовлення та поліпшення функціональних характеристик. Процес моделювання в SolidWorks дозволив не тільки візуалізувати дизайн завантажувального бункера, але й провести важливі аналітичні розрахунки, перш ніж перейти до його фактичного виготовлення.

Моделювання сопла в матеріальному циліндрі шнекового екструдера в програмному середовищі SolidWorks відбувалося наступним чином [29]. Спочатку було створено його 3D-модель. Модель сопла включала в себе компоненти, такі як діаметр сопла, його форма і різні параметри, які впливають на процес виходу матеріалу із нього. Сопло було розміщено в нижній частині матеріального циліндра шнекового екструдера. Це забезпечило те, що розплавлений полімер буде подаватися на робочу платформу 3D-принтера рівномірно. Процес моделювання дозволив створити та інтегрувати сопло в матеріальний циліндр шнекового екструдера в SolidWorks, забезпечуючи оптимальну роботу екструдера і якісний вихід матеріалу.

Моделювання нагрівального блоку із встановленим нагрівальним елементом для шнекового екструдера в SolidWorks вимагає уваги до деталей, що стосуються теплопровідності, механічної міцності та інтеграції з іншими частинами екструдера. Нагрівальний блок, як правило, є металевою деталлю, що відповідає за рівномірний розподіл тепла. У SolidWorks цю деталь можна створити через вибір відповідного металу. В моделі використано алюміній через його теплопровідні властивості. Було вибрано керамічний нагрівальний елемент. Для його встановлення було змодельовано канал в нагрівальному блоці. У SolidWorks з цією метою було створено відповідний отвір у ньому. Передбачено теплову ізоляцію для запобігання передачі тепла на інші частини екструдера, зокрема на завантажувальний бункер. В нагрівальному блоці передбачено місце для встановлення термістора для контролю температури.

Модель враховує, як нагрівальний блок інтегрується з шнековим механізмом та іншими компонентами екструдера, включаючи монтажні отвори та з'єднання.

За допомогою SolidWorks було проведено аналіз теплового розподілу, щоб переконатися, що тепло розподіляється рівномірно і не впливає на роботу екструдера та не передається до бункера в якому знаходяться гранули чи подрібнені частки полімеру.

Механізм приводу шнека включав планетарний мотор-редуктор, передавальний елемент (муфту), які приводять шнек у рух. У SolidWorks ці елементи моделювалися з врахуванням їх реальних розмірів та функціонального призначення, а також взаємодії з завантажувальним бункером, матеріальним циліндром та шнеком. Використання функцій SolidWorks для симуляції руху та аналізу, дало змогу переконатися, що мотор-редуктор синхронізований із шнековим механізмом і працює ефективно та забезпечує достатній крутний момент і витримує механічні навантаження під час роботи.

Інтеграція із бібліотеки готових моделей вентиляторів для повітряного обдуву охолоджуючих ребер матеріального циліндра шнекового екструдера та завантажувального бункера в SolidWorks вимагала уваги до деталей розташування та ефективності охолодження. Вентилятори були розташовані таким чином, щоб потік повітря був максимально ефективний для охолодження ребер та полімерного матеріалу у бункері. Це включало врахування кута нахилу та відстані вентиляторів від ребер та полімерного матеріалу. Було використано інструменти SolidWorks для симуляції та аналізу потоків повітря, що генеруються вентиляторами, для переконання у ефективності охолодження.

Інтеграція готових моделей вентиляторів для охолодження в SolidWorks дозволила оптимізувати конструкцію для ефективного охолодження, забезпечуючи стабільність температури та підвищення ефективності роботи шнекового екструдера.

Таким чином створення моделі шнекового екструдера за допомогою програмного продукту дало змогу візуалізувати дизайн, провести різноманітні розрахунки, щоб забезпечити його ефективність та надійність перед виготовленням.

В подальшому, використовуючи отриману технічну документацію та креслення, було проведено виготовлення спроектованих та підбір стандартних деталей, вибір елементів приводу, нагрівального блоку та системи охолодження. Загальний вигляд шнекового екструдера представлено на рис. 5.

Розроблений екструдер було встановлено замість екструдера, що друкує філаментом на 3D-принтер Anycubic Mega S з технологією друку FMD китайської компанії Anycubic [30]. Загальний вигляд даного принтера приведено на рис. 6.

Anycubic Mega S – це великий FDM-принтер з просторою площадкою для друку, що дозволяє створювати великі об'єкти або декілька дрібніших об'єктів одночасно. Цей принтер оснащений металевою конструкцією, яка забезпечує стабільність і точність друку, а також має

платформу для друку, що нагрівається. Наявність нагріву допомагає запобігати деформації виробів і підвищує адгезію першого шару.

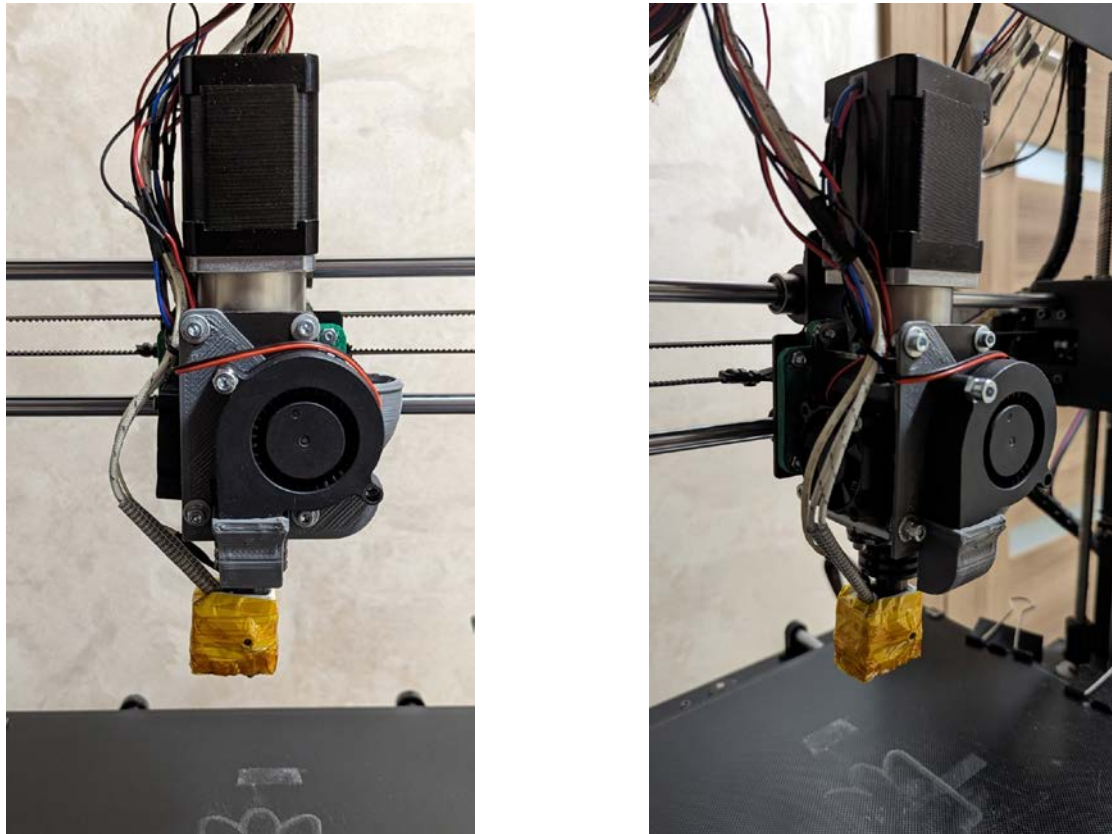


Рис. 5. Загальний вигляд шнекового екструдера

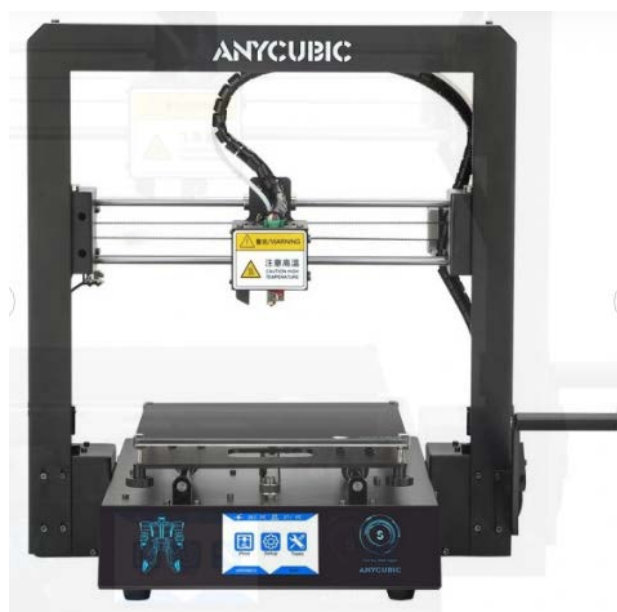


Рис. 6. Загальний вигляд 3D принтера Anycubic Mega S

Принтер також має інтуїтивно зрозумілий сенсорний екран для керування процесом друку та підтримує широкий спектр матеріалів для друку, включаючи PLA, ABS, TPU, що

будуть використовуватися при дослідженнях. Ця модель популярна серед користувачів завдяки своїй надійності та високій якості друку.

Технічні характеристики базової моделі 3D-принтера Anycubic Mega S приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики 3D принтера Anycubic Mega S

№	Параметр	Величина
1	Технологія друку	FDM
2	Кількість екструдерів	1
3	Тип екструдера	Короткий екструдер Titan
4	Кількість сопел	1
5	Область друку, мм	210x210x205
6	Швидкість друку, мм/с	20–100
7	Діаметр сопла (мм)	0,4
8	Товщина шару, мкм	50-300
9	Точність позиціонування, мм:	X/Y 0.0125; Z 0.002
10	Діаметр пластикової нитки	1,75
11	Максимальна температура друку, °C	260
12	Наявність столу, що підігрівається	Так
13	Максимальна температура столу, °C	110
14	Основний матеріал	TPU, PLA, ABS, HIPS та інші
15	Робота в мережах	110 V/ 220 V AC 50-60 Hz, 12 V DC
16	Максимальна споживана потужність, Вт	100–240
17	Софт (Slice)	Cura, Simplify3D, Repetier-HOST
18	Типи файлів	.STL, .OBJ, .DAE, .AMF.
19	Операційна система	WindowsXP, Win7, Win8, Win 10, Linux, Mac OS
20	Вага, кг	11
21	Габарити, мм	405x410x453

При заміні стандартного філаментного екструдера на шнековий екструдер, який друкує гранулами чи подрібненими частками полімеру, було синхронізовано роботу кількох ключових елементів 3D-принтера.

Оскільки шнековий екструдер працює з гранулами або подрібненими частками, а не з філаментом, систему подачі матеріалу було переоптимізовано для роботи з ними.

Шнекові екструдери вимагають точного контролю температури для ефективного плавлення гранул. Температурні режими можуть відрізнятися від тих, що використовуються для філаментних екструдерів, тому систему керування температурою було адаптовано під них.

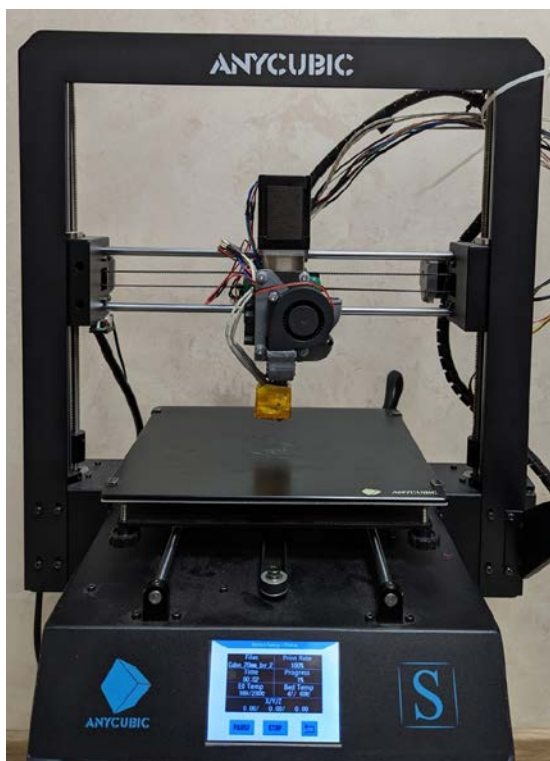
В зв'язку із використанням потужнішого крокового двигуна для приводу шнека та більших його масогабаритних характеристик було внесено корективи для механізмів приводу та крокових двигунів переміщення екструдера по координатах X, Y, Z.

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.

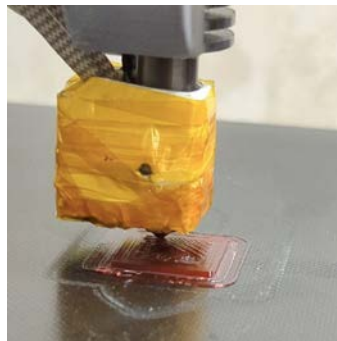
Загальний вигляд 3D-принтера Anycubic Mega S із встановленим шнековим екструдером представлено на рис. 7.

В подальшому, було проведено налаштування оптимальних параметрів 3D принтера із встановленим шнековим екструдером та друк тестового кубика подрібненими частками

пластику TPU (рис. 8,а) [31]. Його друк відбувався з дефектами. Дефекти друку тестового кубика із пластику TPU приведено на рис. 9.



а



б

**Рис. 7. 3D-принтер Anycubic Mega S із встановленим шнековим екструдером:
а – загальний вигляд; б – процес друку деталей (тестовий кубик, шестерня)**

Аналіз цих дефектів допоміг ідентифікувати кілька ключових проблем, які потребували уваги під час подальшої оптимізації процесу друку. Спостерігались варіації в товщині шарів, що могло свідчити про нестабільність подачі матеріалу або недостатньо точне налаштування висоти шару. Частини кубика мали слабе зчеплення між шарами, що вказувало на потенційні проблеми з температурним режимом під час друку. Деякі області кубика мали нерівномірне або неповне заповнення, що могло бути пов'язано з неправильними налаштуваннями швидкості друку або руху екструдера. Було виявлено зміщення деяких шарів відносно один одного, що могло бути результатом неправильної калібрування осей принтера або нестабільності роботи екструдера.



а



б

**Рис. 8. Матеріал для 3D-друку: а – подрібнені частки пластику TPU;
б – мононитка з пластику PLA**

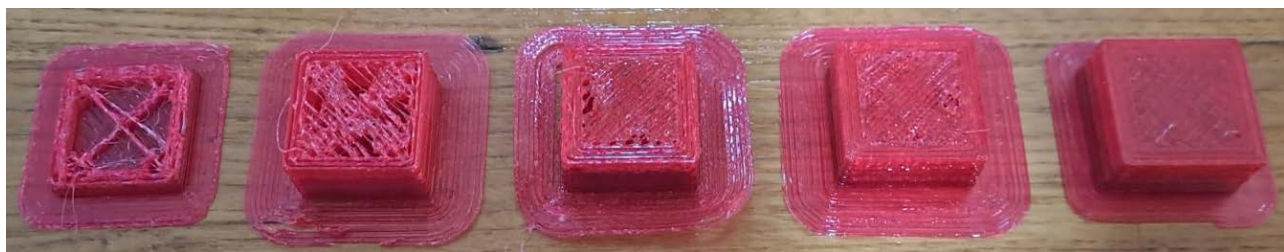


Рис. 9. Дефекти 3D-друку тестового кубика

На основі цих спостережень та дефектів було скореговано параметри друку. В результаті цього було надруковано тестовий кубик із параметрами, що задовольняли (рис. 10,а). Паралельно було надруковано тестовий кубик з пластику PLA (рис. 8,б) на 3D-принтері Anycubic Mega S з філаментним екструдером (рис. 10,б).



а



б

Рис. 10. Надрукований тестовий кубик: а – подрібнені частки пластику TPU;
б – монопіламент пластику PLA

Отриманий зразок тестового кубика, надрукованого подрібненими частками пластику TPU, підтвердив працездатність розробленого шнекового екструдера. Порівняння кубика з TPU з кубиком PLA показало хорошу точність розмірів. Виявлено, що кубик надрукований шнековим екструдером, має краще зчеплення між шарами, що свідчить про більш ефективне плавлення та злиття полімеру під час друку.

Для порівняння також було надруковано деталь «шестерня» із зазначених вище матеріалів (рис. 11).



а



б



в

Рис. 11. Деталь «шестерня»: а – пластик PLA (філаментний екструдер);
б – TPU (шнековий екструдер); в – вид деталей в торець

Друк шестерні на 3D-принтері зі шнековим екструдером подрібненими частками полімеру підтвердив можливість виготовлення виробів та деталей для потреб галузевого машинобудування та легкої промисловості.

Висновки. Розроблений шнековий екструдер для 3D-принтера, що друкує гранулами або подрібненими частками полімеру є значним кроком у розвитку адитивних технологій. Він забезпечує нові можливості для друку різноманітними полімерними матеріалами. Екструдер

дозволяє ефективно використовувати полімерні відходи для створення готових виробів та деталей методом 3D-друку. Дана розробка демонструє поліпшену якість друку завдяки стабільній та рівномірній подачі матеріалу, що важливо для отримання високоякісних друкованих виробів. Завдяки розробленому екструдеру відкривається шлях для подальших інновацій у сфері 3D-друку, зокрема у вдосконаленні технологій переробки та використання полімерних та композиційних матеріалів.

В цілому, дана розробка є значним досягненням, що сприяє розвитку адитивних технологій, забезпечуючи високу ефективність, економічність та екологічну сталість у виробництві.

References

1. Lekhovits, V. O. (2016). Osoblyvosti rozvytku mashynobudivnoi haluzi v suchasnykh umovakh [Features of the development of the machine-building industry in modern conditions]. *Efektivna ekonomika = Effective Economy*, No. 5 [in Ukrainian].
2. Ishchuk, S. O. et al. (2022). Rozvytok mashynobuduvannya v Ukraini: problemy ta shliakhy yikh vyryshennia: monohrafiia [Development of mechanical engineering in Ukraine: problems and ways to solve them: monograph]. State University "Institute of Regional Studies named after M.I. Dolishnyi National Academy of Sciences of Ukraine"; of science editor, Doctor of Economics, prof. S. O. Ishchuk. Lviv. 137 p. [in Ukrainian].
3. Smerichevskyi, S. F., Kryvoviazuk, I. V., Raicheva, L. I., Smerichevska, S. V. (2017). Research on the development of the machine-building industry of Ukraine: state and prospects – multi-authored monograph. Latvia: Izdevnieciba "Baltija Publishing". 200 p.
4. Hurin, V. A., Vostrikov, V. P., Kuzmych, L. V. (2019). Osnovy promyslovykh tekhnolohii i materialoznavstva: navch. posibnyk [Basics of industrial technologies and materials science: teaching. manual]. Rivne: NUVHP. 310 p. [in Ukrainian].
5. Tebenko, V. M. (2014). Ekonomika ta orhanizatsiia innovatsiinoi diialnosti: navch. posibnyk [Economy and organization of innovative activity: training. manual]. 1 edition. Melitopol: Publishing and Printing Center "Lux". 302 p. [in Ukrainian].
6. Davim, J. P. (2011). Modern machining technology. A practical guide. Woodhead Publishing Limited. 242 p.
7. Pupan, L. I. (2023). Postprotsesy adytyvnykh tekhnolohii: navch. posibnyk dlia studentiv spetsialnosti "Prykladna mekhanika" dennoi, zaochnoi ta dystantsiinoi form navchannia [Post-processes of additive technologies: teaching. manual for students of the "Applied Mechanics" specialty of full-time, correspondence and distance education]. Kharkiv: NTU "KhPI". 91 p. [in Ukrainian].
8. Tutashynskyi, V. I. (2021). Tekhnolohii suchasnoho vyrobnytstva: navchalnyi posibnyk [Technologies of

Література

1. Леховіцер В. О. Особливості розвитку машинобудівної галузі в сучасних умовах. *Ефективна економіка*. 2016. № 5.
2. Розвиток машинобудування в Україні: проблеми та шляхи їх вирішення: монографія. ДУ "Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долишнього НАН України"; наук. редактор д.е.н., проф. С. О. Іщук. Львів, 2022. 137 с.
3. Smerichevskyi S. F., Kryvoviazuk I. V., Raicheva L. I., Smerichevska S. V. Research on the development of the machine-building industry of Ukraine: state and prospects – multi-authored monograph. Latvia: Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2017. 200 p.
4. Гурін В. А., Востріков В. П., Кузьмич Л. В. Основи промислових технологій і матеріалознавства: навч. посібник. Рівне: НУВГП, 2019. 310 с.
5. Тебенко В. М. Економіка та організація інноваційної діяльності: навч. посібник. 1 вид. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр "Люкс", 2014. 302 с.
6. Davim J. P. Modern machining technology. A practical guide. Woodhead Publishing Limited, 2011. 242 p.
7. Пупань Л. І. Постпроцеси адитивних технологій: навч. посібник для студентів спеціальності "Прикладна механіка" денної, заочної та дистанційної форм навчання. Харків: НТУ "ХПІ", 2023. 91 с.
8. Туташинський В. І. Технології сучасного виробництва: навчальний посібник. К.: Конві Прінт, 2021. 155 с.

modern production: educational manual]. Kyiv: Conway Print. 155 p. [in Ukrainian].

9. Tsybulenko, V. O., Pasichnik, V. A., Vorontsov, B. S. (2022). Perspektyvy vykorystannia hibrydnogo addytyvno-subtraktyvnogo vyrobnytstva [Prospects for the use of hybrid additive-subtractive production]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu = Scientific Bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, No. 1, P. 34–41 [in Ukrainian].

10. ZD druk polimernoju hranuloiu [ZD printing with a polymer granule]. URL: <http://surl.li/nnrqa> [in Ukrainian].

11. Polishchuk, O., Zozulia, P., Polishchuk, A., Maidan, P. (2020). Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3d printing for the needs of light industry. *Fibres and Textiles*, № 4, P. 75–80.

12. Shaik, Y. P., Schuster, J., Shaik A. (2021). A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used In 3D Printing FDM Processes. *Open Access Library Journal*, Vol. 8. DOI: 10.4236/oalib.1107698.

13. Kuclourya, T., Monroy, R., Castillo, M., Baca, D., Ahmad, R. (2022). Design of a hybrid high-throughput fused deposition modeling system for circular economy applications. *Clean Technologies and Recycling*, 2(4), P. 170–198. DOI: 10.3934/ctr.2022010.

14. Krishnanand; Taufik, M. (2022). Extruder Design in Pellets Operated 3D Printers: A Review. *Chapter*, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-73495-4_45.

15. Harris, M., Arif, Kh., Potgieter, J. (2021). Partial Polymer Blend for Fused Filament Fabrication with High Thermal Stability. *Polymers*, 2021. DOI: 10.3390/polym13193353.

16. Krishnanand; Soni, S., Nayak, A., Taufik, M. (2021). Development of graphics user interface (GUI) for process planning in extrusion based additive manufacturing. *Materials Today Proceedings*, March 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.306.

17. Hu, T., Mikolajczyk, D., Pimenov, Yu., Gupta, M. K. (2021). Extrusion-Based 3D Printing of Ceramic Pastes: Mathematical Modeling and In Situ Shaping Retention Approach. *Materials*, № 14, P. 1–22, <https://doi.org/10.3390/ma14051137>.

18. Polishchuk, O. S., Polishchuk, A. O., Lisevich, S. P., Zalizetskyi, A. M., Melnyk, V. I. (2022). Vyhotovlennia vyrobiv ta detalei metodom 3D-druku z kompozytnykh nytok z vysokym vmistom metalu [Production of products

9. Цибуленко В. О., Пасічник В. А., Воронцов Б. С. Перспективи використання гібридного аддитивно-субтрактивного виробництва. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2022. № 1. С. 34–41.

10. 3D друк полімерною гранулою. URL: <http://surl.li/nnrqa>.

11. Polishchuk O., Zozulia P., Polishchuk A., Maidan P. Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3d printing for the needs of light industry. *Fibres and Textiles*. 2020. № 4. P. 75–80.

12. Shaik Y. P., Schuster J., Shaik A. A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used In 3D Printing FDM Processes. *Open Access Library Journal*. 2021. Vol. 8. DOI: 10.4236/oalib.1107698.

13. Kuclourya T., Monroy R., Castillo M., Baca D., Ahmad R. Design of a hybrid high-throughput fused deposition modeling system for circular economy applications. *Clean Technologies and Recycling*. 2022. 2(4). P. 170–198. DOI: 10.3934/ctr.2022010.

14. Krishnanand; Taufik M. Extruder Design in Pellets Operated 3D Printers: A Review. *Chapter*. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-73495-4_45.

15. Harris M., Arif Kh., Potgieter J. Partial Polymer Blend for Fused Filament Fabrication with High Thermal Stability. *Polymers*. 2021. DOI: 10.3390/polym13193353

16. Krishnanand; Soni S., Nayak A., Taufik M. Development of graphics user interface (GUI) for process planning in extrusion based additive manufacturing. *Materials Today Proceedings*. March 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.306.

17. Hu T., Mikolajczyk D., Pimenov Yu., Gupta M. K. Extrusion-Based 3D Printing of Ceramic Pastes: Mathematical Modeling and In Situ Shaping Retention Approach. *Materials*. 2021. № 14. P. 1–22, <https://doi.org/10.3390/ma14051137>.

18. Поліщук О. С., Поліщук А. О., Лісевич С. П., Залізецький А. М., Мельник В. І. Виготовлення виробів та деталей методом 3D-друку з композитних ниток з високим

and parts by 3D printing method from composite threads with a high metal content]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu = Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, № 3, Part 1, P. 104–110 [in Ukrainian].

19. Polishchuk, A., Polishchuk, O., Lisevich, S., Urbanyuk, E., Rubanka, M. (2023). Kompozytsiini sumishi na osnovi syntetychnykh polimeriv i napovniuvachiv ta obladnannia dlia 3D-druku nymy [Composite mixtures based on synthetic polymers and fillers and equipment for 3D printing with them]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu = Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, No. 2, P. 104–110 [in Ukrainian].

20. Yuran, A. F., Yavuz, İ. (2021). Industry 4.0 and Comparison Of 3D Printers. *Mühendis ve Makina*, P. 580–606. DOI: 10.46399/muhendismakina.910501.

21. Gonzalez-Gutierrez, J., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C., Sapkota, J., Holzer, C. (2018). Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives. *Materials*, 2018, 11, DOI: 10.3390/ma11050840.

22. Suwanpreecha, C., Manonukul, A. (2022). A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding. *Metals*, 2022, 12, <https://doi.org/10.3390/met12030429>.

23. Polishchuk, O. S., Zozulya, P. F., Polishchuk, A. O. (2017). Uzahalnena klasyfikatsiia filamentiv dlia 3D-druku [Generalized classification of filaments for 3D printing]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu = Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, No. 6, P. 51–59 [in Ukrainian].

24. Voroshchuk, V. Ya., Vitenko, T. M. (2021). Solidworks u zavdannakh 3D modeliuvannia ta inzhynirynhu tekhnichnykh system: navch. posibnyk [Solidworks in tasks of 3D modeling and engineering of technical systems. Education manual]. Ternopil: FOP Palyanitsa V.A. 164 p. [in Ukrainian].

25. Syrotynskyi, O. A. (2003). Osnovy avtomatyzatsii proektuvannia mashyn: navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchykh navchalnykh zakladiv [Fundamentals of machine design automation: a study guide for students of higher educational institutions]. Rivne: UDUVHP. 252 p. [in Ukrainian].

26. Sokolsky, O. L., Mikulonok, I. O. (2020). Modeliuvannia obladnannia i protsesiv pereroblennia polimernykh materialiv metodom ekstruzii: monohrafiia [Modeling of equipment and processing processes of polymer materials by the extrusion method: monograph].

вмістом металу. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 3. С. 104–110.

19. Поліщук А., Поліщук О., Лісевич С., Урбанюк Є., Рубанка М. Композиційні суміші на основі синтетичних полімерів і наповнювачів та обладнання для 3D-друку ними. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2023. № 2, Ч. 1. С. 104–110.

20. Yuran A. F., Yavuz İ. Industry 4.0 and Comparison Of 3D Printers. *Mühendis ve Makina*. 2021. P. 580–606. DOI: 10.46399/muhendismakina.910501.

21. Gonzalez-Gutierrez J., Cano S., Schuschnigg S., Kukla C., Sapkota J., Holzer C. Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives. *Materials*. 2018. 11. DOI: 10.3390/ma11050840.

22. Suwanpreecha C., Manonukul A. A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding. *Metals*. 2022. 12. <https://doi.org/10.3390/met12030429>.

23. Поліщук О. С., Зозуля П. Ф., Поліщук А. О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2017. № 6. С. 51–59.

24. Ворошчук В. Я., Вітенко Т. М. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем: навч. посібник. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2021. 164 с.

25. Сиротинський О. А. Основи автоматизації проектування машин: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Рівне: УДУВГП, 2003. 252 с.

26. Сокольський О. Л., Мікульонюк І. О. Моделювання обладнання і процесів перероблення полімерних матеріалів методом екструзії: монографія. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 252 с.

Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi. 252 p. [in Ukrainian].

27. Mikulonok, I. O., Sokolskyi, O. L., Sivetskyi, V. I., Radchenko, L. B. (2015). Osnovy proektuvannia odnocherv'yachnykh ekstruderiv: navch. posib. [Basics of designing single-worm extruders: training. manual]. Kyiv: NTUU "KPI". 200 p. [in Ukrainian].

28. Kuzyaev, I. M., Sviderskyi, V. A., Petukhov, A. D. (2016). Modeliuvannia ekstruzii i ekstruderiv pry pererobtsi polimeriv: monohrafiia v 2 ch. [Modeling of extrusion and extruders during processing of polymers: monograph in 2 hours]. Kyiv: NTUU "KPI"; Publishing House "Polytechnic". 412 p. [in Ukrainian].

29. Polishuk, A., Skyba, M. (2023). Modeliuvannia ekstruzii i ekstruderiv pry pererobtsi polimeriv: monohrafiia v 2 ch. [Justification of the design of the extruder nozzle of a 3D printer that uses granules and crushed polymer particles as raw materials]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu = Bulletin of the Khmelnytskyi National University, No. 5, Part 1, P. 192–204 [in Ukrainian].

30. i3 Mega S URL: <http://surl.li/nnrpo>. [in Ukrainian].

31. 3D modeli dlia testu druku [3D models for print test]. URL: <http://surl.li/nnrpy> [in Ukrainian].

27. Мікульонок І. О., Сокольський О. Л., Сівецький В. І., Радченко Л. Б. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів: навч. посіб. К.: НТУУ "КПІ", 2015. 200 с.

28. Кузяев И. М., Свідерський В. А., Петухов А. Д. Моделирование экструзии и экструдеров при переработке полимеров: монография в 2 ч. К.: НТУУ "КПИ"; Вид-во "Політехніка", 2016. – 412 с.

29. Полішук А., Скиба М. Обґрунтування конструкції сопла еструдера 3D-принтера, що використовує гранули та подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини. Вісник Хмельницького національного університету. 2023. № 5, Ч. 1. С. 192–204.

30. i3 Mega S. URL: <http://surl.li/nnrpo>.

31. 3D моделі для тесту друку. URL: <http://surl.li/nnrpy>.

POLISHCHUK ANDRII

Postgraduate student,
Department of machines and apparatuses,
electromechanical and energy systems,
Khmelnytskyi National University, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>
Scopus Author ID: 57221085232
E-mail: andrepol215@gmail.cjm

POLISHCHUK A. O.

Khmelnytskyi National University, Ukraine

DEVELOPMENT OF A 3D PRINTER SCREW EXTRUDER THAT USES GRANULES OR CRUSHED POLYMER PARTICLES AS RAW MATERIALS

Purpose. Development of a 3D printer screw extruder design that uses granules or crushed polymer particles as raw materials and provides an accurate and stable polymer extrusion process for 3D printing models.

Methodology. The method of systematic, theoretical and comparative analyzes was used in the work. Theoretical and practical studies are based on fundamental principles and knowledge in the field of mechanical engineering, heat engineering, and also take into account the features and requirements related to polymer processing, ensuring the efficiency of this process.

Findings. An overview of the methods of manufacturing products and parts was conducted and the additive method was substantiated as promising for creating products by 3D printing. Different types and approaches to additive manufacturing based on extrusion are considered and it is proposed to use a screw in an extruder that prints with granules or crushed polymer particles. The geometry of the micro-screw has been developed, which optimizes the process of melting and feeding polymeric materials, increasing the quality of

printing and reducing the time of extrusion. The design of the loading hopper has been improved, which ensures uniform and effective feeding of granules and crushed polymer particles into the material cylinder by a rotating auger. A cooling system for the extruder body and loading hopper has been developed. A nozzle with an internal geometry that optimizes the flow of molten polymer and increases printing accuracy is designed. A developed screw extruder is installed instead of a filament printing extruder on a 3D printer. The operation of the main elements of the 3D printer was synchronized with the developed extruder and their modes of operation were optimized. The process of printing test samples and finished parts using the developed screw extruder was carried out.

Originality. An extruder with a rotating micro-screw for a 3D printer that prints granules or particles of crushed polymer has been developed. The operation of the proposed screw extruder was synchronized with the elements of the 3D printer, which ensured high print quality, reliability and overall efficiency of the equipment after improvement.

Practical value. Using pellets or chopped pieces of polymer can be significantly cheaper than using traditional filament. This makes 3D printing more affordable and cost-effective, especially for large-scale production. The use of recycled materials contributes to the improvement of environmental safety, allows to reduce the volume of polymer waste. A screw extruder allows the use of a wider range of polymer materials, including polymers that may not be suitable for filament printing. The development of a screw extruder for a 3D printer opens new horizons in the practical use of 3D printing, providing more cost-effective, environmentally sustainable and innovative solutions for various fields of application.

Keywords: polymer material; granules; crushed particles; screw extruder; micro screw; 3D printer.