

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«_____» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
**«Вдосконалення процесу 3D-друку з використанням
гранульованих витратних матеріалів»**
**«Improving the 3D printing process using granulated
consumables»**

Виконав здобувач вищої освіти 2-го
року магістратури групи ПМ-24М-3
ОПП «Прикладна механіка»
Спеціальності
131 «Прикладна механіка»
_____ Юрій ПУШ

Керівник роботи к.т.н., ст. викладач
_____ Павло ЄРЬОМІН

Рецензент: _____

Кропивницький – 2025

АНОТАЦІЯ

Пуш Ю.М. Вдосконалення процесу 3D-друку з використанням гранульованих витратних матеріалів. Вип. квал. роб. – ЦНТУ, 2025. – 75 с., 19 іл., 36 бібліогр., 9 арк.

Під час вивчення та аналізу існуючих технологій 3D-друку виявлено доцільність використання процесу екструзії пластикових гранул для забезпечення поставленої мети.

Актуальність: Сучасні тенденції розвитку адитивних технологій демонструють стрімке зростання використання 3D-друку як у промисловому виробництві, так і в індивідуальному та навчальному секторі. Традиційна схема FDM-друку з використанням каліброваного філаменту обмежує економічну ефективність, ускладнює асортимент використовуваних матеріалів та робить процес менш гнучким. Наукові джерела приділяють недостатню увагу питанням перетворення гранульованого полімеру безпосередньо в друкуючій головці, а також процесам плавлення, дозування та гомогенізації матеріалу в зоні розплаву. Вдосконалення конструкції екструдера для роботи з гранулами дозволяє суттєво знизити собівартість друку, підвищити якість виробів та розширити функціональні можливості FDM-технології. Це робить тему дослідження актуальною для сучасного машинобудування та адитивного виробництва.

Практичне значення: У роботі запропоновано вдосконалену конструкцію робочого органу 3D-принтера для екструзії гранульованих пластикових матеріалів. Модернізований екструдер забезпечує стабільне плавлення, рівномірне дозування та якісне змішування полімерного розплаву, що дозволяє підвищити однорідність друкованої нитки та точність формування виробів. Запропоновано рекомендації щодо конструктивних налаштувань, режимів роботи, техніки безпеки та експлуатації пристрою в реальних виробничих умовах. Економічні розрахунки демонструють можливість отримати річний економічний ефект у розмірі 67200 грн для виробника та 825200 грн для споживача, що підтверджує доцільність впровадження системи у малосерійному та індивідуальному виробництві.

Результати роботи можуть бути використані в освітній діяльності, наукових лабораторіях, а також для модернізації існуючих FDM-принтерів.

Ключові слова: 3D-друк; FDM-технологія, екструзія пластику, гранульований полімер, одношнековий екструдер, робочий орган 3D-принтера, пластифікація, гомогенізація, економічна ефективність, адитивні технології.

Summary

Push Yurii. Improving the 3D printing process using granulated consumables. Graduation thesis for the educational degree «Master»: CNTU, 2025. - 75 p. Presentation materials 9 slides

During the study and analysis of existing 3D printing technologies, the feasibility of using a plastic pellet extrusion process to achieve the stated objective was identified.

Relevance: Modern trends in the development of additive manufacturing demonstrate rapid growth in the use of 3D printing in industrial production, as well as in individual and educational sectors. The traditional FDM printing scheme based on calibrated filament limits economic efficiency, complicates the diversity of usable materials, and reduces process flexibility. Scientific sources provide insufficient attention to the transformation of granular polymer directly inside the print head, as well as to the processes of melting, dosing, and homogenizing the material in the melt zone. Improving the design of an extruder capable of processing polymer pellets makes it possible to significantly reduce printing costs, increase the quality of printed parts, and expand the functional capabilities of FDM technology. Therefore, the topic of this research is highly relevant for modern mechanical engineering and additive manufacturing.

Practical significance: The work proposes an improved design of the working unit of a 3D printer intended for the extrusion of plastic pellets. The modernized extruder ensures stable melting, uniform dosing, and high-quality mixing of the polymer melt, which improves the homogeneity of the extruded strand and the accuracy of forming printed parts. Recommendations are provided regarding structural adjustments, operating modes, safety measures, and conditions for real-world device operation. Economic

calculations demonstrate a potential annual economic benefit of 67,200 UAH for the manufacturer and 825,200 UAH for the consumer, confirming the feasibility of implementing the system in small-scale and individual production. The results of the work can be applied in educational activities, research laboratories, and for the modernization of existing FDM printers.

Keywords: 3D printing; FDM technology, plastic extrusion, polymer pellets, single-screw extruder, 3D printer working unit, plastification, homogenization, economic efficiency, additive manufacturing.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧИ ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	10
1.1 Малогабаритні верстати для 3D-друку	10
1.2 Лазерний друк	11
1.3 Лазерне спікання	13
1.4 Ламінування	16
1.5 Майбутнє 3D-друку	18
1.6 Струменевий друк	19
1.7 Механіка подачі гранульованого пластику у зону розплаву	22
1.8 Висновки, мета і задачі дослідження	25
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ ПЛАСТИКУ В ПРИСТРОЇ	27
2.1 Процес екструзії	27
2.2 Основні параметри методу екструзії	28
2.3 Поведінка полімерного матеріалу при екструзії	29
2.4 Математична модель течії розплавленого матеріалу	36
2.5 Принцип дії екструдерів	40
2.6 Досліджувані матеріали, їх фізичні та механічні властивості	42
3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЕКСТРУДУВАННЯ ГРАНУЛЬОВАНОГО ПЛАСТИКУ	46
3.1 Будова і принцип роботи пристосування для екструдкування гранульованого пластику	46
3.2 Запропонована модель пристрою	51
3.3 Техніка безпеки, промислова санітарія та практичні рекомендації при виконанні робіт на запропонованому пристрої	53
3.4 Налаштування обладнання	56
3.5 Обслуговування та контроль обладнання	57
3.6 Раціональне використання та узагальнені поради.....	57

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОЧОГО ОРГАНУ 3D-ПРИНТЕРА ДЛЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ	59
4.1 Загальні вихідні дані	59
4.2 Визначення витрат на підготовку виробництва друкуючої головки	60
4.3 Визначення витрат на виготовлення друкуючої головки	60
4.4 Розрахунок експлуатаційних витрат (собівартості обробки)	65
ВИСНОВКИ	69
Список використаних джерел	71

Актуальність теми

Комп'ютерні технології все більш інтегруються з реальним життям. Однак відмінності між реальністю та комп'ютерним (віртуальним) світом все ще залишаються досить значними. Перенести предмет з одного простору в інший не так вже й просто. Зазвичай, якщо йдеться про текст, зображення та інші 2D речі - то традиційні принтери або сканери вже декілька десятиріч роблять такий переніс звичайною та простою справою. Але у випадку, коли справа стосується тривимірних фізичних об'єктів, то все є набагато складнішим.

Існуючи технології, з допомогою яких користувач може побачити 3D віртуальну модель на екрані комп'ютера, мають певні обмеження у своєму поширенні. Так, вони вже доступні для широкого кола людей за ціною та наявністю потрібного обладнання. Якщо є потреба в отриманні такої моделі у вигляді реального фізичного об'єкта, щоб можна було попрацювати з нею «живцем», то сучасні технології «додавання матеріалу» знаходяться в стані постійного вдосконалення та розповсюдження як у промисловості, так і у домашньому або аматорському використанні.

Метою створення віртуальної тривимірної моделі будь-якого об'єкта, а потім отримання з неї фізичної моделі або деталі потрібно в основному для оперативного виготовлення пробних моделей - щоб як віртуальна модель буде виглядати «живцем», в пластику або іншому витратному матеріалі. Кінцева вартість розробки складних машин та механізмів може істотно знизитися, якщо надати можливість інженеру або іншому технічному фахівцю замість численних паперових креслень подивитися на фізичну модель або деталь в натуральну величину або у обраному масштабі.

Окрім того, на фізичній моделі вже можна проводити різноманітні випробування або тести ще на проміжних етапах, до того, як буде готовий остаточно обраний варіант виробу. Більш того, прототипи дозволяють проводити випробування, які на готових виробах проводити буде або дуже складно, або дуже

коштовно. Наприклад, німецька фірма «Porsche» має приклади застосування 3D-друку для малосерійного виробництва прототипу корпусу електричного приводу [1] або друку металевих поршнів для високофорсованих двигунів спортивних автомобілів 911GT2 RS [2]. Інші фірми використовують 3D-друк для створення двоступінчастих редукторів [3] та дослідження динамічної поведінки полімерних зубчастих передач [4]. Фірма «Czinger» за допомогою 3D-принтера створила корпус коробки передач для експериментальної моделі гіперкара Czinger [5]. Саме головне, що таку фізичну модель можна зробити відносно швидко, що в сучасних реаліях є дуже важливим. Саме для цього, власне й існує ціла розвинена індустрія швидкого створення прототипів RP (походить від англійського Rapid Prototyping). Кваліфіковані фахівці, що задіяні в RP, займаються розробкою віртуальних моделей згідно побажань замовника, та використовують різноманітні технології об'ємного друку для виготовлення готових моделей.

Втім, створення прототипів – це тільки початок справи. Наступний крок – це швидке дрібносерійне виробництво кінцевого, самого найкращого варіанту виробу. Існуючи зараз технології RP дозволяють виготовляти вироби з різноманітних за своїми якостями матеріалів (технічні пластики, порошкові метали або сплави, провідники та т. ін). Це дуже гарне рішення для невеликого за об'ємом виробництва, тому що технологічні процеси адитивного виробництва дають можливість виготовити широкий спектр виробів за відносно невеликий проміжок часу. Деякі з технологій 3D друку дозволяють швидко та якісно виготовляти складні форми для лиття, що дозволяє далі використовувати вже відомі та відпрацьовані виробничі процеси. Однак, слід все ж таки відмітити, що дотепер ціни на витратні матеріали та їх доступність поки ще залишаються на високому рівні.

Втім не менш, вже зараз дуже багато споживачів мають бажання отримати самостійно в домашніх умовах якусь необхідну їм деталь, замість того щоб замовляти або шукати її по магазинах. Сучасний 3D-друк дозволяє зробити все це вже зараз, він є прогресивною технологією, яка продовжує стрімко розвиватись та розкриває нові можливості та перспективи для машинобудівної промисловості.

Метод адитивного виробництва забезпечує створення складних конструкцій, які раніше були недосяжні традиційними засобами або коштували занадто дорого. У порівнянні з традиційними технологіями, 3D-друк дозволяє зменшити масу деталей, скоротити собівартість виробництва та спростити виробничий процес. Завдяки цим властивостям технологія вже сьогодні успішно використовується в машинобудуванні для створення прототипів, індивідуалізації та полегшення конструкцій.

Це дає підстави стверджувати, що 3D-друк поступово перетворюється на невід'ємну складову сучасного машинобудування, та стає ключовим фактором технологічної трансформації всієї галузі.

1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧИ ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1.1 Малогабаритні верстати для 3D-друку

Дуже часто за 3D-принтери приймають відносно прості та доступні пристрої, які насправді є настільними верстатами з числовим програмним керуванням (ЧПК або CNC). Це малогабаритні агрегати, що підключаються до комп'ютера і можуть вирізати, випилювати або висвердлювати деталі з різноманітних матеріалів (наприклад, пластику, деревини або м'яких металів, типу алюмінію або бронзи).

Відомий фрезерний верстат моделі «MicroMill 2000 Desktop Machining System» виробництва фірми «MicroProto» [6] може працювати як периферійний пристрій. Він має робочу зону розмірами 230x140x150 мм і здатен забезпечити точність до 0,01 мм. На цьому верстаті можна обробляти також сталеві деталі із невеликою твердістю.

Також існує лінійка верстатів від компанії «Roland» [7], яка пропонує моделі різного рівня. Серія MDX-15, коштує близько трьох тисяч доларів США та ідеально підходить для індивідуального використання. MDX-15 дозволяє обробляти з високою точністю різні матеріали в робочій зоні розмірами 150x100x60 мм. Також в якості додаткового обладнання до своїх верстатів «Roland» пропонує спеціалізований скануючий пристрій, який дозволяє перетворювати реальні об'єкти у 3D-моделі.

Зазвичай, верстати з числовим програмним керуванням поділяють на так звані роутери, фрезерні та токарні. Розроблені моделі з чотирма ступенями свободи, які поєднують в собі функції фрезерних і токарних верстатів. Подібні пристрої можна використовувати для безпосереднього виготовлення об'єктів, створення форм для лиття, гравіювання, швидкого виготовлення друкованих плат, моделювання та інших завдань.



Рисунок 1.1 – Настільний багатофункціональний верстат, який може підключатись до комп'ютера

1.2 Лазерний друк

Відома з 1986 року технологія SLA (або стереолітографія) була розроблена Чарльзом Халлом та вважається однією з перших у 3D-друці. Ч. Халл створив компанію «3D Systems», до якої потім також приєдналися інші розробники (німецька «EOS GmbH», японські фірми «Sony DMEC» і «Mitsui Engineering»). Цей метод базується на використанні спеціального рідкого фотополімеру, який твердіє під впливом ультрафіолетового випромінювання.

Під час друку ультрафіолетовий лазер проходить по поверхні рідкого полімеру за заданою траєкторією, попиксельно формуючи один окремий шар майбутньої моделі. Після цього робоча платформа принтера опускається на певну величину, і процес повторюється, таким чином створюючи наступний шар.

Ці операції тривають до тих пір, доки вся модель не буде повністю пошарово надрукована. Переваги стереолітографії - це висока точність, яка складає до десятих часток міліметра, якісне відтворення дрібних деталей і гладка поверхня готових виробів. Однак у неї є й суттєві недоліки - обладнання та матеріали для стереолітографії дуже дорогі. Так, ціна типового промислового принтера SLA може сягати декількох сотень тисяч доларів, а вибір витратних матеріалів досить обмежений, оскільки використовується лише фотополімер.

Існує більш швидкісний варіант цієї технології, відомий як SolidGroundCuring (SGC). Її розробила компанія «Cubital Inc». В цьому варіанті замість сканування лазером по пікселям, весь робочий шар полімеру одномоментно засвічується спеціальною ультрафіолетовою лампою через створений фотошаблон моделі, що дозволяє значно прискорити процес. На даний час фірма «Cubital Inc.» вже пішла з ринку 3D-друку, однак подібні технології сьогодні пропонують інші фірми, наприклад, німецька компанія Envisiontec.

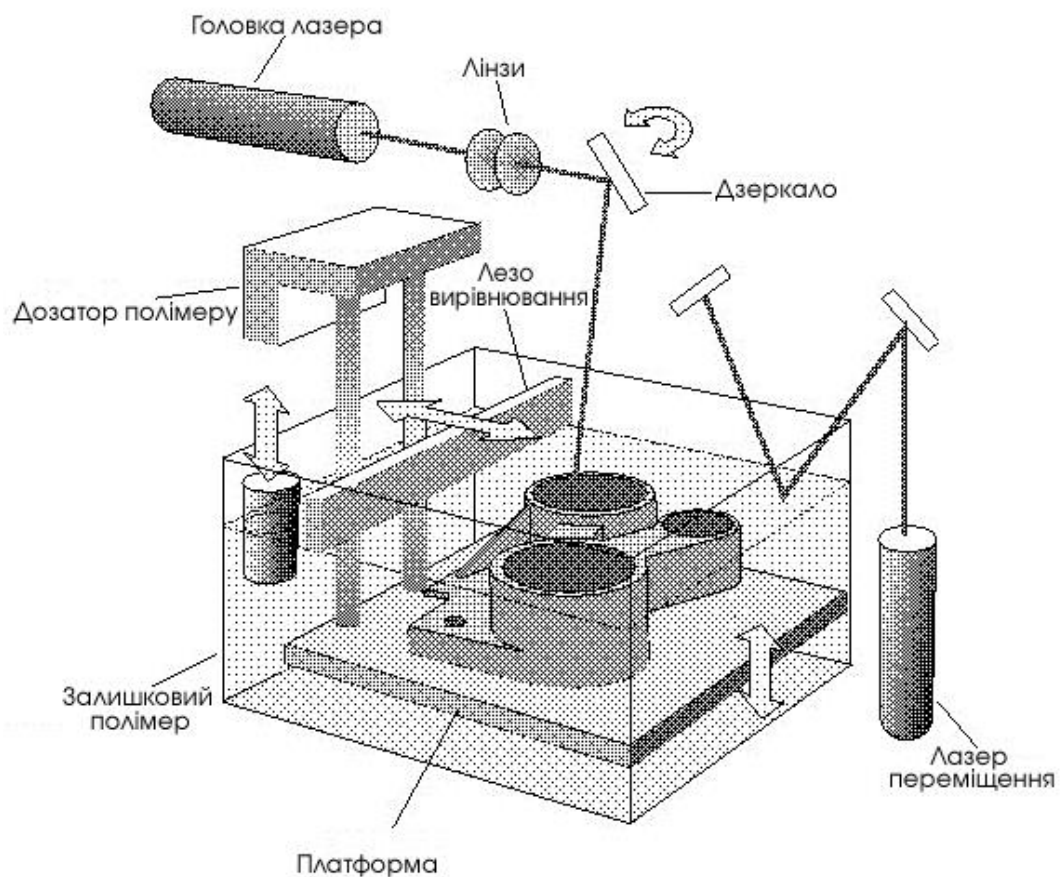


Рисунок 1.2 – Принцип роботи принтера з використанням технології SLA

Вона представила систему швидкого прототипування «Prefactory» [8], що призначена для кінцевих користувачів, які бажають швидко створювати власні моделі. Цей досить компактний пристрій займає площу всього у 0,3 м², та ідеально підходить для малих офісів.

В основі системи «Prefactory» лежить технологія DLP (Digital Light Processing). Вона схожа на технологію, яка використовується в проекторах та забезпечує високу роздільну здатність для кожного шару матеріалу (до 1280x1024 пікселів), причому кожен окремий піксель може мати розмір 90 або 150 мкм. Відповідно, товщина шарів друку при технології DLP може коливатися від 50 до 150 мікрон.

На такому принтері є можливість створення прототипів розмірами до 152x190x230 мм, а швидкість друку по висоті складає до 15 мм/год. Принтер «Prefactory» оснащується вбудованим комп'ютером під керуванням операційної системи Linux та може підключатись до локальної мережі через порт Ethernet. Такий варіант підключення дозволяє надсилати завдання на 3D-друк так само, як і на звичайний мережевий принтер.

1.3 Лазерне спікання

Ще однією можливою технологією 3D-друку є так зване лазерне спікання (SLS) [9], яке було розроблене наприкінці 1980-х років. Цей метод, запатентований на ім'я Карла Декарда, а його особливістю є використання лазера для спікання порошкового дрібнодисперсного матеріалу.

Лазерне спікання працює наступним чином:

Спочатку у робочу камеру SLS 3D-принтера, яка заповнена інертним газом (наприклад, азотом), засипається шар порошку із легкоплавкого пластику або металу. Сфокусований лазерний промінь прописує контури майбутньої деталі та за рахунок високої температури у місці фокусу міцно спікає частинки порошку. Далі наноситься новий тонкий шар порошку, і процес повторюється

до тих пір, доки об'єкт не буде повністю сформований. Після завершення друку зайвий, тобто неспечений порошок просто струшується.

Перевагами технології SLS є висока міцність моделей. Деталі виготовлені за цією технологією, мають гарні механічні характеристики та можуть застосовуватись навіть у відповідальних вузлах та агрегатах автомобільної або авіаційної техніки. Також можливе створення деталей, які мають складні рухомі частини (наприклад петлі або кнопки). Завдяки спеціальним матеріалам із порошкових металів та сплавів можна виготовляти повноцінні металеві деталі. Так, в одному з варіантів порошок зі сталевих мікрочастинок, покритих пластиком, спікається в камері принтера, а потім додатково обпалюється, замінюючи пластик на бронзу. Отриманий сплав міцніший за алюміній та може використовуватись для друку широкого спектру виробів.

Можливість використання спеціальних матеріалів типу кераміки або скла дає можливість створення термостійких і хімічно стійких виробів складної форми.

Однак, у технології SLS є декілька суттєвих недоліків, а саме:

- використання спеченого порошку обумовлює пористу поверхню об'єктів, що виготовлені цим методом;
- обладнання та матеріали для 3D-друку SLS дуже дорогі, що обмежує їх використання тільки спеціалізованими фірмами.
- швидкість лазерного друку досить низька, а нагрів та охолодження установки займає багато часу.

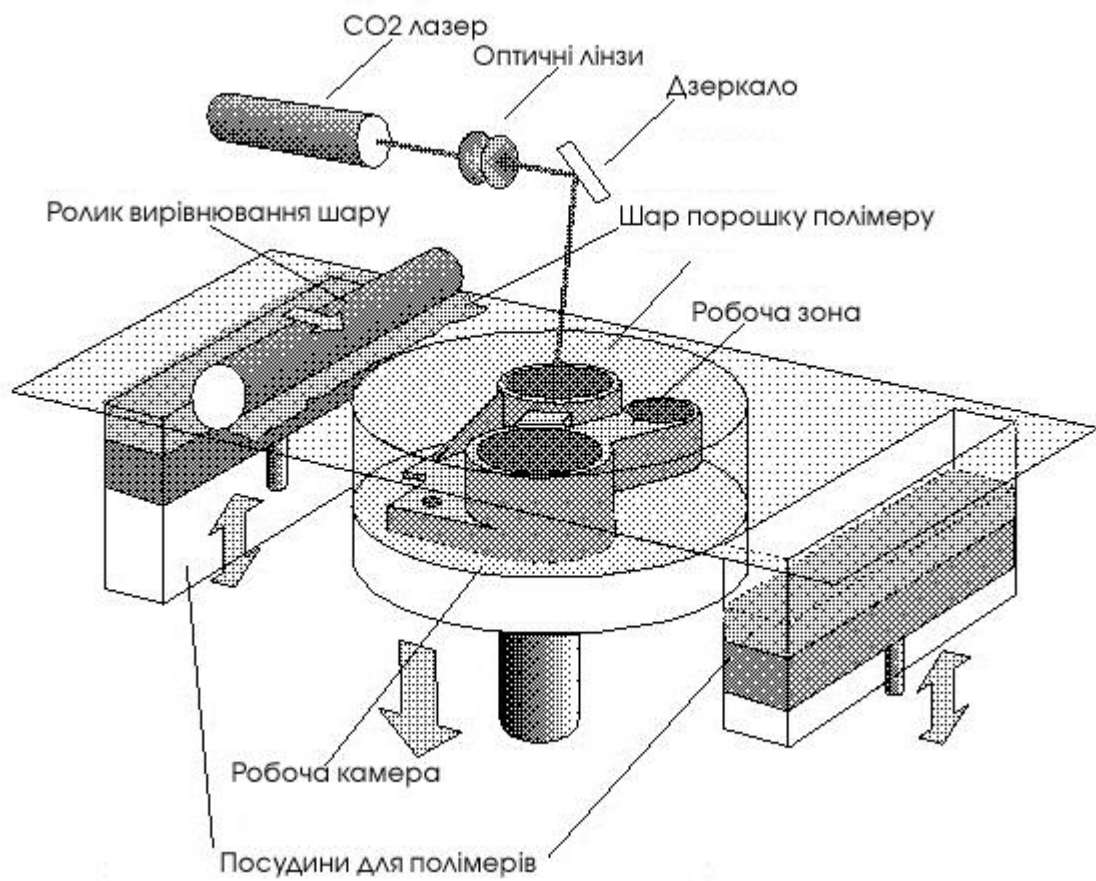


Рисунок 1.3 – Схема роботи апарата лазерного спікання

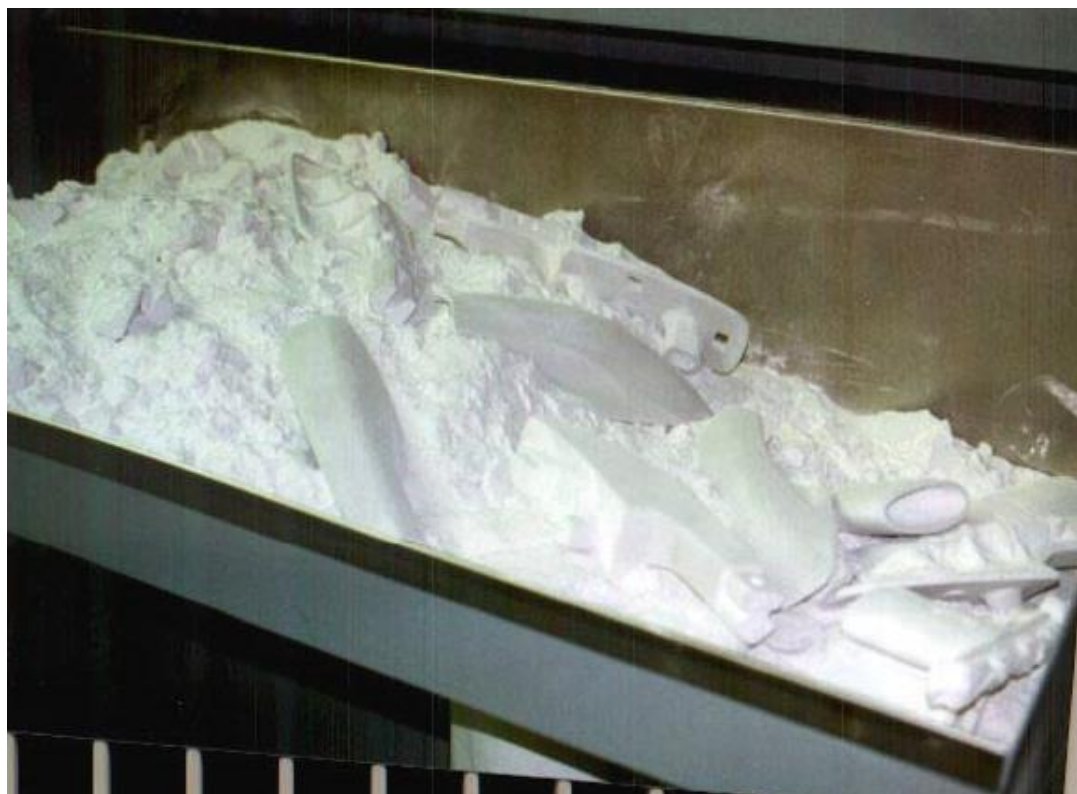


Рисунок 1.4 –Витратний матеріал апарата SLS і виготовлена на ньому деталь

1.4 Ламінування

Ще однією відомою технологією тривимірного друку з використанням лазера, є так зване ламінування. Цей метод був запропонований компанією «Helisys» та отримав торгову марку LOM (Laminated Object Manufacturing) [9]. На жаль, сама компанія припинила своє існування ще у 2000 році, але її розробки полягли в основу обладнання, яке дотепер виробляють кілька інших фірм на основі придбаних патентів.

Суть цієї технології полягає в тому, що у пристрій по чергові завантажуються тонкі аркуші із спеціального матеріалу. Потім лазерний промінь з високою швидкістю вирізає контури шарів майбутньої 3D-моделі, які потім склеюються між собою. Спочатку в якості витратного матеріалу використовувався спеціальний папір, просочений клеєм, але згодом технологію пристосували для роботи із пластиком, керамікою та металевою фольгою.

Також відоме ще одне цікаве рішення, яке запропонувала компанія «Objet Geometries» на основі ідей струменевого друку. Їх запатентована технологія PolyJet використовує спеціальну струменеву головку для нанесення рідкого фотополімеру, який потім затверджується під впливом ультрафіолетового випромінювання. Друк відбувається пошарово з високою точністю (роздільна здатність принтера сягає до 300x600 dpi), а товщина шару може складати всього 16 мкм.

Ця технологія дещо нагадує стереолітографію (SLA), але при цьому PolyJet має низку переваг – більшу швидкість, точність, компактність обладнання та простоту у використанні. Вартість принтерів PolyJet починається орієнтовно з 60000 доларів, що значно дешевше за традиційні SLA-системи. Засновник стереолітографії, компанія «3D Systems», також пропонує схожу систему під назвою InVision, орієнтовна ціна якої складає близько 40000 доларів. Тенденція до зменшення вартості лазерних систем швидкого прототипування робить їх дедалі доступнішими не тільки для великих фірм, але й для навчальних закладів та установ.

Ще один метод, що базується на струменевому друці порошком, було створено у Массачусетському технологічному інституті (MIT, США). Основним виробником пристроїв за цією технологією є компанія «Z Corporation 3D». Принтери від цієї фірми мають відносно невисоку вартість (10000...30000 доларів) та значно перевершують інші подібні системи за швидкістю друку. За такою технологією спеціальна струменева головка, яка адаптована з принтерів відомої фірми «Hewlett-Packard», наносить рідкий клей на шар порошкового матеріалу на основі гіпсу або крохмалю. У місцях, де нанесений клей, порошок скріплюється, тим самим формуючи об'ємну модель. Надлишковий порошок після друку просто прибирається з моделі методом струшування.

Характерною особливістю принтерів, що використовують таку технологію, є можливість друку кольорових моделей. Замість звичайного безкольорового клею використовується клей із додаванням чотирьох основних барвників. Тоді надрукований об'єкт відтворює не лише форму віртуальної моделі, а й її кольори. Хоча надруковані гіпсові моделі мають не дуже високу міцність, але рівень деталізації дозволяє досягти високої точності. Тому їх одразу можна використовувати як форми для лиття різноманітних виробів.

Друк із металу «Direct Metal Process».

На основі вже описаної вище порошкової технології компанія «ProMetal» розробила процес Direct Metal Process [9], який замість гіпсу використовує спеціальний металевий порошок. Модель створюється аналогічним чином, тобто шари порошку склеюються після проходження друкуючої голівки, а потім заготовка запікається у печі. В ній матеріал або спікається самостійно, або зв'язується легкоплавким металом, що нагадує технологію лазерного спікання металу.



Рисунок 1.5 – Деталь, виготовлена з металу за технологією ProMetal

1.5 Майбутнє 3D-друку

Зараз вже можна з впевненістю сказати, що перспективи 3D-друку надзвичайно широкі. Вже сьогодні ці технології дозволяють суттєво економити час і ресурси інженерів, дизайнерів та науковців. Тепер достатньо створити унікальну або доопрацювати вже існуючу цифрову модель, обрати потрібний матеріал та надіслати файл для друку на принтер - й ваш виріб буде надрукований без застосування традиційних технологій та верстатів. Такий підхід отримав назву Distance Manufacturing on Demand (дистанційне виробництво на вимогу). З подальшим розвитком технологій 3D-друк має всі шанси стати доступним, дешевим та масовим явищем – так само, як струменеві та лазерні принтери свого часу замінили традиційні друкарні та машинописні бюро. Цілком можливо, що у недалекому майбутньому в кожного бажаючого буде свій персональний, зручний та безпечний 3D-принтер вдома на столі.

Сучасні дослідження за тематикою розвитку адитивних технологій вже виходять за межі традиційного 3D-друку. Наприклад, команда фахівців з Каліфорнійського університету в місті Берклі працює над створенням новітньої технології, яка дозволить одночасно друкувати зовнішню форму пристрою та його електронну начинку. Наприклад, такий принтер зможе створити корпус смартфона разом з усіма внутрішніми деталями та схемами. Вже існують та постійно вдосконалюються технології друку пластикових напівпровідників і

електропровідних з'єднань (дротів або шлейфів) - лишається лише інтегрувати їх у загальну систему.

Інший напрям – біодрук для медичних експериментів та протезування живих тканин. Дослідники з Університету Міссурі розробили та покращують технологію, яка дозволяє друкувати заготовки біологічних органів. В якості «чорнил» для друку використовуються клітинні згустки, а як «папір» або основа - спеціальний біологічний гель, що утримує живі клітини в заданій формі. Друк таким гелем також здійснюється пошарово, що дозволяє створювати об'ємні клітинні структури заданої форми та товщини. Після друку гель розчиняється, залишаючи готову біологічну тканину, яка потенційно може замінити справжній орган. Такі технології мають дуже велику перспективу та здатні створити справжню революцію у галузі протезування або лікування тварин та людей.

Хоча на даний час повноцінний друк органів для трансплантації поки що справа майбутнього, однак прогрес у цій галузі вражає і відкриває шлях до нової епохи у медицині та біоінженерії.

1.6 Струменевий друк

Разом з відомими лазерними технологіями тривимірного друку також активно розвиваються і впевнено конкурують з ними так звані струменеві 3D-принтери. Однією з найбільш простіших та водночас найпоширеніших технологій у цьому напрямку є моделювання методом пошарового наплавлення FDM (Fused Deposition Modeling) [9].

Принцип роботи за технологією FDM досить простий. Друкуюча головка принтера розігріває термопластик до температури плавлення і видавлює його у вигляді тонких ниток через каліброване сопло на гладку платформу, яка має певну температуру (в деяких випадках вона постійно охолоджується). Пластик накладається на попередній шар та швидко застигає, тим самим формується готовий виріб. У якості матеріалу може застосовуватися майже будь-який промисловий термопластик. Цей метод дозволяє виготовляти деталі з досить

високою точністю (мінімальна товщина шару складає до 0,12 мм) і значних розмірів – промислові моделі FDM 3D-принтерів можуть друкувати вироби габаритами до 500×600×600 мм.

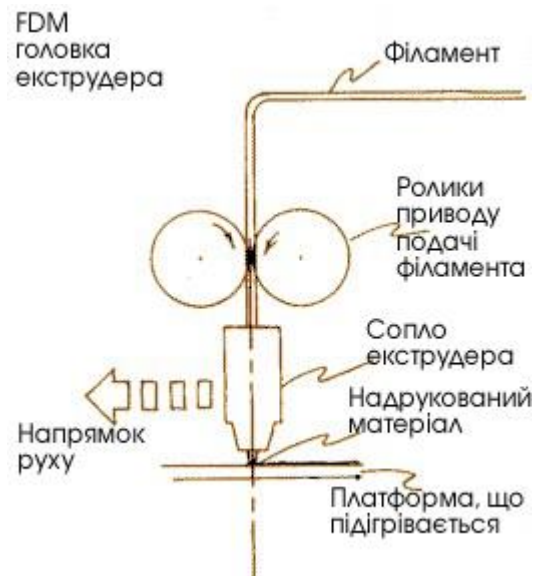


Рисунок 1.6 – Принцип роботи FDM-машини

Технологія FDM була вперше представлена у 1988 році інженером Скоттом Крапом. Сьогодні найбільш відомим виробником обладнання цього типу є компанія «Stratasys», але китайські виробники вже «наступають їм на п'яти». Треба відмітити, що навіть американська NASA розглядає технологію FDM як високopersпективну для використання у космосі. Так як в умовах космічних експедицій, які можуть тривати декілька місяців або років, неможливо взяти із собою всі можливі запчастини. Тоді технологія FDM дозволить створити виробничу повноцінну майстерню на кораблі, що для традиційних металообробних верстатів взагалі нереально. Натомість, компактний 3D-принтер, бібліотека готових моделей необхідних деталей і кілька сотень кілограмів різноманітного пластику можуть стати універсальним інструментом для виготовлення будь-якої потрібної запчастини безпосередньо в польоті.

Проект «RepRap» – початок масового застосування технології FDM

FDM-принтер «RepRap» (Replicating Rapid Prototyper) став першим доступним пристроєм для широкого кола користувачів. Цей відкритий проект

був започаткований у 2005 році та мав на меті створення друкуючого пристрою, якій був би здатен самотійно виготовляти більшість деталей для себе. Розробники надали безкоштовний та вільний доступ до всіх креслень та схем через мережу інтернет, що зробило проект «RepRap» доступним для ентузіастів 3D друку з усього світу.

Заради досягнення можливості «самовідтворення» схему пристрою зробили якомога простішою за рахунок дизайну та якості друку. Але зовсім не це забезпечило справжню популярність принтера. Проект «RepRap» відкрив перед користувачами нові можливості – тепер будь-хто з бажаючих міг самотійно друкувати корисні та зрозумілі вироби або моделі: пластикові іграшки, побутові предмети, аксесуари та деталі.

Відкритість та велика популярність проекту «RepRap» досить швидко привернула увагу до нього виробників з Китаю, які почали масово копіювати конструкцію принтера та випускати власні модифікації. Це забезпечило не лише потужний поштовх до подальшого розвитку 3D-принтерів, а ще до формування окремого ринку різноманітних витратних матеріалів, зокрема пластику. Фірми з Китаю оперативно організували виробництво гранульованих термопластиків, які потім витягувались методом екструзії на нитку, намотувану на котушки для FDM-принтерів.

Однак експлуатація 3D-принтерів виявила і певні складнощі при використанні технології FDM. Так, для друку виробів з різних видів пластику або в різних кольорах необхідно мати в наявності великий запас катушок з філаментом, що потребує знайти місце для зберігання. Окрім того, технологія FDM поки що не дозволяє ефективно друкувати вироби з суміші пластиків одночасно. На ринку представлені окремі моделі принтерів, що можуть друкувати одночасно двома пластиками, але їх конструкція занадто складна та дороговартісна.

Нові перспективи друку з використанням пластикових гранул:

Слід відмітити, що вартість філаменту (нитки) діаметром 1,75 або 2,95-3,00 мм, яку зазвичай використовують для друку, може бути до десяти разів вищою, ніж вартість того ж самого пластику у вигляді гранул. Тому очевидна

економічна перевага розробки друкуючих голівок для 3D-принтерів, які зможуть використовувати безпосередньо гранульований матеріал, міняючи стадію екструзії у нитку.

Такий підхід не лише дозволяє значно знизити собівартість друку, а також дає можливість змішувати в бункері гранули різних видів пластику (звісно, вони повинні мати схожу температуру плавлення), а також додавати барвники для отримання бажаного кольору або властивостей матеріалу.

Таким чином, вдосконалення екструдерів, які працюють із гранулами, є одним із перспективних напрямків розвитку технології FDM найближчим часом. FDM – це потужна, гнучка і доступна технологія 3D-друку, яка вже сьогодні змінює виробництво, відкриває шлях до індивідуального виготовлення речей і активно розвивається у напрямку зниження вартості, підвищення якості та універсальності матеріалів.

1.7 Механіка подачі гранульованого пластику у зону розплаву

Особливості подачі гранульованого пластику в зону розплаву

На сьогоднішній день найбільш поширеними в сфері адитивного виробництва є 3D-принтери, які працюють за технологією – моделювання. До основних переваг принтерів, які використовують технологію FDM (Fused Deposition Modeling або метод пошарового наплавлення розплавленого матеріалу) можна віднести:

- доволі високу точність виготовлення виробів;
- високу швидкість друку;
- можливість використання широкого спектра полімерів;
- порівняно низьку вартість готової продукції.

Але, існують й певні обмеження та недоліки для FDM-технології, а саме:

- недостатня точність у відтворенні дрібних геометричних деталей, коли пластик «пливе» та не встигає зафіксувати потрібну форму;
- потреба у деякій додатковій механічній або хімічній обробці надрукованих об'єктів;

– залежність від якості витратного матеріалу (каліброваної пластикової нитки або філаменту, яку отримують шляхом екструзії).

Суть процесу екструзії полягає в тому, що розплавлений полімер продавлюється через формуючий отвір (калібровану філь'єру) для отримання виробів заданої форми [11-14]. Вона відбувається під дією високої температури, механічних навантажень та впливу вологи.

Тепло для плавлення матеріалу (гранул пластику) отримується як за рахунок зовнішнього підігріву газовою горілкою або електронагрівачем, так і внаслідок тертя під час руху сировини через пристрій для екструзії. На ефективність екструзії впливають такі фактори як тип застосованого полімеру, його вологість, тиск на розплав та тривалість теплової обробки. Сучасні лінії для екструзії включають до себе один або декілька екструдерів, формуючі елементи та додаткові модулі типу дегазаторів, охолоджувачів та т.д.).

До основних різновидів екструдерів відносяться черв'ячні (або шнекові) екструдери [16, 27,]. На рис. 1.7 представлена класифікація екструдерів за типом основного робочого органу. Одношнекові екструдери найбільш поширені, вони прості в конструкції та ефективні при роботі з гранульованою сировиною. Їх перевагами є простота монтажу, економічність та низькі експлуатаційні витрати.

Двохшнекові екструдери ефективні у випадку обробки багатокомпонентних полімерних сумішей. За рахунок двох шнеків забезпечується якісне плавлення, такі екструдери мають можливість дегазації та змішування компонентів. Конічні екструдери зазвичай застосовуються для роботи з гранулами або порошком із ПВХ. Паралельні екструдери використовують для змішування декількох полімерів, вони мають ефективне рідинне охолодження.

Поршневі екструдери використовуються нечасто саме через свою низьку продуктивність. Такі екструдери працюють переважно з фторополімерами (наприклад, PTFE).

Дискові екструдери також мають невелике поширення, але вони можуть забезпечувати високий тиск розплаву завдяки своїй багатодисковій конструкції.

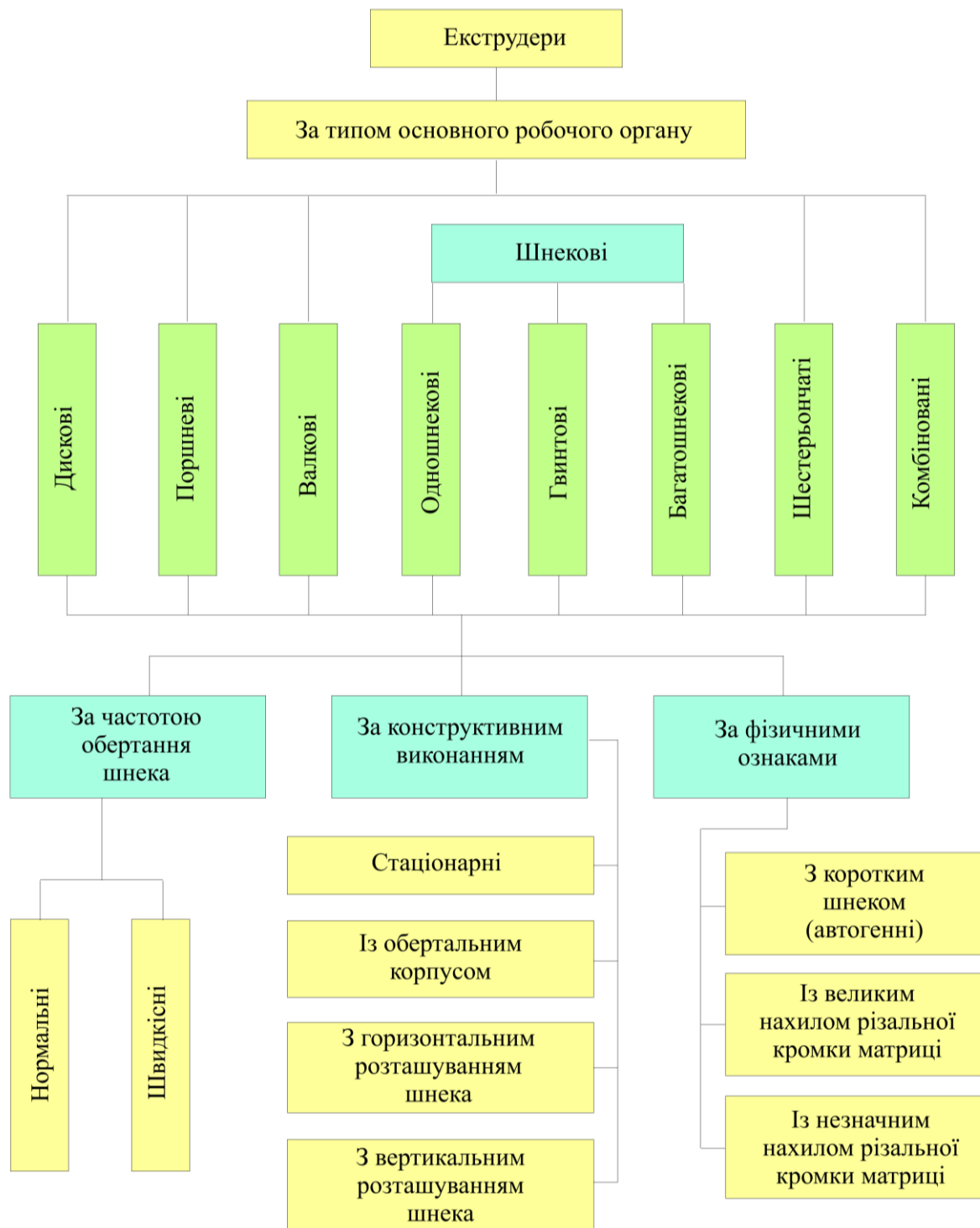


Рисунок 1.7 – Класифікація екструдерів за типом основного робочого органу

Плівкові екструдери традиційно використовуються у виробництві різних видів поліетиленової, термоусадочної, армованої та багатошарової плівки.

Додатковими технологічними особливостями процесу екструзії є:

- гомогенізація, або процес повного та ретельного перемішування розплавленої полімерної маси з метою отримання рівномірної структури матеріалу;

– дегазація, або усунення залишкових мономерів та розчинників із полімерної маси, що запобігає утворенню шкідливих повітряних бульбашок у готовому виробі. Зазвичай це реалізується за допомогою спеціальних камер або дегазуючих шнеків (переважно у екструдерах з двома шнеками).

На рисунку 1.8 показано вибір та порівняння одношнекових та двохшнекових екструдерів:



Рисунок 1.8 – Вибір та порівняння типів екструдера

1.8 Висновки, мета і задачі дослідження

Проведений вище аналіз дозволяє зробити такі висновки:

- у джерелах наукової літератури дотепер недостатньо відомостей про процеси, які відбуваються безпосередньо у зоні завантаження та розплаву пластикових витратних матеріалів у друкуючій голівці для 3D принтерів, що працюють за технологією FDM;

- найбільш придатним пристроєм для екструзії гранульованих пластиків є одношнековий екструдер;

- за базову конструкцію для розробки вдосконаленого робочого органу 3D-принтера для гранульованих матеріалів в межах даної магістерської роботи доцільно вибрати найбільш досконалу серед відомих і достатньо вивчених конструкцій, а саме одношнековий екструдер вертикального типу. Він придатний для екструзії пластикового філаменту діаметром від 0,5 до 3 мм із гранульованого пластику типу ABS, поліетилен або поліацетат.

На основі викладеного вище аналізу визначена мета роботи, яка полягає у вдосконаленні робочого органу 3D-принтера для гранульованих матеріалів.

Для досягнення мети, що була поставлена, слід вирішити наступні задачі:

- вивчити процесів, що відбуваються під час екструзії пластику;
- розробити вдосконалену конструкцію екструдера для робочого органу 3D-принтера;
- розробити рекомендацій для практичного створення та експлуатації оригінального пристрою.

Таким чином після проведеного аналізу літературних джерел ми бачимо, що використання гранульованого пластику у якості витратного матеріалу для робочого органу 3D-принтера може значно покращити якість друку та зменшити вартість надрукованих деталей або фізичних моделей. Це теж підтверджує доцільність широкого застосування запропонованого способу екструзії замість придбання готового каліброваного філаменту.

Тому задача вивчення процесів, що відбуваються під час екструзії, а також розробка вдосконаленого робочого органу 3D-принтера для гранульованих матеріалів в умовах сучасного виробництва є актуальною і потребує досконалого вивчення і подальшого розв'язання.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ ПЛАСТИКУ В ПРИБОРІ

2.1 Процес екструзії

Екструзія пластику – це безперервний процес переведення цього полімеру з твердого у в'язкотекучий стан та наступного продавлювання пластикового розплаву через формоутворюючий інструмент (каліброване сопло), профіль якого визначає кінцеву конфігурацію виробу та його геометричні розміри. При екструзії одночасно виконуються такі операції як завантажування (живлення), стискання та плавлення твердого полімеру, полімеру з наступним перемішуванням розплаву, створення тиску на розплав та його дозування через сопло. Через певні особливості полімерних матеріалів [16] є необхідність у вдосконаленні екструзійних машин або технологічних схем, за рахунок чого можна буде отримувати пластиковий профіль необхідної якості. Також це надає можливість гнучкого та оперативного керування всім екструзійним процесом в комплексі.

Термопластичні матеріали, як початкова сировина для переробки, випускаються у вигляді порошків з щільністю $0,2-0,3 \text{ кг/см}^3$, або у виді гранул певного розміру (щільність $0,5-0,6 \text{ кг/см}^3$).

Основною вимогою, що висувається до типової екструзійної машини є гарний захват матеріалу в зоні живлення в незалежності від виду застосовуваного матеріалу.

Обов'язковою умовою є те, щоб весь термопластичний матеріал у зоні плавлення змінив свій стан з твердого на в'язкотекучий. Зона гомогенізації (тобто надання однорідної структури або однорідних властивостей розплаву) повинна забезпечувати рівномірний розподіл температури по всьому об'єму в'язкого пластику, необхідний тиск в робочому об'ємі та його стабільність на виході, якісний розподіл барвникових домішок. Всі ці перелічені задачі необхідно реалізувати в конструкції екструзійної машини, або її окремих

частин за рахунок зміни геометрії робочого органу – черв'яка/шнека, разом із схемою переробки.

2.2 Основні параметри методу екструзії

До основних параметрів процесу екструзії розплавленого пластику відносяться:

- температура, розподілена по окремих частинах або робочих зонах агрегату:

- рівень тиску в зоні розплаву;

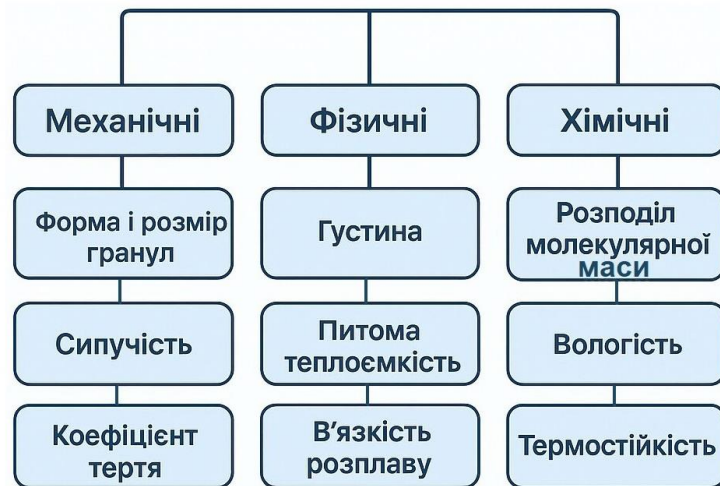
- температура зони головки (сопла);

- режими охолодження екструдованого пластикового профілю.

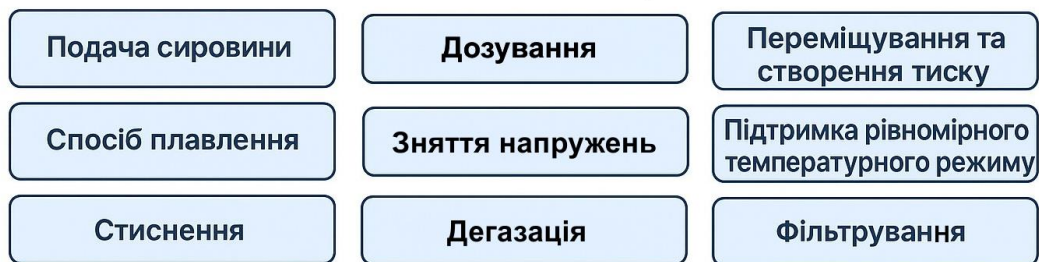
До найбільш важливих технологічних параметрів машини для екструзії зазвичай відносяться довжина та діаметр шнека, яким вона оснащена. Також треба знати показник відношення довжини шнека до його діаметру, швидкість обертання та профіль шнека.

На рис. 2.1 наведені параметри, які характеризують процес екструзії

Властивості сировини



Технологічні операції



Зовнішні фактори



Рисунок 2.1 – Параметри, які характеризують процес екструзії

2.3 Поведінка полімерного матеріалу при екструзії

Як приклад поведінки полімеру, розглянемо гранульовану сировину в процесі екструзії на одношнековому агрегаті.

Процес екструзії полімерів на одношнекових машинах - це процес отримання з вхідного полімерного матеріалу безперервних профільних виробів

шляхом безперервного видавлювання розплаву через формуюче каліброване сопло (рис. 2.2).

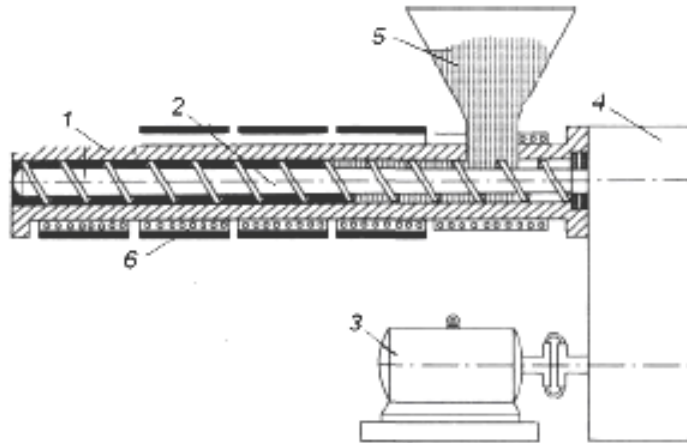


Рисунок 2.2 – Загальна схема екструдера

Головним робочим органом екструдера з одним шнеком є товстостінний циліндр 1 з нагрівачем 6, всередині якого обертається шнек 2. Перероблюваний матеріал у вигляді гранул (крихти) або порошку подається в бункер-дозатор 5, звідки надходить через завантажувальне вікно в матеріальний циліндр і потрапляє на витки шнека. Обертання шнека здійснюється двигуном 3 через редуктор 4.

Шнеки характеризують довжиною L , діаметром D , геометрією поперечного перерізу каналу шнека (висотою нарізки, кутом підйому, шириною гребня нарізки), кроком витка t , ступенем стискання i , та числом заходів нарізки.

Глибина гвинтового каналу шнека змінюється по його довжині: зменшується в міру віддалення від завантажувального вікна. Залежно від матеріалу, що завантажений в циліндр і призначення одношнекового екструдера шнеки мають різне відношення довжини до діаметру (L/D).

Найбільш часто використовуються шнеки з $L/D = 20-25$.

Потрапивши в зону витків шнека, матеріал переміщується в його гвинтовому каналі, який утворюється внутрішньою поверхнею товстостінного циліндра і нарізкою витків шнека. При русі по гвинтовому каналу від завантажувального вікна до головки матеріал стає дещо ущільненим. Потім

пластик розплавляється, з нього видаляється повітря та відбувається подальша гомогенізація розплаву.

Відповідно до характеру процесів, що протікають в одношнекових екструдерах, в напрямку переміщення матеріалу розділяють три зони:

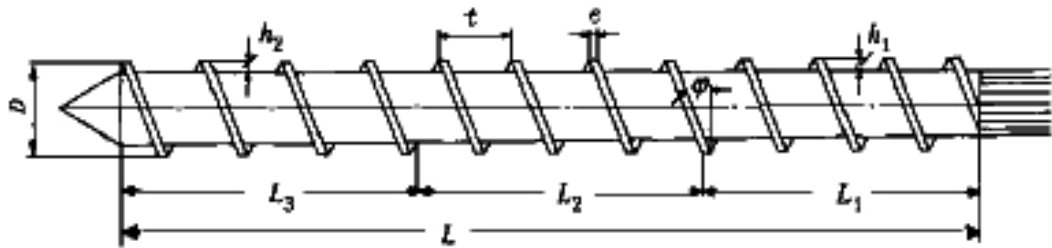


Рисунок 2.3 – Зони матеріального циліндра

- зона завантаження (живлення) довжиною L_1 ;
- зона плавлення (пластифікації) довжиною L_2 ;
- зона дозування (видавлювання) довжиною L_3 .

Основні типи шнеків для екструзії термопластів представлено на рисунку 2.4. У зоні I відбувається завантаження матеріалу перероблюваного матеріалу і його подальше переміщення в напрямку зони ущільнення та розплавлення. Щоб матеріал не створював пробку за рахунок часткового розплаву (не підплавлявся), завантажувальну горловину зазвичай охолоджують проточною водою, повітрям від вентиляторів або іншим охолоджувачем. Переміщення матеріалу у напрямку до формуючої голівки відбуватиметься тільки в тому випадку, якщо сила тертя матеріал - поверхня шнека буде менше, ніж матеріал - поверхня матеріального циліндра.

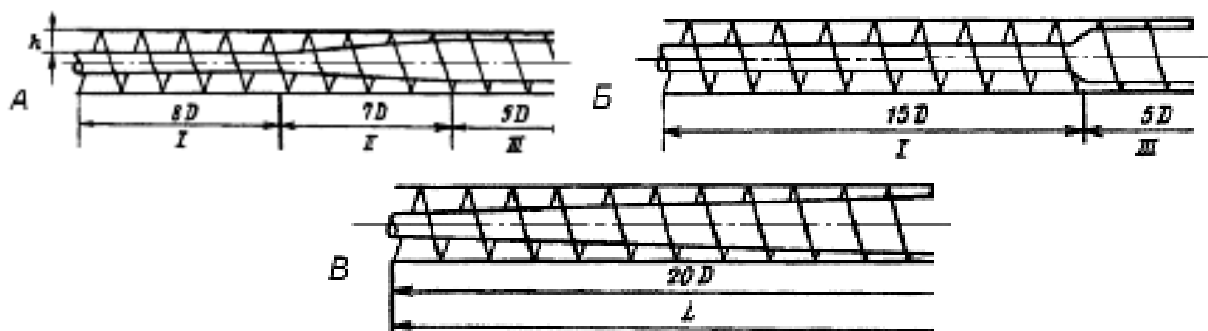


Рисунок 2.4 – Основні типи шнеків для екструзії термопластів

- а - шнек загального призначення з трьома зонами (I, II, III);
- б - шнек для переробки полімерів (наприклад, висококристалічних);

в - шнек для екструзії матеріалу типу ПВХ.

Коефіцієнт тертя термопластичних матеріалів зростає до температури плавлення (плинності), а потім знижується. Тому при переробці ряду матеріалів всередині шнека в зоні завантаження передбачають охолоджуючий канал.

Продуктивність екструдера по зоні завантаження можна розрахувати за формулою:

$$Q_{\text{зав}} = 0,06 \cdot S \cdot t \cdot N \cdot \rho_{\text{нас}} \cdot \eta \cdot \varepsilon \text{ [кг/год]}, \quad (2.1)$$

де: S - площа корисного перетину шнека, см^2

t - крок нарізки шнека, см

N - число оборотів шнека, об/хв

$\rho_{\text{нас}}$ - насипна щільність гранул або порошку, кг/дм^3

η - коефіцієнт корисної дії шнека в зоні завантаження (0,6...0,98)

ε - коефіцієнт заповнення шнека (при відсутності зависання 0,95...1,0).

У зоні плавлення (II) відбувається перехід матеріалу у в'язко-текучий стан, його ущільнення і видалення повітряних включень. Канал черв'яка в цій зоні виконується з поступово зменшуючимся об'ємом, що досягається або зменшенням глибини гвинтового каналу h_1 , або кроку гвинтової лінії t , або обох параметрів. Треба відмітити, що на початку зони плавлення відбувається підплавлення (часткове розплавлення) полімеру, що примикає до внутрішньої поверхні циліндра.

По мірі прогріву камери розплав поступово накопичується й починає впливати на спадаючу по ширині пробку. Так як глибина нарізки витків шнека зменшується по мірі переміщення матеріалу від зони I до зони III, то виникаючий при цьому тиск змушує пробку більш щільно притискатись до нагрітої стінки циліндра, де і відбувається остаточне плавлення полімеру. У зоні пластифікації (розм'якшення) пробка плавиться також за рахунок тепла, що виділяється внаслідок внутрішнього в'язкого тертя в матеріалі в зоні тонкого шару розплаву. В цій зоні відбуваються інтенсивні зсувні деформації, одночасно матеріал пластифікується й переходить в текучий стан. На поверхні пластикової пробки утворюється шар розплаву невеликої товщини. З часом

товщина цього шару збільшується й коли ширина пробки зменшиться до 0,1-0,2 ширини гвинтового каналу черв'яка, то циркуляція в шарі розплаву, що збирається перед штовхачою стінкою, остаточно руйнує залишки пробки та дробить її на дрібні шматки.

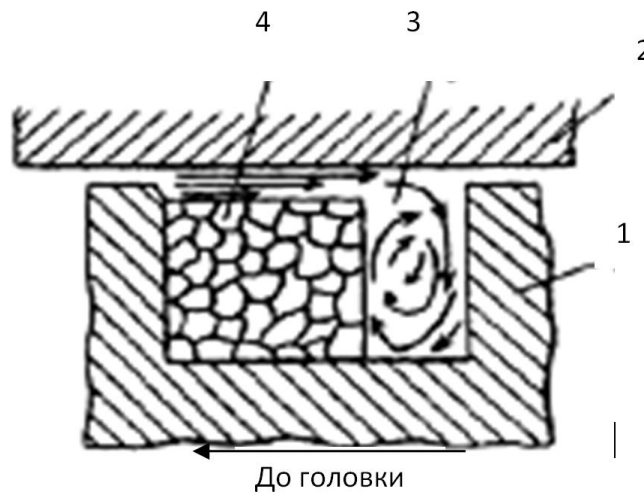


Рисунок 2.5 – Схема плавлення пробки матеріалу в зоні плавлення в міжвитковому перерізі шнека:

- 1 - гребінь шнека; 2 – стінка циліндра; 3 - потоки розплаву полімеру;
4 – спресований твердий полімер (пробка) в екструдері

Коли товщина плівки розплавленого пластику стає рівною товщині радіального зазору між внутрішньою стінкою корпусу і гребнем гвинтової нарізки черв'яка, то він почне зішкрібати шар розплаву зі стінки та збирати його перед своєю штовхаючою гранню. Цей перетин черв'яка є тим місцем, де фактично закінчується зона живлення та починається зона плавлення матеріалу. Наявність в зоні плавлення інтенсивних деформацій зсуву викликає виражений змішувальний ефект. Розплав гомогенізується з високою швидкістю, а всі складові завантаженої суміші перемішуються.

Зона плавлення є найскладнішим місцем черв'яка. Вона характеризується перебуванням полімерного матеріалу в каналі черв'яка в двох станах – розплавленому та твердому.

Кінець зони II характеризується тим, що пробка розпадається на окремі фрагменти. Далі розплавлений полімер, що містить залишки твердих частинок,

потрапляє в зону дозування. По мірі зменшення глибини нарізки витків шнека створюється тиск, який використовується для поступового продавлювання розплаву через фільтруючі сітки та його подачі в голівку. В ній відбувається ущільнення та остаточний вихід сформованого виробу через каліброване сопло. В даному випадку це буде пластикова розігріта нитка, яка буде формувати стінки друкованого виробу на робочому столі 3D-принтера.

Основне збільшення тиску розплаву (надалі - P) відбувається на межі I-ї та II-ї зон. В цьому місті пробка із спресованого матеріалу немов «ковзає» по поверхні шнеку. В зоні I це ще твердий матеріал, а в зоні II – він вже плавиться. Саме наявність цієї пробки й створює основний внесок в підвищення величини тиску пластикового розплаву. Тиск, що утворюється на виході з циліндра, витрачається на подолання опору фільтруючих сіток, течії пластикового розплаву в каналах головки та формування готового виробу.

Розподіл на зони товстостінного циліндра досить умовний та вказує на те, яку функцію виконує дана ділянка шнека. Циліндр також оснащений зонами обігріву, межі яких не обов'язково будуть співпадати з межами зон шнека. При транспортуванні матеріалу в машині велике значення має те, в яких умовах переміщається тверда сировини з завантажувального бункера і як вона заповнює простір між витками шнека, що знаходиться під лійкою бункера. В зоні завантаження перероблюваний пластик у вигляді гранул або порошку надходить в простір між витками шнека й ущільнюється.

В зоні пластифікації та подальшого плавлення перероблюваний пластик починає плавитись в місцях примикання до внутрішньої поверхні циліндра. Як результат, пластик пластифікується, що забезпечує ефект змішування. Рівень тиску P в основному підвищується в прикордонному просторі між зонами завантаження й пластифікації та плавлення. В цьому місці спресований пластик утворює пробку і ковзає по поверхні шнеку. В зоні завантаження пластик ще твердий, а в зоні пластифікації він вже плавиться. Дана пробка виступає причиною підвищення рівня тиску P , який треба витратити на подолання опору фільтрувальних сіток та формування готового профілю. В зоні дозування розплавлений полімер гомогенізується, але ще складається з твердих та

розплавлених частинок. До кінця цієї зони пластик стає повністю однорідною перемішаною (гомогенною) масою і продавлюється скрізь формуючу голівку (каліброване сопло) у вигляді певного профілю.

Полімерна сировина, що піддається процесу екструзії, в нашому випадку представлена гранулами певного розміру та форми. Саме цей вид сировини є оптимальним варіантом для живлення друкуючої головки 3D-принтера.

У процесі переробки багатокомпонентних матеріалів використовуються спеціальні дозатори для завантаження в бункер, а саме:

- шнекові (об'ємні);
- вібраційні;
- вагові.

Така характеристика як сипкість матеріалу сильно залежить від вологості (чим вище рівень вологості, тим гірше сипкість). З цієї причини, рекомендується сушити гігроскопічні матеріали перед завантаженням в екструдер.

Істотно підвищити продуктивність машини дозволяє використання механізмів для примусової подачі сировини в матеріальний циліндр з бункера. У процесі ущільнення сировини в просторі між витками шнека, повітря, що потрапило в циліндр разом з пластиком, витісняється та виходить назад через бункер. Якщо повітря вийде не в повному обсязі, в готовому продукті можуть виникнути небажані порожнини, які можуть стати причиною браку.

Якщо циліндр установки працює тривалий час, то при певних умовах можливий перегрів бункера та циліндра під лійкою бункера. Якщо це відбувається, гранули починають злипаються і перестають нормально подаватися в шнек. Для зниження температури циліндра в ньому потрібно передбачити порожнини для охолоджувальної рідини або застосовувати примусовий обдув повітрям від електричного вентилятора. Як правило, єдиною охолоджуваною зоною екструдерів, є зона завантаження.

Головною характеристикою формоутворюючого інструмента, який містить в собі голівку і калібруючий вузол, є коефіцієнт опору течії розплаву полімеру. До важливих показників роботи типової екструзійної машини можна

віднести ефективність її роботи, яка розраховується як відношення продуктивності агрегату до споживаної ним потужності.

Для найбільш ефективної роботи досліджуваної друкуючої головки було обрано метод гарячої екструзії. Цей метод передбачає протікання процесів на невисокій швидкості і при температурі близько 200°C. Структура матеріалу піддається різним змінам. Тепло надходить до продукту за допомогою нагрівальних елементів, а також через зовнішні стінки екструдера. Рівень вологості сировини коливається в діапазоні 10-20%. Хімічний склад отриманого виробу (розплавленої каліброваної пластикової нитки) не відрізняється від хімічного складу вихідної сировини. Завдяки цій обставині досягається стабільна якість сировини при мінімальних налаштуваннях екструдера.

Запропонований вдосконалений екструдер для 3D-принтера має собою агрегат, призначений для формування потоку розплавленої нитки з пластичних матеріалів певного діаметру за допомогою примусового продавлювання крізь формуюче сопло. Екструдер оснащений наступними механізмами:

- шнеком з нагрівачами, термопарами, кожухами та вентиляторами;
- редуктором з вузлом опорного підшипника;
- кроковим двигуном;
- рамою для встановлення на принтер.

2.4 Математична модель течії розплавленого матеріалу

Для моделювання процесів в екструдері, що має один шнек, повинні враховуватися наступні особливості:

- модель повинна бути динамічною;
- потрібне провести моделювання фазового переходу екструдованого матеріалу із твердого в рідкий (розплавлений) стан;
- потрібне моделювання потоку так званої «неньютонівської» рідини;
- необхідно враховувати нелінійну залежність в'язкості пластику від температури нагріву.

В роботі використовувалися припущення, зроблені У. Дарнеллом та Е. Молом [10]. Ці дослідники одними з перших провели ретельний аналіз руху розігрітого пластику в екструдерах з одним шнеком:

- окремі тверді частинки в їх моделі поводяться подібно суцільному середовищу;
- тверда пробка знаходиться в контакті з усією стінкою каналу, тобто з внутрішньою поверхнею циліндра, елементами шнека, активною стороною і пасивною стороною нарізки гребню;
- глибина досліджуваного каналу є константою;
- тверда пробка поводить себе як поршень в циліндрі;
- зазор, що утворюється між виступом нарізки шнека і циліндром, не має великого значення.

$$T = \frac{\delta f k_{\sigma} V}{I \left(\lambda_m + 2,6 k_{\sigma} \rho \frac{\sqrt{\alpha V}}{\lambda_{\sigma}} \right)}, \quad (2.2)$$

де δ - коефіцієнт розподілу теплоти між тілами, що труться; f - коефіцієнт тертя; k_{σ} - тиск контакту; V - швидкість ковзання; ρ - щільність матеріалу; I - теплопровідність.

Швидкість виділення тепла, обумовленого тертям, дорівнює добутку сили тертя F_f на відносну швидкість Δv :

$$Q = F_f \Delta v = f F_n \Delta v, \quad (2.3)$$

де F_n - нормальна сила; f - коефіцієнт тертя.

Передача теплоти відбувається у всіх випадках, коли в тілі існує температурний градієнт. В даному випадку розглядаємо нестационарну задачу. Згідно із законом Фур'є, який лежить в основі всіх розрахунків теплопровідності, для ізотропних матеріалів вектор теплового потоку q пропорційний температурному градієнту:

$$q = -k \nabla T, \quad (2.4)$$

де q - кількість теплоти, що проходить через одиничну поверхню, перпендикулярну напрямку теплового потоку; k - коефіцієнт теплопровідності. Вважаючи в рівнянні енергетичного балансу $V=0$, отримаємо:

$$\rho C_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = -(\nabla q), \quad (2.5)$$

Рівняння (4) є рівнянням теплопровідності для ізотропного твердого тіла.

Якщо всередині ізотропного тіла є джерело тепла, то рівняння (4) необхідно доповнити членом, що враховує тепловиділення:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{G}{\rho C_v}, \quad (2.6)$$

Де $a = k / \rho C_p$ - коефіцієнт температуропровідності; ∇^2 - оператор Лапласа в прямокутній системі координат; G - інтенсивність внутрішніх тепловиділень, віднесена до одиниці об'єму; заміна C_v на C_p в рівнянні (5) можлива для нестискуваних твердих тіл.

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (2.7)$$

Аналітична теорія нестационарної теплопровідності має в своєму розпорядженні великий набір рішень одновимірних задач, до яких прийнято зводити все різноманіття завдань, що зустрічаються в інженерній практиці. В даний час отримано аналітичні рішення для теплопровідності в плоскій стінці, в циліндрі, в корпусі і в сфері.

Зв'язок між компонентами тензора напружень p_{ij} і тензора швидкостей деформацій ε_{ij} визначається виразом:

$$p_{ij} = \eta_0 2 \varepsilon_{ij} \quad (i, j = x, y, z) \quad (2.8)$$

В якості реологічного рівняння використовується узагальнений степеневий закон [2]:

$$\eta_0 = \mu_0 e^{-b(T-T_0)} \left(\frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_2 \right)^{\frac{1-n}{2n}} \quad (2.9)$$

Тут η_a - ефективна в'язкість, μ_0 - значення ефективної в'язкості (залежить від матеріалу), T - абсолютна температура, T_0 - температура приведення, n - індекс течії (залежить від матеріалу), I_2 - квадратичний інваріант тензора деформацій, який визначається наступним чином:

$$I_2 = 4 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + 2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \quad (2.10)$$

Рівняння енергетичного балансу, складене для сталого режиму в припущенні, що всі теплофізичні характеристики не залежать від температури, має вигляд:

$$\rho c_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -k_m \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + p_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} + p_{yy} \frac{\partial v_y}{\partial y} + p_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} + , \quad (2.11)$$

де ρ - щільність розплаву; c_p - теплоємність розплаву; T - температура розплаву; k_m - коефіцієнт теплопровідності.

2.5 Принцип дії екструдерів

Процес екструзії реалізується за допомогою основного робочого органу (наприклад – шнека). На виході з корпусу розташоване екструзійне сопло. З метою створення додаткового опору при переміщенні матеріалу і його кращому перемішуванні, на шнек можуть монтуватися спеціальні елементи. Робоча зона екструзійної машини ділиться на три умовні зони:

- зона прийому сировини;
- зону пластифікації;
- зону випресовування/видавлювання розігрітого пластику (або зона дозування розплаву).

Схематично принцип дії запропонованого екструдера можна описати наступним чином. Перероблюваний полімер (гранули PLA, поліацеталю або ABS) подається в зону прийому сировини, а саме надходить в пазури між витками шнеку. По мірі надходження нової порції матеріалу, він ущільнюється. Далі, шнек обертається і переміщує матеріал в зону пластифікації, де матеріал підплавляється і пластифікується, що сприяє його змішуванню. Спресований матеріал, який утворює пробку, ковзає по поверхні шнеку. В результаті утворення пробки рівень тиску в циліндрі зростає. Тиск витрачається на подолання опору сіток і формування профілю. У зоні випресовування продукту сировина повністю гомогенізується і продавлюється через формуючу голівку або сопло.

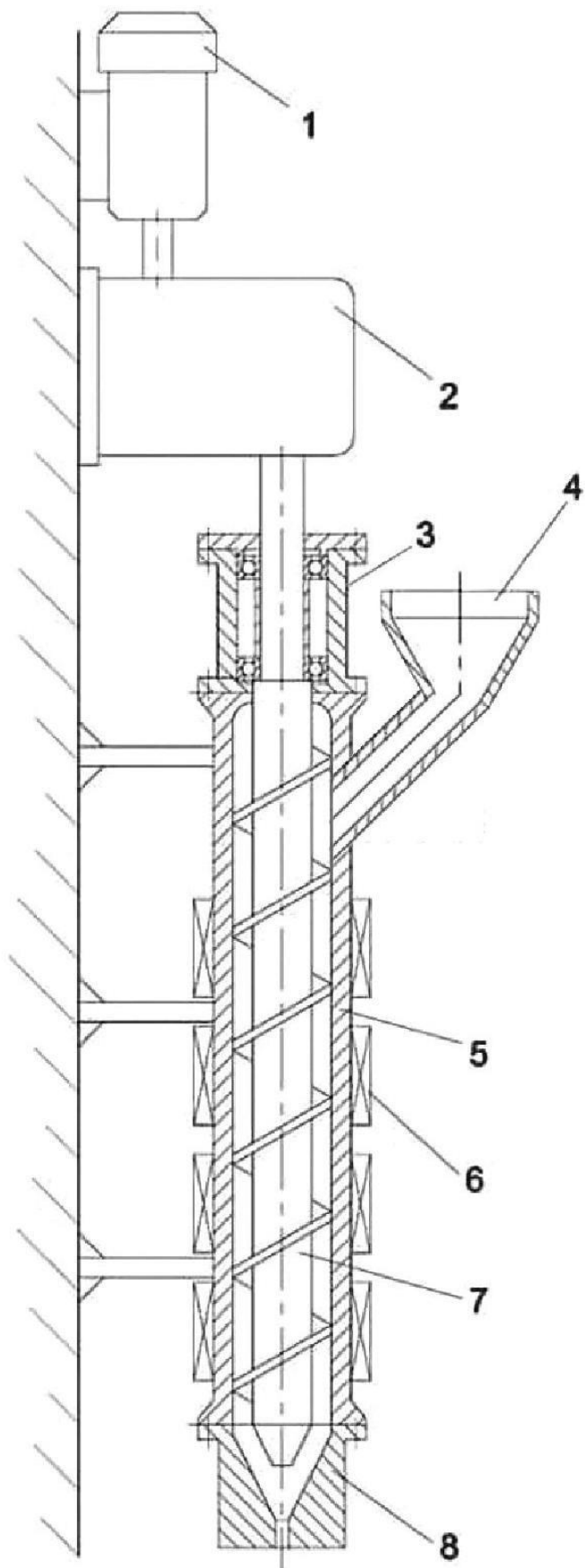


Рисунок 2.5 – Схема екструдера: 1 – двигун, 2 – редуктор, 3 – підшипниковий вузол, 4 – завантажувальний бункер; 5 – матеріальний циліндр, 6 – зовнішній нагрівач з термopapoю, 7 – шнек, 8 – змінне сопло

2.6 Досліджувані матеріали, їх фізичні та механічні властивості

Враховуючи те, що існує дуже велика кількість полімерних матеріалів, тому немає можливості провести якісні дослідження всіх існуючих марок пластику. Тому при виборі матеріалу для дослідження були враховані наступні міркування:

- матеріал повинен мати широке використання в промисловості;
- матеріал на ринку повинен бути представлений у вигляді гранул та у вигляді стандартної нитки/філаменту (діаметром 1,75мм) для 3D-принтера.

На основі огляду ринку витратних матеріалів, в таблиці 2.1 представлено результати порівняльного аналізу трьох найбільш розповсюджених та перспективних технічних пластиків, які випускаються у вигляді гранул.

Таблиця 2

Порівняльна таблиця властивостей пластиків для 3D-друку

	Марка витратного матеріалу для 3D-друку		
Критерій оцінювання	POM	ABS	PETG
Ціна	Вище середньої, дорожчий за ABS та PETG	Середня, дешевша за POM і PETG	Середня, дорожча за ABS, але дешевша за POM
Якість друку (точність)	Висока точність, але схильний до сильної усадки та деформації	Хороша, але сильно схильний до усадки та деформації	Дуже хороша, мінімальна усадка, низька деформація
Міцність	Відмінна міцність, висока жорсткість, стійкість до втоми	Хороша ударостійкість і гнучкість	Дуже висока міцність, ударостійкість і гнучкість
Легкість друку	Складний у друці (потребує закритої камери, високих температур, обігріву)	Складний (потребує обігріву платформи, закритої камери, вентиляції)	Легкий/помірний (добра адгезія, не потребує закритої камери)

	платформи)		
Стійкість до хімікатів	Виняткова стійкість до багатьох хімікатів і розчинників	Хороша стійкість до кислот і лугів	Відмінна хімічна стійкість
Термостійкість	До 90°C	До 98°C	До 73°C
Особливості	Низький коефіцієнт тертя, підходить для рухомих деталей (шестерні, підшипники)	Потребує вентиляції через різкий запах під час друку	Схильний до «ниток», потребує точного налаштування принтера

Згідно наведених даних, пластик PETG є чудовим компромісом, поєднуючи високу міцність і легкість друку, що робить його популярним для функціональних деталей. Пластик марки ABS підходить для застосувань, що вимагають високої термостійкості та міцності, але він складніший у друці через усадку. Поліацеталь (POM) – це вузькоспеціалізований матеріал з унікальними властивостями (низьке тертя, висока жорсткість), який ідеально підходить для інженерних компонентів, але він найдорожчий і найскладніший у 3D-друці серед цих трьох. Вибір матеріалу залежить від конкретних вимог до кінцевого виробу, балансуючи між необхідними механічними властивостями, простотою друку та вартістю.

В якості досліджуваного було обрано матеріал «Поліацеталь» (інша назва – поліформальдегід або POM-C). Він являє собою високотехнологічний термопластичний синтетичний полімерний матеріал, що має високі показники пружності при навантаженнях згину та розтягу. Окрім того, цей матеріал має дуже гарні антифрикційні властивості та характеризується високою стійкістю до впливу органічних розчинників. На відміну від інших пластиків, поліацеталь має високу жорсткість й одночасно достатню твердість полімерного моноліту. Для цього матеріалу характерна висока стійкість до динамічних та ударних, навантажень. Поліацеталь не втрачає своїх властивостей при мінусових

температурах. Вироби з поліформальдегіда можуть використовуватись при діапазоні температур $-60...+130^{\circ}\text{C}$.

Сонячні промені або висока вологість, що згубно впливають на інші полімери, не роблять істотного впливу на деталі з поліацеталю. Тому вироби з нього можуть експлуатуватися в найжорсткіших умовах на відкритій місцевості. Елементи машин і механізмів, виготовлені з поліацеталю, мають гарні пружні якості. Окрім цього, поліформальдегід відрізняється високою втомної міцністю, а деталі з нього витримують досить великі динамічні і знакозмінні навантаження. Низький коефіцієнт тертя поліацеталю одночасно поєднується з його високою зносостійкістю. Після тривалий контакт з вологою об'єм деталі з поліацеталю збільшується не більш ніж на 0,2%. Матеріал хімічно стійкий та поводить себе нейтрально відносно автомобільної хімії та продуктів нафтопереробки, більшості органічних розчинників, кислот і лугів невисокої концентрації. Однак слід відмітити, що гарячі мінеральні масла (розігріті до температури понад $+100^{\circ}\text{C}$), можуть проникнути в тіло деталі з цього пластику. Тому при тривалому контакті можливе так зване «набухання» й подальше розчинення або руйнування матеріалу. Поліацеталь дуже гарно піддається механічній обробці, що дає можливість виробляти з нього декоративні та технічні вироби. Матеріал добре покривається фарбою та піддається додатковому формуванню.

Таблиця 2.2 – Основні фізико-механічні і теплофізичні характеристики полімеру POM-C. Дані з каталогу фірми Nylacast Engineering Plastic Solutions (Великобританія) [11].

Найменування параметра	Показник
Щільність, г/см ³ , ISO 1183	1,41
Водопоглинення рівновісне при 50% відносній вологості 23°C, ISO 62:1999, %	0,20
Міцність при розтягуванні, ISO527-1/2 1993, МПа	70
Е- модуль, ISO527-1/2 1993, МПа	2700

Подовження при розтягуванні, ISO527-1/2 1993, МПа	>15
Міцність при стисканні, ISO604:2002, МПа	110
Модуль при стисканні, ISO604:2002, МПа	2600
Міцність при згинанні, ISO178:2001, МПа	80
Модуль при згинанні, ISO178:2001, МПа	2600
Твердість за Шором, D	83
Максимальна температура при експлуатації, °C	+90
Діелектрична проникність, IEC60250:1969-01, 1 МГц	3,8
Діелектрична міцність, IEC60243-1:1998-01, кВ/мм	16,5

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЕКСТРУДУВАННЯ ГРАНУЛЬОВАНОГО ПЛАСТИКУ

3.1 Будова і принцип роботи пристосування для екструдуювання гранульованого пластику

Пристрій для 3D-друку, що вдосконалюється, призначений для друку розплавленим пластиком у вигляді нитки діаметром 0,8-3 мм з поліацеталю методом екструзії. Цей метод полягає у безперервному прошовуванні розплаву полімерного матеріалу скрізь формуючий калібрований круглий отвір екструзійної головки.

Пристрій може застосовуватись на різноманітних малих підприємствах з переробки полімерних матеріалів, на фірмах з виробництва пластикових виробів та на багатьох хімічних підприємствах. Подібний агрегат може використовуватись як для промислового виробництва деталей, так і для експериментального відпрацювання технологічного процесу.

Під час роботи друкуючої головки 3D принтера для гранульованих матеріалів необхідно встановити його робоче сопло та екструдер таким чином, щоб забезпечити вільний вихід розплавленого пластика та його надійну фіксацію на попередньо надрукованих шарах виробу. Цим вимогам відповідає запропонована вдосконалена конструкція пристрою, в котрій матеріальний циліндр виробу розташовується вертикально, а вихідне робоче сопло знаходиться на його нижньому торці, на невеликій відстані від площини друку. Попереднє калібрування принтера дозволяє забезпечити при виконанні операції друку необхідне взаємне розташування робочого сопла екструдера та друкованої поверхні.

За рахунок великої площі нижнього торця гарячої зони плавлення в зоні друку підвищується температура, що дає змогу більш міцного зчеплення екструдованої нитки з попередньо надрукованим шаром. Пристрій (рис. 3.1 та 3.2) складається з товстостінного циліндричного корпусу 1, на обох кінцях

якого за допомогою різьбових з'єднань закріплені нижня гайка 2 та верхня опора 3. У внутрішню циліндричну порожнину корпусу вставлений з невеликим зазором однозахідний шнек живлення, який своїм верхнім кінцем приєднується до нижнього фланцю запобіжній муфті 4. В якості опори для верхнього кінця шнека служить кульковий опорний підшипник 5, який зафіксований спеціальною шайбою.

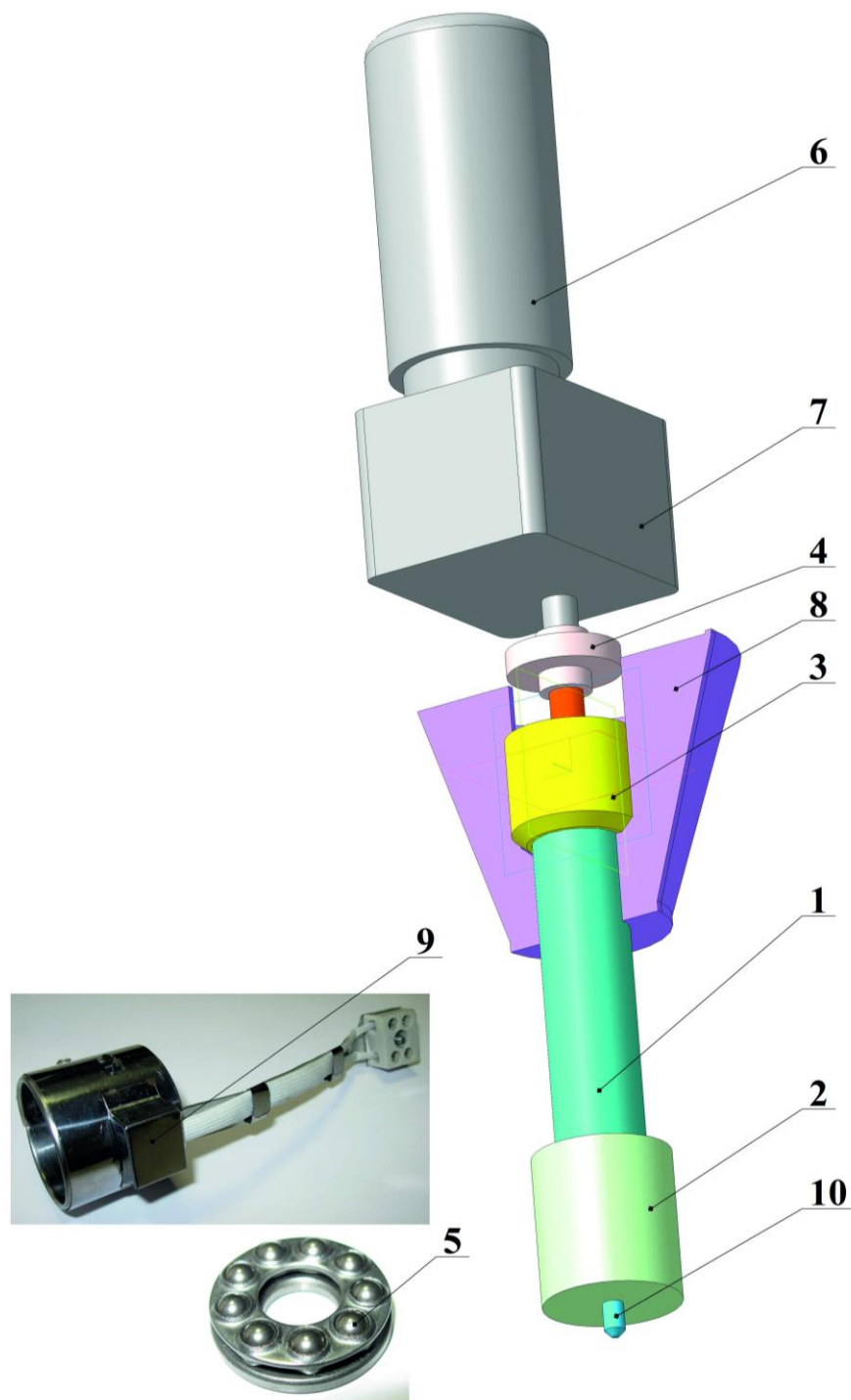


Рисунок 3.1 – Пристрій у зборі

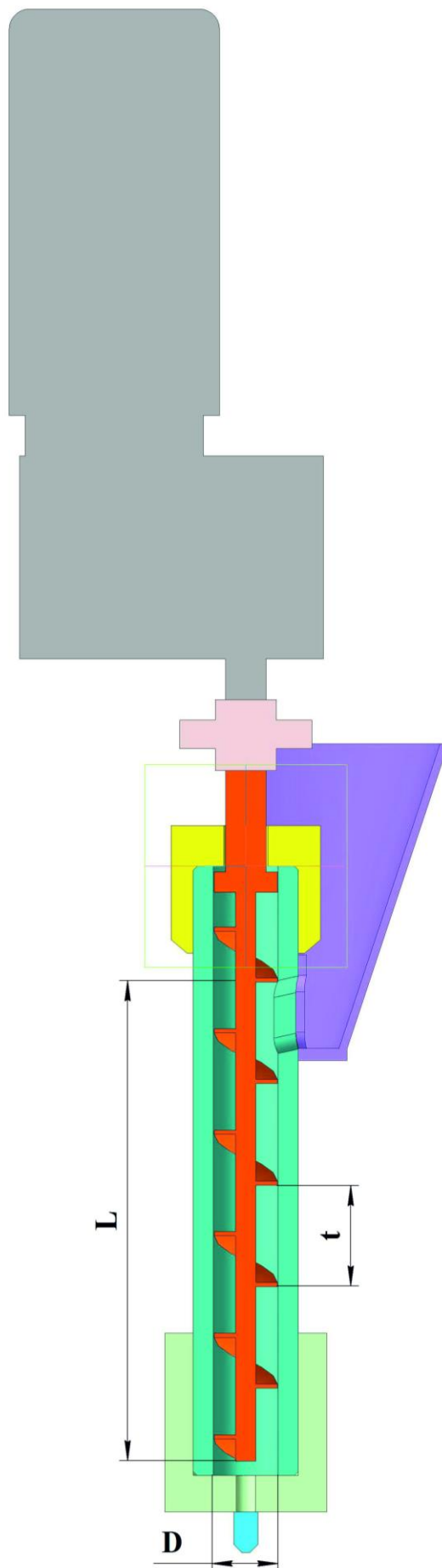


Рисунок 3.2 – Пристрій у розрізі

Обертальний момент до шнека передається від двигуна 6 через понижуючий редуктор 7 та запобіжну муфту. У верхній частині матеріального корпусу розташовано завантажувальне вікно овальної форми, через котре із бункера 8 в зону розплаву поступають гранули пластику. Ззовні металевого циліндра встановлені кільцеві електричні нагрівачі 9, які забезпечують розігрів робочої зони екструдера до потрібної температури плавлення пластику. Вимірювання та контроль температури здійснюється за допомогою каліброваних термічних пар. Нижня гайка виконана із кольорового сплаву (латуні) та має на нижньому торці наскрізний різьбовий отвір, в який закручується каліброване сопло 10.

Основним робочим органом пристрою є товстостінний циліндричний сталевий корпус, в якому з певним зазором обертається шнек діаметром 15,75 мм. Шнек має спеціальну геометрію (профіль) поперечного перерізу каналу, довжину нарізки, крок витків, ступінь стиску та число заходів нарізки шнеку.

Під час обертання шнека гранульований пластик захоплюється та транспортується далі по гвинтовому каналу, який утворюється внутрішньою поверхнею циліндра та гвинтовою нарізкою черв'яка. Переміщення гранул супроводжується їх нагріванням та подальшим плавленням разом із зростанням тиску P . Одночасно відбуваються різноманітні процеси, в тому числі й часткове нагрівання матеріалу за рахунок енергії тертя гранул між собою та стінками пристрою та теплової енергії, що підводиться від системи нагрівання циліндра електричними нагрівачами. По мірі зростання температури та тиску, в пластикових гранулах відбуваються поступові хімічні, фазові та інші перетворення, їх ущільнення, змішування доданих компонентів, а також подальше вилучення з матеріалів газоподібних та інших компонентів.

У зоні завантаження пристрою відбувається засипання гранульованого матеріалу, що переробляється, та його подальше переміщення в напрямку зони плавлення й ущільнення. Для підвищення продуктивності роботи пристрою зона його завантаження зроблена з заздалегідь розрахованим певним об'ємом гвинтового каналу шнека.

У зоні плавлення відбувається розплавлення гранульованого полімеру, його подальше ущільнення та вихід газу з розплаву. Для ефективного протікання цих процесів канал шнека в зоні плавлення виконується з поступово плавно зменшуваним об'ємом. Це досягається за рахунок зменшення глибини каналу, кроку гвинтової нарізки або обох параметрів одночасно.

У зоні дозування пристрою відбувається остаточне перемішування пластикового розплаву. При цьому зростає тиск P , під дією якого пластиковий розплав проштовхується до формуючого каліброваного сопла. Довжина робочих зон екструдера може змінюватись у досить великому діапазоні в залежності від властивостей завантаженого гранульованого матеріалу та особливостей застосованої технології переробки.

Воронка для завантажування гранул являє собою зварний або клепааний тонкостінний металевий напівциліндр із завантажувальним отвором. Корпус пристрою має вигляд товстостінного металевого циліндру, який за допомогою фланців приєднаний до завантажувальної воронки. Корпус має 1,2,3 та 4-ту зони обігріву електронагрівачами (зазвичай для цього використовується ніхромові спіраль). Охолодження зон корпусу здійснюється від декількох (зазвичай до 4-х) лопатевих вентиляторів, які можуть працювати незалежно один від одного. Для контролю температури корпусу екструдера на ньому встановлюють спеціальні калібровані датчики, які мають функцію дистанційного зняття показників температури. Робочі зони розділені між собою перегородками. Ззовні корпус пристрою закритий теплоізоляційним кожухом, який запобігає охолодженню екструдера та служить додатковим захисним пристроєм.

Шнек за допомогою шпонкового або шліцьового з'єднання, яке розраховується на передачу потрібного обертового моменту, приєднується до спеціальної перехідної втулки та опирається на блок радіально-упорних підшипників відкритого типу. Обертальний вал за допомогою шліцьового з'єднання приєднаний до валу понижуючого тихохідного редуктора з заданим передатним числом.

Формуюча головка (зазвичай це латунне сопло) кріпиться до нижньої гайки екструдера за допомогою стандартного різьбового з'єднання та має лиски або грані для затягування її гайковим ключем.

3.2 Запропонована модель пристрою

На основі проведених досліджень була запропонована вдосконалена модель екструдера, яка може працювати у складі промислового пристрою для 3D-друку гранульованими витратними матеріалами (рис. 3.3).

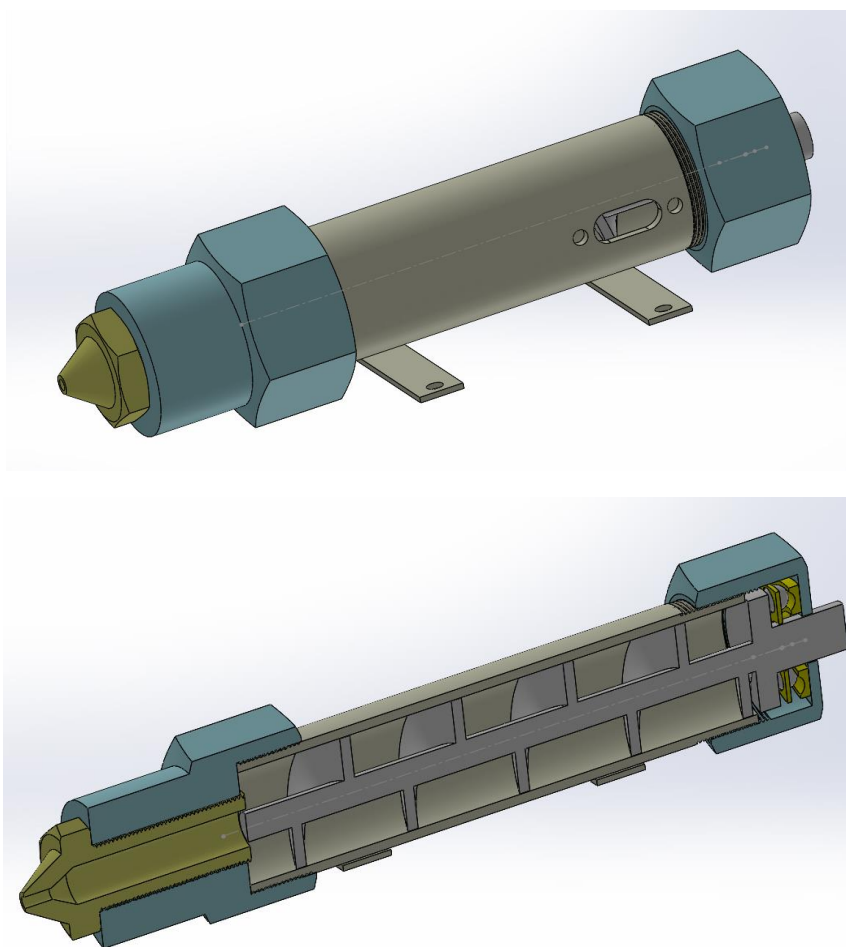
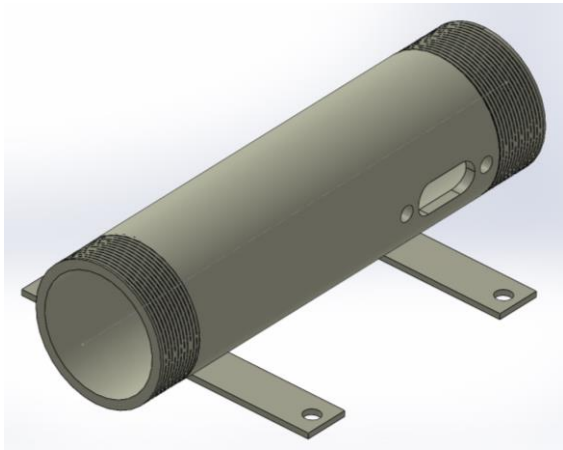


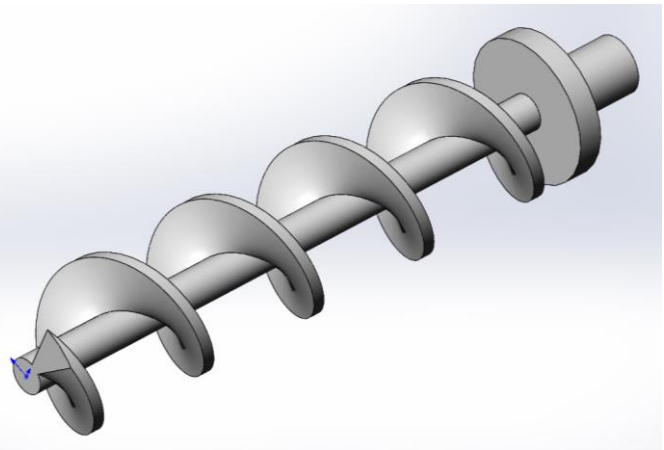
Рисунок 3.3 – Загальний вигляд пристрою

В якості матеріалу для заготовки корпусу та верхньої напрямної була рекомендована якісна вуглецева сталь марки сталь 40Х. Робочу модель шнека пропонується виготовити із кроком витків 25 мм. Нижня гайка для збільшення теплоємності виготовляється із латуні марки Л62.

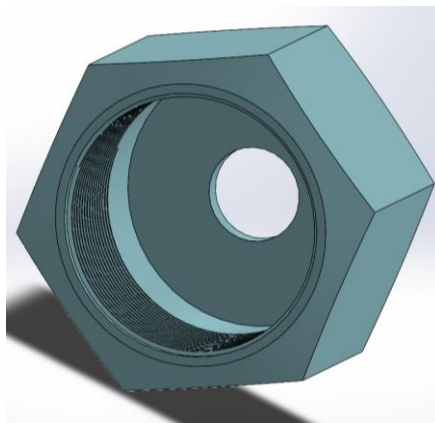
Окремі складові частини екструдера зображено на рис. 3.4



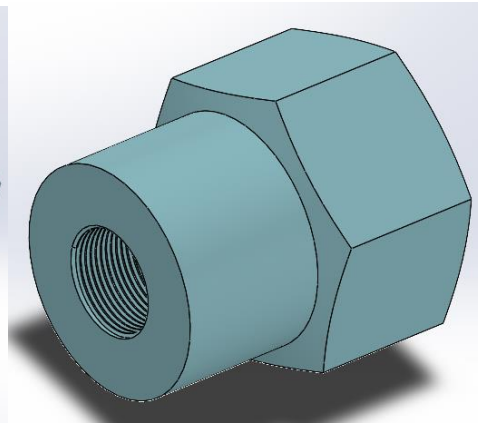
а)



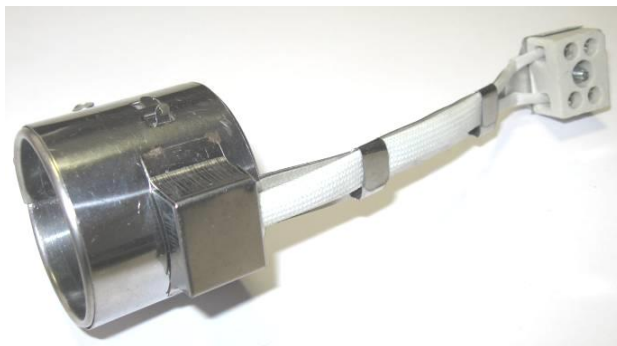
б)



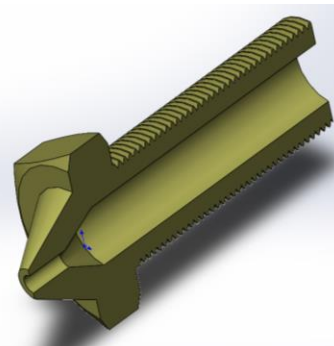
в)



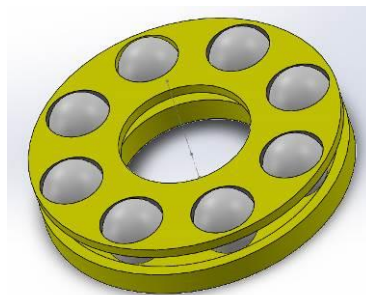
г)



д)



е)



ж)

Рисунок 3.4 – Деталі екструдера: а – корпус; б – шнек; в – верхня направляюча; г – нижня гайка із нагрівачем; д – нагрівач електричний; е – сопло екструдера; ж – опорний підшипник.

3.3 Техніка безпеки, промислова санітарія та практичні рекомендації при виконанні робіт на запропонованому пристрої

Працівники, що обслуговують обладнання екструдерів, повинні знати та виконувати загальні вимоги по охороні праці на підприємстві, цеху та дільниці, на території яких здійснюється виробничий процес.

При виконанні робіт безпосередньо на робочому місці обслуговуючий персонал під час підготовки до роботи повинен:

- привести в порядок свій робочий одяг, перевірити справність інструментів, огорожі, стан проходів біля обладнання, наявність знаків безпеки, інструкцій з ТБ та супровідної технічної документації;
- перевірити стан проходів до робочого місця і при необхідності звільнити їх від зайвих та непотрібних предметів;
- при труднощах, що можуть виникнути при виявленні порушень, з метою їх усунення поставити до відома майстра виробничої дільниці або загального інспектора по охороні праці на підприємстві;
- у випадку появи фізичного нездужання слід реально оцінити свій стан і звернутися за потреби до лікаря або бригадира. Не продовжувати роботу в хворобливому стані, якщо є потреба, то дочекатись підмінного працівника.

Під час роботи обслуговуючий персонал повинен:

- ні в якому разі не допускати порушень виконання інструкцій і правил внутрішнього розпорядку;
- не допускати порушень трудової і технологічної дисципліни;
- в разі загрози виникнення аварії або небезпеки для життя та здоров'я обслуговуючого персоналу слід негайно припинити роботу.

Після закінчення роботи обслуговуючий персонал повинен:

- відключити електроживлення пристрою;
- привести в порядок робоче місце, очистити і провести змащення рухомих деталей стану згідно інструкції з експлуатації;
- акуратно скласти на робочому місці інструменти та деталі.

До санітарно-технічних заходів на робочому місці слід віднести:

- усунення тісняви у виробничих приміщеннях;

- підтримання на робочому місці нормальної температури, вологості, освітлення, відсутність шкідливих газів, пилу, шуму та вібрацій згідно встановлених санітарних норм та правил.

Під час експлуатації екструдера слід виконувати наступні практичні рекомендації:

а) Перед запуском техніки сировинний матеріал (пластикові гранули) повинен бути сухим та зберігатись у щільно зачиненій фабричній упаковці (мішках, контейнерах та т. ін.). Необхідно обов'язково переконатися, що всі системи установки справні, приведені в норму та функціонують належним чином. Так, оператор повинен переконатися, що електродвигун і мотор вентилятора після включення обертаються у правильному напрямку. Будь-які виявлені несправності під час перевірки слід негайно усунути самостійно, або викликати ремонтний персонал.

б) Під час роботи обладнання треба уважно стежити за підтриманням його температурного режиму. Коли температура пристрою нагріву досягне необхідної позначки, необхідно підтримувати цей режим ще протягом деякого часу. Потім видаляються всі залишкові продукти виробництва, встановлюється сітчастий фільтр для очищення розплавленого пластику і підключається екструзійна головка.

в) Протягом всього процесу екструзії перевіряйте, щоб робочі параметри обладнання відповідали встановленим технічним вимогам. Технічний оператор установки повинен проводити періодичні вимірювання і перевірки або слідкувати за показниками контрольно-вимірювальних приладів.

г) Готуючись до запланованої зупинки машини для екструзії необхідно припинити подачу матеріалів у завантажувальний бункер і видавити весь пластик в екструдер. Коли шнек повністю очиститься від пластику, для зупинки нагріву вимикається нагрівач циліндра і головки екструдера. Після припинення роботи шнека і допоміжних механізмів вимикається електродвигун і всі допоміжні пристрої. Необхідно ретельно очистити такі деталі екструдера, як шнек, циліндр й так далі від залишків пластику.

д) Важливо пам'ятати, що експлуатація екструдера на холостому ході забороняється. Це може привести до подрипин або пошкоджень шнека і циліндра. Необхідно періодично змащувати деталі, при цьому мастильну речовину треба вчасно замінювати. Після закінчення роботи залишки пластику в формуючій голівці повинні бути ретельно очищені. Якщо обладнання тимчасово не використовується, екструзійні голівку і матрицю слід змастити рідким мастилом для захисту поверхонь від корозії.

е) Не допускається потрапляння сталевих інструментів та інших металевих домішок у сировину, так як це може привести до заклинювання рухомих частин та/або пошкодження шнека і циліндра екструдера. Забороняється вмикати шнек пристрою на робочий хід до тих пір, поки не буде досягнута задана температура розплаву пластика та він не стане текучим.

ж) В якості сировини необхідно використовувати сухі гранули з вологістю не більше 0,05%. Зайва волога у полімері спричиняє появу пухирців, й внаслідок цього розшарування та пористість друкованих деталей.

з) Перед подачею в екструдер вологі гранули слід просушити у сушильному бункері при рекомендованій температурі (для ABS це 80°C, для PLA – 60°C, PETG – 70°C протягом 2...4 годин). Для уникнення засмічення тракту рекомендується періодично проводити просівання гранул, видаляючи пил й домішки та сторонні предмети.

Техніка безпеки при роботі з вдосконаленим 3D-принтером

1. Температурна безпека:

Заборонено торкатись без захисту рук до гарячих зон (екструдер, сопло, нагрівальний блок) – їх робоча температура сягає до 250–300°C. Перед обслуговуванням завжди вимикається живлення установки та дається охолонути обладнанню до температури < 40°C. Забороняється охолоджувати нагрівальні елементи водою або мокрими ганчірками, бо це може привести до термічного шоку та тріщин у корпусі.

2. Електробезпека:

Обладнання підключається через окремий автоматичний вимикач із заземленням. Заборонено експлуатувати обладнання з пошкодженими ізоляцією на дротах або нагрівачах та термopарах. Для запобігання збоїв у керуванні використовуються стабілізатори напруги або джерела безперервного живлення UPS.

3. Вентиляція та охорона праці:

При роботі з полімерними гранулами (особливо поліацеталем, ABS, нейлоном або PETG) виділяються шкідливі та горючі леткі органічні сполуки. Тому облаштування локальної витяжної вентиляції в зоні екструдера є обов'язковим. Необхідно уникати вдихання шкідливих випарів та користуватись респіратором класу безпеки P2 або FFP2. Робоче місце повинно бути обладнане датчиками диму або температури для запобігання пожежі.

4. Механічна безпека

Під час роботи заборонено торкатися рухомих частин (шнек, подавач, вентилятори). Захисні кожухи та екрани мають бути встановлені на постійній основі та зніматись тільки під час ремонту або контрольного огляду. Перед запуском обладнання виконати ретельну перевірку щодо відсутності сторонніх предметів у зоні переміщення каретки.

5. Пожежна безпека

Поруч із принтером необхідно тримати повірений вогнегасник (порошковий або вуглекислотний, ємністю не менше ніж 2 кг). Не залишати працююче обладнання без нагляду. Зберігання гранул та полімерів повинне бути в герметичних, вогнетривких контейнерах, подалі від нагрівальних приладів та вологи.

3.4 Налаштування обладнання

Температуру зони плавлення встановлюється згідно з технічними характеристиками матеріалу:

ABS – 220...250°C;

PLA – 180...210 °C;

PETG – 230...250 °C;

поліамід – 250...280°C.

Необхідно забезпечити належне попереднє розігрівання шнека та сопла, щоб уникнути перевантаження двигуна. З метою стабільного подавання гранул без ривків перевіряється тиск у камері подачі. Для стабільного формування шару використовується рівномірна подача охолодженого повітря або води.

3.5 Обслуговування та контроль обладнання

Після кожної зміни матеріалу для екструзії або зупинки роботи принтера необхідно ретельно очищати шнек і сопло від залишків полімеру. Приблизно раз у 200...300 годин роботи проводиться змащення понижуючого редуктора та перевірка стану нагрівальних елементів. Для уникнення коливань товщини шару використовуються датчики контролю подачі гранул або вагові дозатори. Перевірка та калібрування температурних датчиків проводиться не рідше ніж раз на 3 місяці.

3.6 Раціональне використання

Використання пластикових гранул замість філаменту економічно доцільне при обсягах споживання понад 100...150 кг полімеру на рік. Для серійного виробництва деталей рекомендується застосовувати змішувальні гранули (компаунди) або рециклати (вторинну гранульовану сировину) з перевіреними властивостями. Для мінімізації енерговитрат доцільно провести оптимізацію параметрів друку (таких як температура, швидкість, висота друкованого шару). Наприклад, надмірне перевищення швидкості обертання деталей екструдера здатне підвищує споживання електроенергії на 10...20 %.

Узагальнені поради

Для промислової експлуатації розробленого обладнання доцільно розробити паспорт технологічного процесу (режими, температура, швидкість, норми витрати електроенергії тощо). Щороку проводити технічний огляд обладнання з перевіркою електроніки, датчиків та стану нагрівальних елементів. При роботі з новими видами гранул проводити тестовий друк з вимірювання міцності зразків (а також, щоб уникнути браку).

Головна перевага вдосконаленого принтера – зниження собівартості виробів, але лише за умови правильної експлуатації та належного контролю безпеки.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ РОБОЧОГО ОРГАНУ 3D-ПРИНТЕРА ДЛЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Загальні вихідні дані

Для вирішення питання про економічну ефективність запропонованого способу 3D друку пластикових деталей за допомогою проектної друкуючої головки, у якості бази для порівняння приймемо промисловий екструдер, призначений для виготовлення деталей з полімерних прутків (філаментів).

Розробка у даному дипломному проекті вдосконаленого та більш дешевого робочого органу дозволить скористатися перевагами низької вартості друку завдяки застосуванню системи екструзії, де у якості філаменту будуть використовуватися гранули пластику. Так вартість катушки пластика для 3D друку вагою 1 кг може досягати \$15-20, у той час як 1 кг пластикових гранул може коштувати \$2-3.

Недоліком гранул є потреба у їхньому додатковому нагріванні та відповідне збільшення витрат на енергоносії.

Загальні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1.	Ціна умовної одиниці витратного матеріалу: - полімерного прутка (ABS) - пластикових гранул (ABS)	грн./кг грн./кг	585 -	- 150
2.	Умовний час друку (з 1 кг сировини)	год.	6,0	6,0
3.	Потужність електронагрівачів	кВт	1,0	1,5
4.	Оптова ціна 3D-принтера	грн.	147000	-

4.2 Визначення витрат на підготовку виробництва друкуючої головки

Витрати на розробку конструкції друкуючої головки та технології її виготовлення визначаємо за формулою:

$$B_{пкт} = H_{ор} \cdot T_{кт} \cdot Z_{сз} \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon}, \quad (4.1)$$

де $H_{ор}$ – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції друкуючої головки, шт.;

$T_{кт}$ – сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської та технологічної документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{сз}^к$ – середньогодинна заробітна плата конструктора (технолога), грн./год.;

κ_{∂} – додаткова заробітна плата конструктора (технолога), %;

B_c – єдиний соціальний внесок, %;

H_{ϵ} – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати).

$$B_{пкт} = 5 \cdot 19,9 \cdot 130,826 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 5 \cdot 19,9 \cdot 130,826 \cdot \frac{45}{100} = 23330,0 \text{ грн.}$$

4.3 Визначення витрат на виготовлення друкуючої головки

Після визначення трудомісткості виготовлення проектної друкуючої головки розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників на i -тій роботі:

$$Z_{ор(i)} = C_z \cdot T_c \quad (4.2)$$

де C_z – середньогодинна тарифна робітника відповідного розряду, грн.

T_c – трудомісткість i -го виду робіт, нормо-год.

Наприклад, на механічних роботах:

$$Z_{ор} = 12,0 \cdot 106,539 = 1278,47 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_{o(i)} = \sum_{i=1}^n z_{op(i)} \cdot \frac{\Pi_{bo(i)}}{100}, \quad (4.3)$$

де $\Pi_{bo(i)}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, витрати на утримання та експлуатацію обладнання на механічних роботах:

$$B_o = 1278,47 \cdot \frac{322}{100} = 4116,67 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$B_{цех(i)} = \sum_{i=1}^n z_{op(i)} \cdot \frac{\Pi_{цв(i)}}{100}, \quad (4.4)$$

де $\Pi_{цв(i)}$ – процент цехових витрат по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$B_{цех} = 1278,47 \cdot \frac{232}{100} = 2966,05 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Трудовісткість виготовлення та окремі види витрат на виготовлення головки

Види робіт	Трудовісткість робіт, н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітника, грн/год	Основна заробітна плата робітників z_{op} , грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн.		Загально-цехові витрати $B_{цех}$, грн.	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	0,1	4	115,062	11,51	245	28,19	132	15,19
Механічні	12,0	4	106,539	1278,47	322	4116,67	232	2966,05

Складальні	4,5	4	106,539	479,43	210	10061470 00,79	142	680,78
Всього	16,6	-	-	1769,40	-	5151,65	-	3662,02

Повну собівартість друкуючої головки розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних та звітних калькуляцій базових конструкцій за формулою:

$$C_{\text{пов}} = M_o + M_d + T_v - B_{\text{зв}} + E_{\text{тех}} + П_{\text{тех}} + З_{\text{ор}} + З_{\text{др}} + B_c + З_{\text{цп}} + B_o + B_{\text{цех}} + B_{\text{зав}} + B_{\text{ін}} + B_{\text{пв}}, \quad (4.5)$$

де M_o , M_d – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

Розрахунок витрат на основні матеріали зведено до табл. 4.3.

T_v – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$B_{\text{зв}}$ – зворотні відходи, які реалізуються (віднімаються), грн.;

$E_{\text{тех}}$, $П_{\text{тех}}$ – енергія та паливо на технологічні цілі, грн.;

$З_{\text{др}}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

B_c – єдиний соціальний внесок, грн.;

$З_{\text{цп}}$ – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;

$K_{\text{зав}}$ – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{\text{ін}}$ – інші виробничі витрати, грн.;

$B_{\text{пв}}$ – позавиробничі витрати, грн.

Таблиця 4.3

Склад матеріальних витрат на виготовлення друкуючої голівки

№ п/п	Основні матеріали та покупні комплектуючі вироби	Оди- ниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
	Основні матеріали				
1.	Сталь 45	кг	4,8	44,73	214,70
2.	Латунь ЛС59	кг	0,5	540,0	270,00
	Всього основних матеріалів		-	-	484,70
	Покупні комплектуючі вироби				
1.	Редуктор шестеренний	шт.	1	6750	6750,00

2.	Двигун приводний 1,5 кВт	шт.	1	4620	4620,00
3.	Двигун приводний 200 Вт	шт.	1	3600	3600,00
4.	Кріпильні гайки	шт.	4	29,8	119,20
5.	Упорний підшипник	шт.	1	750	750,00
6.	Кронштейн	шт.	2	360	720,00
	Всього покупних		-	-	16559,20

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 4.4.

Оптову ціну друкуючої головки розраховуємо за формулою:

$$C_{\text{опт}} = C_{\text{пов}} + \Pi_{\text{н}}, \quad (4.6)$$

де $\Pi_{\text{н}}$ – нормативний прибуток, грн.

$$\Pi_{\text{н}} = \frac{P_{\text{с}} \cdot C_{\text{пов}}}{100} = \frac{20 \cdot 35450,0}{100} = 7090,0 \text{ грн.}, \quad (4.7)$$

де $P_{\text{с}}$ – встановлений рівень рентабельності виробу, %.

$$C_{\text{опт}} = 35450,0 + 7090,0 = 42540 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.4

Повна собівартість та оптова ціна друкуючої головки

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 3	484,70
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	19,39
3.	Покупні комплектуючі	$П_n$	табл. 3	16559,20
4.	Зворотні відходи	$-B_{зв}$	6% від M_o	29,08
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_b	5% від $(M_o + M_d)$	682,53
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}, E_{тех}$	115,8% від $З_{ор}$	2048,96
7.	Всього матеріальні витрати			19765,71
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 2	1769,40
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	176,94
10.	Єдиний соціальний внесок	$B_{сс}$	22,0% від $(З_{ор} + З_{др})$	428,19
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань	$З_{уп}$	12,0% від $З_{ор}$	212,33
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 2	5151,65
13.	Цехові витрати	$K_{цех}$	табл. 2	3662,02
14.	Загальнозаводські витрати	$K_{зав}$	220% від $З_{ор}$	3892,68
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	2,3% від $З_{ор}$	40,70
16.	Виробнича собівартість	$C_{вир}$	$\Sigma(7 \div 15)$	35099,61
17.	Позавиробничі витрати	$K_{пв}$	1% від $C_{вир}$	351,00
18.	Повна собівартість	$C_{пов}$	$C_{вир} + K_{пв}$	35450,00
19.	Прибуток	$П_n$	20% від $C_{пов}$	7090,00
20.	Оптова ціна	$Ц_{опт}$	$C_{пов} + П_n$	42540,00

4.4. Розрахунок експлуатаційних витрат (собівартості обробки)

На даному етапі досліджень відсутні дані щодо співвідношення продуктивності друку у базовому та проектному варіантах, тому виконаємо укрупнений розрахунок експлуатаційних витрат для двох статей:

Витрати на електроенергію технологічну (для нагрівання матеріалу):

$$E_m = N_n \cdot K_N \cdot K_q \cdot T_n \cdot C_{el}, \quad (4.8)$$

де N_n – потужність електронагрівача, кВт;

K_N, K_q – коефіцієнти завантаження електронагрівача відповідно за потужністю та за часом ($K_N=0,55-0,7$; $K_q=0,4-0,7$);

T_n - час нагрівання (переробки 1 кг сировини), год.;

C_{el} – ціна 1 кВт-год електроенергії, грн.

В базовому варіанті:

$$E_{m.б} = 1,0 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 6 \cdot 18,10 = 32,580 \text{ грн.}$$

В проектному варіанті:

$$E_{m.пр} = 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 6 \cdot 18,10 = 48,870 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію друкуючої головки (ремонт, амортизація та ін.):

$$B_n = \frac{(0,6 - 0,7) \cdot C_{онт} \cdot K_{мм} \cdot T_n}{F_{дрм} \cdot \eta}, \quad (4.9)$$

де $C_{онт}$ – оптова ціна друкуючої головки (екструдера), грн.;

$K_{мм}$ - коефіцієнт, який враховує транспортування та монтаж робочого органу на 3D принтері;

0,6-0,7 – числове значення коефіцієнта, який враховує норму амортизації та експлуатаційні витрати;

η – нормативний коефіцієнт завантаження обладнання.

$$B_{ек.б} = \frac{0,6 \cdot 147000 \cdot 1,09 \cdot 6,0}{3980 \cdot 0,85} = 170,508 \text{ грн.};$$

$$B_{ек.пр} = \frac{0,6 \cdot 42540 \cdot 1,09 \cdot 6,0}{3980 \cdot 0,85} = 49,343 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.5.

Розрахунок експлуатаційних витрат

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Варіанти	
		Базовий	Проект
1.	Матеріальні витрати (вихідна сировина для друку)	584,00	150,00
2.	Електроенергія технологічна	32,580	48,870
3.	Експлуатація друкуючої головки (обслуговування, ремонт, амортизація та ін.)	170,580	49,343
Загальна сума		787,160	248,213

4.5 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект, який отримує виробник друкуючої головки, розраховуємо за формулою:

$$E_{pv} = (C_{opt.pr} - C_{пов.pr}) \cdot P_v - E_n \cdot K_v, \quad (4.10)$$

де $C_{opt.pr}$ – вартість оптова проектної головки, грн.;

$C_{пов.pr}$ – повна собівартість проектної головки, грн.;

P_v – програма виробництва головок, шт./рік;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень ($E_n = 0,16$);

K_v – додаткові капітальні витрати у виробника (вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва головки), грн.

$$E_{pv} = (42540 - 35450) \cdot 10 - 0,16 \cdot 23330 = 67200 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект від експлуатації друкуючої головки розраховуємо за формулою:

$$E_p = (B_{e.баз} - B_{e.пр}) \cdot N_p - E_n \cdot K_{сп}, \quad (4.11)$$

де $B_{e.баз}$, $B_{e.пр}$ – експлуатаційні витрати в розрахунку на одиницю витратного матеріалу відповідно в базовому та проектному варіантах, грн.;

N_p – річний обсяг використання витратного матеріалу, кг;

$K_{сп}$ – додаткові капітальні витрати у споживача, грн.

$$K_{сп} = \Phi_{бал.пр} \cdot Q_{пр} - \Phi_{бал.б} \cdot Q_{баз}, \quad (4.12)$$

де $\Phi_{бал.пр}$, $\Phi_{бал.б}$ – відповідно балансова вартість друкуючої головки (екструдера) в проектному та базовому варіантах, грн.;

$Q_{пр}$, $Q_{баз}$ – потреба в друкуючих головках (екструдерах) відповідно в проектному і базовому варіантах;

$$K_{сп} = 42540 \cdot 1 - 147000 \cdot 1 = -104460 \text{ грн.}$$

$$E_p = (787,16 - 248,213) \cdot 1500 - 0,16 \cdot (-104460) = 825200 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника

$$T_{окв} = \frac{K_{\epsilon}}{(C_{опт.пр} - C_{пов.пр}) \cdot P_{в}} = \frac{23330}{(42540 - 35450) \cdot 10} = 0,33 \text{ року} = 4 \text{ міс.} \quad (4.13)$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Одиниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,-)
1.	Програма виробництва друкуючих головок	шт./рік	-	10	-
2.	Річний обсяг використання витратного матеріалу	кг/рік	1500	1500	—
3.	Умовний час друку (з 1 кг сировини)	год.	6,0	6,0	—
4.	Ціна витратного матеріалу	грн./кг	585	150	-74,4
5.	Умовний час друку (з 1 кг сировини)	год.	6,0	6,0	-
6.	Повна собівартість друкуючої головки	грн.	-	35450	-
7.	Оптова ціна 3D-принтера	\$ тис. грн.	3500 147,0	42,54	-71,1
8.	Експлуатаційні витрати	грн.	787,16	248,213	-68,5
9.	Капітальні витрати на підготовку виробництва друкуючої головки	грн.	—	23330	—
10.	Строк окупності капітальних витрат у виробника	міс.	—	4,0	—
11.	Річний економічний ефект:				
	- у виробника		—	67200	—
	- у споживача	грн.	—	825200	—

4.6 Висновок щодо економічної доцільності модернізації

Результати проведеного порівняльного аналізу економічних витрат базового та проектного варіантів друкуючої головки 3D-принтера наведені на рисунку 4.1:

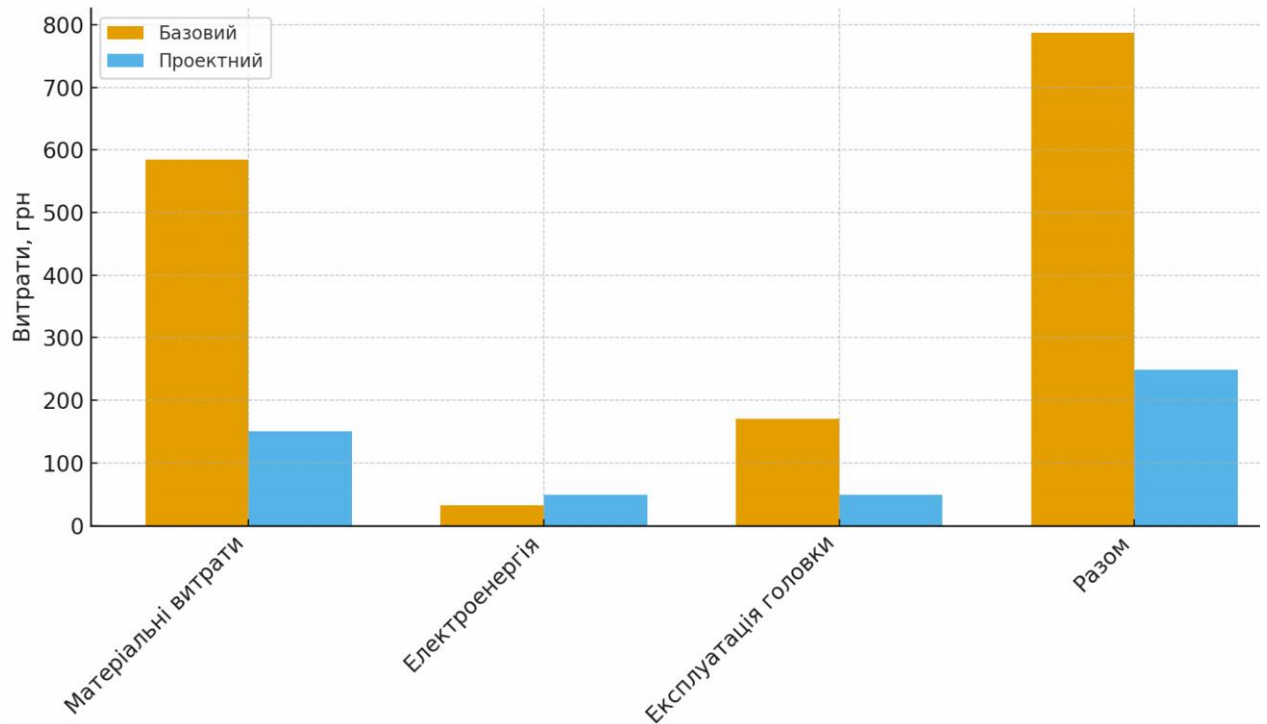


Рисунок 4.1 – Порівняння економічних витрат

1. Зменшення собівартості друку на 68,5%

Базовий варіант: 787,16 грн

Проектний варіант: 248,21 грн

Основний економічний ефект досягається завдяки:

- переходу з дорогого філаменту ABS (585 грн/кг) на гранули (150 грн/кг);
- суттєвому зниженню вартості експлуатації друкуючої головки (–71%).

2. Незначне збільшення витрат на електроенергію (+16 грн на 1 кг)

Проектний варіант потребує трохи більшої потужності нагріву, але це компенсується багатократним зменшенням вартості сировини.

3. Окупність модернізації становить 4 місяці, що є гарним показником для промислового обладнання.

4. Сукупний річний економічний ефект: для виробника: 67200 грн, для споживача: 825200 грн

Модернізація є високоефективною та економічно доцільною.

Перехід на друкуючу головку для гранульованих матеріалів:

- суттєво знижує витрати користувача;
- швидко окупається;
- значно підвищує конкурентоспроможність обладнання;
- робить виробництво більш гнучким та доступним у плані матеріалів.

ВИСНОВКИ

Приведений огляд та аналіз літературних джерел згідно теми, який дозволив сформулювати мету та задачі роботи.

Виконане теоретичне обґрунтування доцільності використання процесу екструзії пластикових гранул для забезпечення 3D друку запропонованим пристроєм. Запропоновано вдосконалену схему обладнання та розроблені 3D моделі його складових компонентів.

На основі попередніх досліджень запропонована вдосконалена модель екструдера. Розроблені рекомендації для забезпечення можливості виконання поставленої задачі в умовах виробництва.

Проведені заходи по забезпеченню охорони праці та безпечних умов роботи. Виконане техніко-економічне обґрунтування удосконалення робочого органу 3D-принтера для гранульованих матеріалів.

Використання вдосконаленої друкуючої головки, що працює на гранульованих полімерних матеріалах, має високий практичний потенціал та відкриває нові можливості для економічно ефективного та технологічно гнучкого 3D-друку. Застосування гранул замість традиційного філаменту

суттєво знижує собівартість продукції, робить друк більш доступним та дозволяє використовувати ширший спектр полімерів, включаючи рециклати.

Підвищена продуктивність екструдера, його спрощена конструкція, а також універсальність у роботі з різними типами полімерів роблять таку систему перспективною для малих виробництв, навчальних лабораторій і промислового прототипування. Незначне збільшення енергоспоживання повністю компенсується значною економією на матеріалах та зниженими експлуатаційними витратами.

Отже, впровадження даної конструкції є технічно обґрунтованим і економічно доцільним рішенням, що сприяє розвитку високоефективних та ресурсозберігаючих технологій адитивного виробництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Porsche 3D prints a complete electric drive unit housing: Веб-сайт. URL: https://insights.globalspec.com/article/15677/porsche-3d-prints-a-complete-electric-drive-unit-housing?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 10.11.2025)
2. Porsche Newsroom: 3D-друк поршнів для високопродуктивного двигуна (911 GT2 RS) із зменшеним ваговим навантаженням: Веб-сайт. URL: https://newsroom.porsche.com/en/2020/technology/porsche-cooperation-mahle-trumpf-pistons-3d-printer-power-efficiency-911-gt2-rs-21462.html?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 10.11.2025)
3. Design and Manufacturing of a Two-Stage Reduction Gearbox With 3D Printers: Веб-сайт. URL: https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/article/1206809?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 10.11.2025)
4. A parametric study of 3D printed polymer gears: Веб-сайт. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05270-5?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 10.11.2025)
5. Hypercar Maker Czingier Reveals ‘World’s First’ 3D Printed Gearbox Case. Веб-сайт. URL: https://3dprint.com/298677/hypercar-maker-czingier-reveals-worlds-first-3d-printed-gearbox-case/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 10.11.2025)
6. MicroMill 2000 Desktop Machining Веб-сайт. URL: <https://surl.li/ogffhq> (дата звернення 10.11.2025)
7. Roland Modela MDX-15 3D Milling Machine Веб-сайт. URL: <https://surl.li/lrxqwd> (дата звернення 10.11.2025)
8. Envisiontec Prefactory Веб-сайт. URL: <https://surl.lu/kqatme> (дата звернення 10.11.2025)
9. Прогресивні технології 3D друку. Конспект лекцій з елементами кредитно-трансферної системи організації навчального процесу з курсу «Прогресивні технології 3D друку» для студентів спец. 131 «Прикладна

механіка», спеціалізація «Мехатроніка, обладнання та процеси 3D друку» / Укл.: П.М. Єршомін. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 83 с.

10. Darnell W.H., Mol E.A.J. Solids Conveying in Extruders. SPE J. 1956;12:20–29.

11. Nylacast Polyacetal. Веб-сайт. URL: <https://www.nylacast.com/engineering-polymers/nylacast-polycetal> (дата звернення 24.11.2025)

12. Радченко Л.Б. Переробка термопластів методом екструзії: навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / Радченко Л.Б. – К. : ІЗМН, 1999. – 220 с.

13. Мікульонок І.О. Переробка вторинної сировини екструзією: Монографія / І.О. Мікульонок, Л.Б. Радченко. – К. : ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2006. – 184 с.

14. Корнієнко Я.М. Високоточне ресурсоощадне екструдювання полімерів / Я.М. Корнієнко, В.О. Кузьміна, М.П. Швед, Д.М. Швед // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – № 1. – С. 91–94

15. Корнієнко Я.М. Енергоефективна екструзія термопластів / Я.М. Корнієнко, А.В. Домінова, М.П. Швед, Д.М. Швед // «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 1. – С. 107–110.

16. К.М. Петренко, Д.М. Швед // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – №2. – С. 61–63.

17. Швед Д.М. Розплави полімерів. Визначення продуктивності і критичних обертів у шестеренному насосі під час їх перекачування. / Д.М. Швед, О.В. Плешко, М.П. Швед // Науково–виробничий журнал «Хімічна промисловість України». – 2014. – №2(121). – С. 43–45.

18. Швед Д.М. Продуктивність шестеренного насоса при перекачуванні розплавів полімерів / М.П. Швед, І.І. Овчарук, Д.М. Швед // Науково–виробничий журнал «Хімічна промисловість України». – 2016. – №2(133). – С. 54–57.

19. Резнік Р.Ю. Особливості і фізична модель процесів плавлення у завантажувально-пластикуючій зоні дискового екструдера / М.П. Швед, Р.Ю. Резнік, Д.М. Швед // Наукові праці Одеської національної академії

харчових технологій. – 2012. – Випуск 41. – Т. 1. – С. 176–178. ISSN 2073–8730.

20. Швед М.П. Черв'ячно-шестеренний екструдер при переробці полімерних матеріалів / Д.М. Швед, Д.А. Степанюк // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2014. – Випуск 45. – Т. 3. – С.173–175. ISSN 2073–8730.

21. Луценко І.В. Дослідження процесу плавлення полімеру при черв'ячній екструзії / І.В. Луценко, М.П. Швед, Д.М. Швед, Л.Г. Воронін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 2/7(62). – С.37–39. ISSN 1729–3774.

22. Швед Д.М. Дослідження процесу гомогенізації полімеру при черв'ячній екструзії / А.С. Богатир, М.П. Швед, Д.М. Швед, Л.Г. Воронін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 2/7(62). – С.40–42. ISSN 1729–3774.

23. Резнік Р.Ю. Визначення потужності в завантажувально-пластикуючій зоні дискового екструдера / Р.Ю. Резнік, М.П. Швед, Д.М. Швед // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – 2/7(62). – С.26–29. ISSN 1729–3774.

24. Швед Д.М. Черв'ячно-шестеренний екструдер при переробці полімерних матеріалів / М.П. Швед, Д.А. Степанюк, Д.М. Швед // Міжнародний науковий журнал «Science Rise» – 2015. – №3/2 (8) – С.31–34. ISSN 2313–6286.

25. Пат. України на корисну модель № 44266, МПК В29С 47/00. Дисковий екструдер / Н.В. Мурдід, І.О. Мікульонок, М.П. Швед, Д.М. Швед // Заявник та патентотримувач Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200904334; заявл. 30.04.2009; опубл. 25.09.2009. Бюл. №18.

26. Пат. України на корисну модель № 60000, МПК В29С 47/00. Дисковий екструдер / І.О. Мікульонок, М.П. Швед, С.В. Сафонов, Д.М. Швед // Заявник та власник Мікульонок І.О. – № u201013199; заявл. 08.11.2010; опубл. 10.06.2011. Бюл. №11.

27. Пат. України на корисну модель № 94012, МПК В29С 47/00. Каскадний екструдер / Р.О. Мітусов, Д.М. Швед, М.П. Швед.// Заявник та власник Мітусов Р.В. – № u201404891; заявл. 07.05.2014; опубл. 27.10.2014. Бюл №20.

28. Плешко О.В. Ресурсоенергоощадний каскадний екструдер для переробки полімерних матеріалів / О.В. Плешко, М.П. Швед, Д.М. Швед // Зб. тез доп. IV Міжнародної конференції «Иновационные энерготехнологии». (11–13 вересня 2013р.). – Одеса: ОНАХТ, 2013. – С. 70–72.

29. Швед Д.М. Каскадна екструзія термопластичних, біополімерних, резинових і композиційних матеріалів / С.В. Сафонов, Г.В. Домінова М.П. Швед, Д.М. Швед // Зб. тез доп. XIII Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологія. Людина. Суспільство». (19-23 травня 2010 р).– К.: НТУУ «КПІ», 2010. – С. 276–277.

30. Швед Д.М. Особливості високоточної екструзії полімерів / С.В. Сафонов, М.П. Швед, Д.М. Швед, Г.В. Домінова // Зб. тез доп. XIII Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологія. Людина. Суспільство». (19–23 травня 2010 р).– К.: НТУУ «КПІ», 2010. – С. 273–275

31. Домінова Г.В. Енергоефективна екструзія термопластів / М. П. Швед, Д.М. Швед, Г.В. Домінова, С.В. Сафонов // Зб. тез доп. XIV Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологія. Людина. Суспільство». (18–22 травня 2011). – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – С. 168–169.

32. Резнік Р.Ю. Каскадна екструзія полімерів / Р.Ю. Резнік, Д.М. Швед, М.П. Швед // Зб. тез доп. Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. «Ресурсозберігаючі технології та обладнання». (1–4 листопада 2011).– К.: НТУУ «КПІ», 2011. – С. 13–14.

33. Плешко О.В. Тенденції розвитку екструзійного обладнання для переробки полімерів / М.П. Швед, Д.М. Швед, О.В. Плешко // Зб. тез доп.

III Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». (12–13 грудня 2012). – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – С. 29–30.

34. Швед Д.М. Порівняння каскадної дисково-шестеренної і дисково-червячної екструзії. / Р.О. Мітусов, М.П. Швед, Д.М. Швед // Зб. тез доп. VIII Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання». (19–20 квітня 2015). – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – С. 15–16.

35. Радченко Л. Б. Применение и моделирование червячных экструдеров как реакторов / Л. Б. Радченко, В. А. Новик, С. О. Пристайлов // Труды Одесского политехн. университета : научн.-произв.-практ. сб. : Одесса, 2002. — С. 79—80.

36. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів //Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 40 с.