

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інженерно-хімічний факультет
Кафедра хімічного полімерного і силікатного машинобудування**

«На правах рукопису»
УДК [678.027.3+678.057.3]

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
О.Л.Сокольський
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” 2024 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології
проектування інноваційного галузевого обладнання»
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
на тему: «Агрегат для друку лопатей з модернізацією 3D-прінтера»**

Виконав:
студент II курсу, групи ЛП-31мп
Дорофєєва Аліна Олександрівна

Науковий керівник:
к.т.н., проф. Сівецький Володимир Іванович

Консультант з ТМ та Е
ст. викл. Борщик Сергій Олександрович

Консультант з модернізації
д.т.н., проф. Щербина Валерій Юрійович

Консультант зі стартап-проєкту
к.е.н., доц. Юдіна Наталія Володимирівна

Рецензент:
д.т.н., доц. Сокольський Олександр Леонідович

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інженерно-хімічний факультет
Кафедра хімічного полімерного і силікатного машинобудування
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність – 133 «Галузеве машинобудування»
Освітньо-професійна програма «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані
технології проектування інноваційного галузевого обладнання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр СОКОЛЬСЬКИЙ

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Дорофєєвій Аліні Олександрівні

1. Тема дисертації «Агрегат для друку лопатей з модернізацією 3D-прінтера», науковий керівник дисертації Сівецький Володимир Іванович, затверджені наказом по університету від «08» листопада 2024 р. № 5029-с
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження: агрегат для друку лопатей з 3D-прінтером.
4. Вихідні дані: продуктивність екструдера 5 кг/год; початкова температура матеріалу 25°C; кінцева температура матеріалу 210°C; температура сопла 220°C; температура повітря 22°C; діаметр шнека 36 мм; довжина шнека 1200 мм; матеріал обробки — PLA і PETG; потужність двигуна екструдера 8 кВт; потужність нагрівачів 2,5 кВт; габарити сопла — діаметр вихідного отвору 0,8 мм; площа приміщення 60 м²; об'єм приміщення 300 м³.
5. Обґрунтувати актуальність теми дослідження та визначити об'єкт і предмет розробки. Визначити призначення та галузь застосування агрегату для друку лопатей з модернізацією 3D-прінтера. Надати опис конструкції та технічні характеристики базового обладнання. Провести літературно-патентний аналіз для вибору оптимальних варіантів модернізації агрегату та 3D-прінтеру. Розробити обґрунтування двох варіантів модернізації агрегату та 3D-прінтеру. Виконати аналітичні розрахунки (кінематичний, параметричний, тепловий, міцнісний). Підготувати спеціальні розділи, зокрема: Монтаж та експлуатація. Розробка стартап-проєкту. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Розробити 3D-моделі базового та модернізованого сопла та черв'яка екструдера,

визначити критичні параметри, що впливають на працездатність модернізованих вузлів та деталей. Здійснити оцінку очікуваних механіко-економічних показників та підготувати висновки.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: технологічна схема лінії виробництва лопатей (A1); загальний вигляд черв'ячної машини (A1); Креслення 2 вузлів установки (2xA1); креслення модернізованих вузлів (2xA1); плакати 3D-моделей модернізованих вузлів (2xA1); плакат результатів числового моделювання з використанням 3D моделей модернізованого і базового вузлів, зіставлення результатів (A1).

7. Орієнтовний перелік публікацій: 3 тези.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Монтаж і експлуатація	Борщик С.О., ст. викл.		
Модернізація	Щербина В.Ю., проф.		
Стартап-проект	Юдіна Н.В., доц.		

9. Дата видачі завдання: 02.09.24

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Обґрунтування актуальності та визначення об'єкту та предмету розробки; призначення та галузь застосування екструдера; опис лінії; технічна характеристика базового обладнання – двочерв'ячного екструдера та 3D-прінтера	20.11.24	
2	Літературно-патентний пошук модернізації системи термостабілізації екструдера; обґрунтування двох модернізацій агрегату та 3D-прінтеру	28.11.24	
3	Аналітичні розрахунки	5.12.24	
4	Спеціальні розділи	8.12.24	
5	Розробка 3D-моделі базового і модернізованого вузла агрегату та 3D-прінтеру	11.12.24	
7	Висновки	15.12.24	

Студент

Аліна ДОРОФЄЄВА

Науковий керівник

Володимир СІВЕЦЬКИЙ

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ

D – діаметр черв'яка, мм;
 l_p – загальна (робоча) довжина черв'яка, мм;
 l_z – довжина зони завантаження черв'яка, мм;
 l_d – довжина зони дозування черв'яка, мм;
 l_{π} – довжина зони пластикації черв'яка, мм;
 t – крок нарізки витків, мм;
 e – ширина витка, мм;
 h_1 – глибина нарізки в зоні завантаження, мм;
 h_2 – глибина нарізки в зоні дозування, мм;
 δ – зазор між гребнем черв'яка і корпусом, мм;
 ρ – густина, кг/м³;
 n – частота обертання черв'яка;
 P – тиск розплаву, МПа;
 η – ККД розплаву;
 Q – продуктивність, кг/год;
 E – модуль пружності, МПа;
 σ_t – границя текучості, МПа;
 ν – коефіцієнт Пуассона.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВИРОБНИЦТВА ЛОПАТЕЙ ВИКОРИСТАННЯМ 3D-ПРІНТЕРОМ.....	3
2 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОГО ОБЛАДНЕННЯ	11
3 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД, ПАТЕНТНИЙ ПОШУК.....	12
4 ОБГРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ АГРЕГАТУ ТА 3D-ПРІНТЕРА	39
5 РОЗРАХУНКИ	43
5.1 Параметричні розрахунки черв'яка.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.2 Розрахунок коефіцієнта геометричної форми каналів головки	Ошибка! Закладка не определена.
5.3 Розрахунок продуктивності одночерв'ячної машини.....	46
5.4 Розрахунок перепаду тиску в екструзійній головці	50
5.5 Розрахунок потужності приводу черв'яка екструдера.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.6 Розрахунок черв'яка на міцність	Ошибка! Закладка не определена.
5.7 Тепловий розрахунок екструдера без модернізації.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.8 Тепловий розрахунок модернізованого екструдера.....	Ошибка! Закладка не определена.
6 СПЕЦІАЛЬНІ РОЗДІЛИ	63
6.1 Монтаж і експлуатація	63
6.1.1 Технологія збирання корпусу.....	63
6.1.2 Монтаж екструдера	68
6.1.3 Змащення машини.....	71
6.2 Стартап	Ошибка! Закладка не определена.

		6.2.1 Опис ідеї проекту	Ошибкa! Закладка не определена.		
			ЛПЗІМН.057246.000-70		
Змн.	Арк.	6.2.2 Технологічний аудит проекту.....	Ошибкa! Закладка не определена.		
Розробив	Домашня А.	Агрегат для друку лопатей із модернізацією 3D-прінтера	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірив	Сівецький В.				
Затвердив	Сокольський О.				

КПІ ім. Ігоря
СІКОРСЬКОГО

6.2.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту
..... **Ошибка! Закладка не определена.**

6.2.4 Розроблення ринкової стратегії проекту**Ошибка! Закладка не определена.**

6.2.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.**Ошибка! Закладка не определена.**

6.3 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	97
6.3.1 Електробезпека.....	98
6.3.2 Повітря робочої зони	99
6.3.3 Виробничий шум.....	100
6.3.4 Освітлення на робочих місцях	102
6.3.5 Пожежна безпека.....	103
7 АНСІС.....	106
7.1 Розробка 3D-моделей базової та модернізованої деталі та вузла.....	106
7.2 Числовий аналіз базової та модернізованої с деталі та вузла. Критичні параметри, що визначають працездатність вузлів.	107
7.3 Оцінка достовірності результатів числового моделювання НДС черв'яків екструдера.....	108
7.4 Висновки про працездатність модернізованої конструкції деталі та вузла	109
8 ОЧІКУВАНІ МЕХАНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ	110
ВИСНОВКИ.....	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	114
ДОДАТОК А. Патенти використані для модернізації черв'яка екструдера та сопла 3D-прінтера	118
ДОДАТОК Б. Специфікації	121
ДОДАТОК В. Публікації за темою дисертації	125

ВСТУП

Відновлювана енергетика сьогодні відіграє ключову роль у вирішенні глобальних екологічних та енергетичних викликів. Вітрові генератори, як одна з найбільш перспективних технологій, вимагають виготовлення високотехнологічних і довговічних компонентів, зокрема лопатей. Однак традиційні методи їхнього виробництва мають значні недоліки, такі як висока вартість, значні витрати матеріалів та обмеження у створенні складних геометричних форм. Це обмежує розвиток галузі та стримує впровадження інноваційних рішень.

Сучасні 3D-принтери мають потенціал для вирішення цих проблем, забезпечуючи можливість друку складних конструкцій з мінімальними втратами матеріалів. Однак використання стандартного обладнання для виготовлення великих та міцних лопатей залишається обмеженим через низьку продуктивність, недостатню потужність екструдерів, обмежений вибір матеріалів і значні теплові втрати. Також важливою проблемою є забезпечення необхідної механічної міцності та стійкості конструкцій до динамічних навантажень, які виникають під час експлуатації лопатей у складних умовах.

Ця магістерська робота спрямована на подолання зазначених проблем шляхом модернізації 3D-принтера для друку лопатей вітрових турбін. Основними завданнями є покращення продуктивності, зменшення енергетичних втрат, оптимізація конструкції екструзійної системи та забезпечення можливості використання багатокomпонентних матеріалів. Для досягнення цих цілей виконано розрахунки конструктивних параметрів, теплових характеристик та міцності системи, що дозволяє створити ефективний та екологічно стійкий агрегат для адитивного виробництва.

Результати роботи мають практичне значення для вдосконалення технологій виготовлення компонентів вітрових турбін, що сприятиме подальшому розвитку відновлюваної енергетики.

Виробництво лопатей ґрунтується на таких головних процесах: гранулювання 1, сушіння гранул 2, змішування 3, екструзія філамента 4 і друк 8. Другорядні процеси спрощують завдання, прискорюють хід роботи і сприяють екологічності та економії в процесі створення лопатей. До них відносяться: сушіння філамента 5, намотування філамента на котушку 6, складування заздалегідь підготовленого філамента 7, переробка залишкових матеріалів для вторинного використання 9, 10 і 11. Останній етап – перенесення готової лопаті на склад 12.

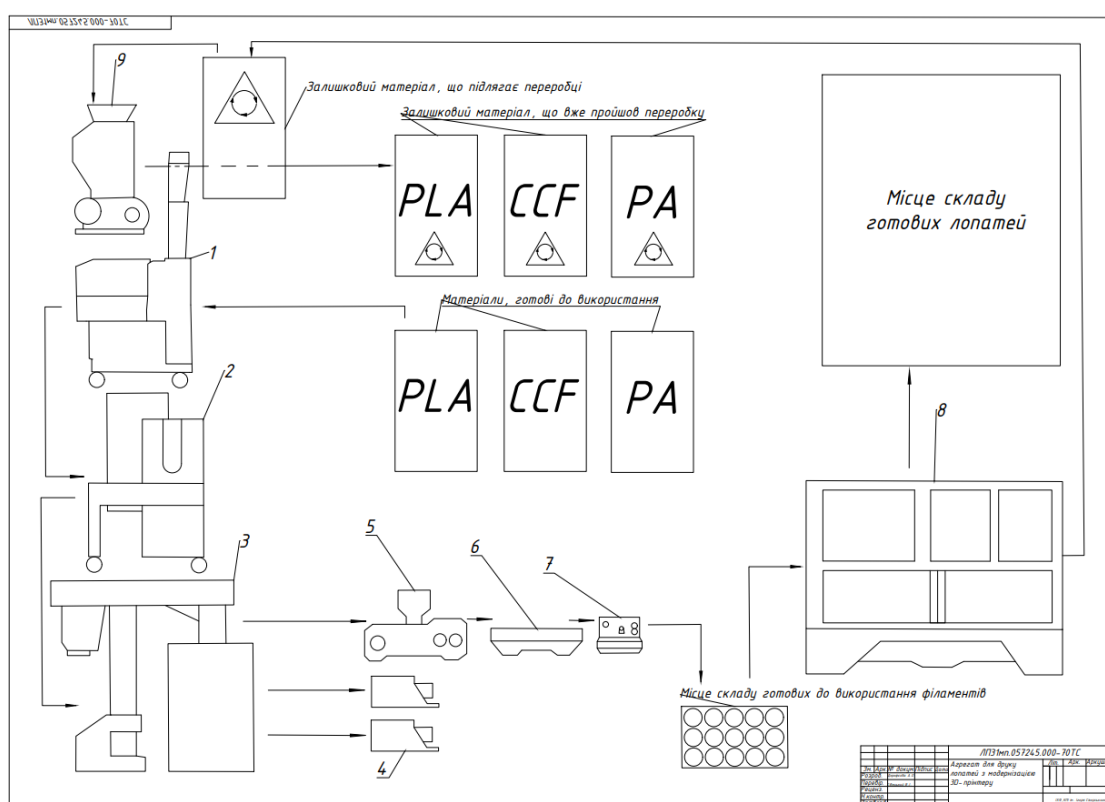


Рисунок 2.1 – Технологічна лінія для виробництва лопатей із використанням 3D-прінтеру:

1 – гранулятор; 2 – сушарка для гранул; 3 – міксер; 4 – екструдери; 5 – екструдер із триступеневою екструзією; 6 – сушилка для філаменту; 7 – намотувач для філаменту; 8 – 3D-принтер; 9 – регенератор.

Початковий перероблений матеріал подається у гранулятор 1, де його подрібнюють і формують у гранули необхідного розміру. Гранули після грануляції проходять сушку у сушарці для гранул 2 для видалення вологи, щоб забезпечити оптимальні умови для подальшого використання. Висушені гранули потрапляють до міксера 3, де їх змішують із армуючими волокнами або іншими добавками для поліпшення міцності. Суміш подають в екструдери 4 та екструдер із триступеневою екструзією 5, який розплавляє матеріал і формує філамент для 3D-принтера. Отриманий філамент протягують над сушилкою для філаменту 6 та намотують на котушки за допомогою намотувача 7 і транспортують до зони 3D-друку. Філамент завантажується в 3D-принтер 8, який формує лопать шляхом пошарового нанесення. Принтер створює ядро лопаті із PLA для забезпечення міцності і легкості конструкції. Після основи наноситься армуючий шар із CCF для підвищення стійкості до навантажень. Завершальний захисний шар із термопластику PA забезпечує додатковий захист від зовнішніх впливів. Поки свіжонадруковані лопаті остигають до температури, за якої їх буде безпечно транспортувати на склад, відбувається робота із залишковими матеріалами. Частини філаменту, що залишилися після виробництва, переносяться в регенератор 9 і готуються до вторинного використання.

Готові лопаті переміщують до складу із зоною охолодження для досягнення стабільної температури для подальшого використання або відправки.

2 ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОГО ОБЛАДНЕННЯ

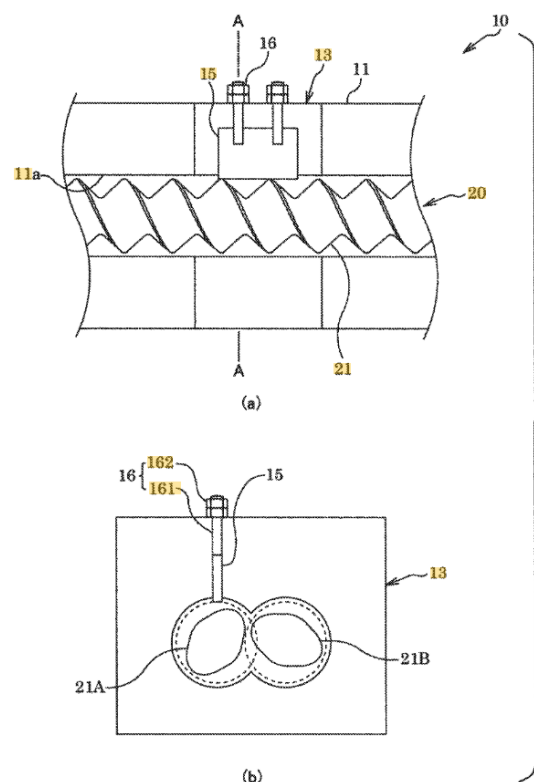
Таблиця 2.1 – Технічна характеристика одночерв'ячного екструдера

Параметр	Значення
Діаметр черв'яка	36 мм
Довжина черв'яка	1200 мм
Матеріал обробки	PLA і ABS
Потужність двигуна	8 кВт
Потужність нагрівачів	2,5 кВт
Продуктивність	5 кг/год
Початкова температура матеріалу	25°C
Кінцева температура матеріалу	210°C
Температура сопла	220°C
Температура повітря	22°C

3 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД, ПАТЕНТНИЙ ПОШУК

3.1 Патентний пошук для модернізації шнека екструдера

Патент US20210138711A1 пропонує високотехнологічний підхід до екструзії полімерів, особливо орієнтуючись на матеріали, які потребують високих температур для досягнення потрібної пластичності. Цей екструдер розроблений з урахуванням обробки термостійких матеріалів, таких як РЕЕК (полієфірефіркетон), що відомий своєю високою температурною стійкістю і широко застосовується в галузях, які вимагають міцності та стабільності під високим навантаженням. Основною конструктивною особливістю патенту є система охолодження, яка допомагає підтримувати температури понад 300°C, забезпечуючи рівномірне розплавлення матеріалу та уникнення температурних коливань.

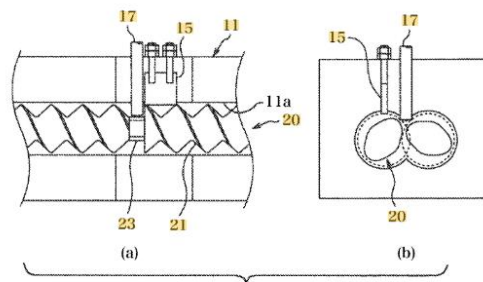


Патент US20210138711A1 пропонує екструдер, оснащений термостійкими матеріалами для ізоляції температурних зон, а також спеціальними нагрівальними елементами, які розміщені вздовж шнека і корпусу екструдера. Ця конструкція гарантує підтримання стабільної високої температури протягом

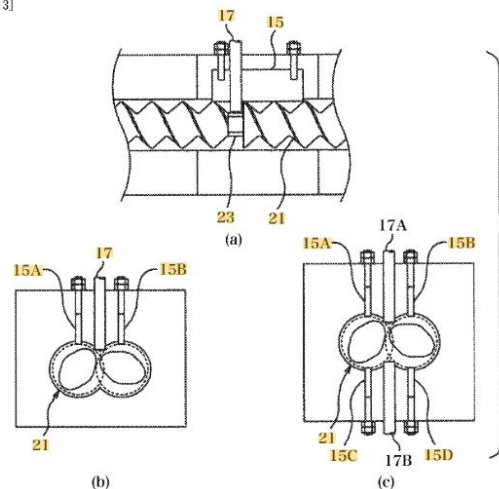
всього процесу екструзії, що дозволяє створювати однорідну структуру термостійких полімерів без ризику різких змін температури, що може викликати нерівномірне розплавлення або розшарування матеріалу.

Система охолодження представлена у вигляді комплексного циркуляційного механізму, який забезпечує охолодження тільки на певних ділянках екструдера. Такий підхід забезпечує точний контроль температури в місцях, де матеріал вже формований, але ще потребує додаткового зміцнення. Це дозволяє уникнути перегріву і забезпечує стабільність форми виробу при збереженні основних параметрів.

[FIG. 2]



[FIG. 3]



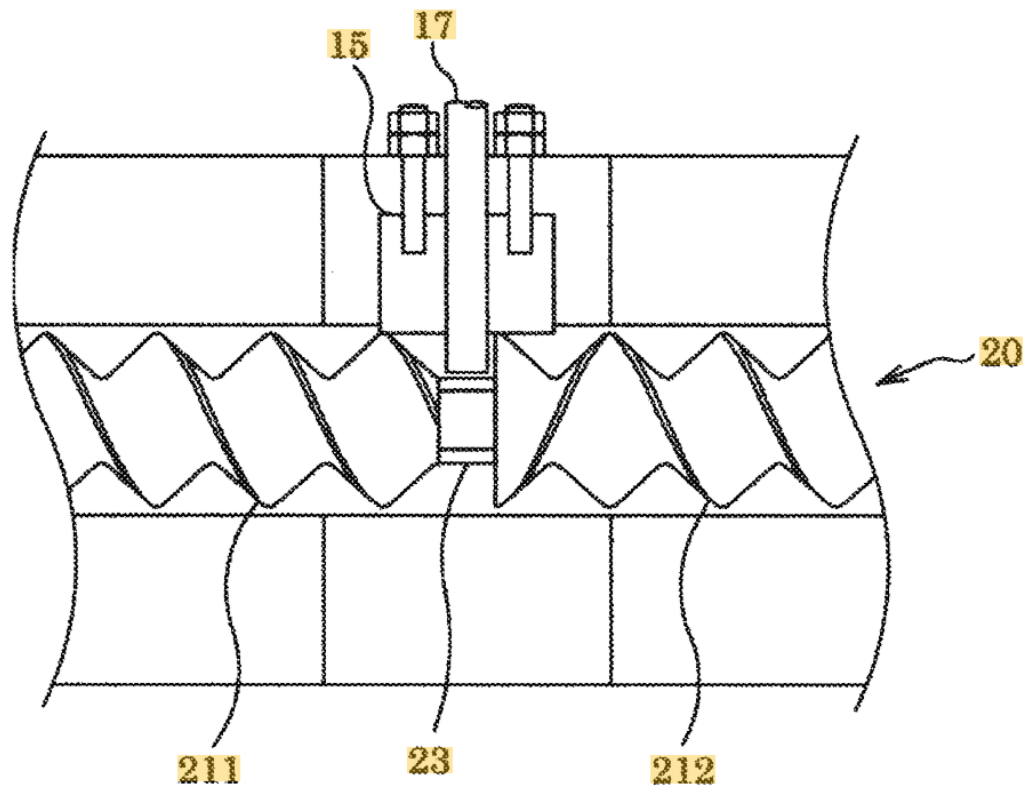
Система, представлена у патенті, орієнтована на використання полімерів, стійких до високих температур, таких як PEEK, PPS (поліфеніленсульфід) та інші матеріали з подібними властивостями. Основна ціль використання цього екструдера — матеріали, які можуть витримувати робочі температури понад 300°C і які піддаються екструзії лише за таких умов. Для підтримки стабільної роботи екструдера застосовуються матеріали, що мають високу теплопровідність, а також термостійкі сплави для корпусу, що дозволяють

підтримувати стабільність при тривалих сеансах екструзії на високих температурах.

PLA (полілактид), з іншого боку, є матеріалом з набагато нижчою температурою розм'якшення, що складає близько 180-200°C. Через низьку термостійкість PLA цей екструдер є неефективним для такого матеріалу, оскільки система не може підтримувати контрольовану низьку температуру, яка є критичною для уникнення перегріву та зберігання структури PLA. Крім того, система охолодження, розроблена для роботи на високих температурах, не призначена для швидкого зниження температури, що може спричинити нерівномірне охолодження PLA.

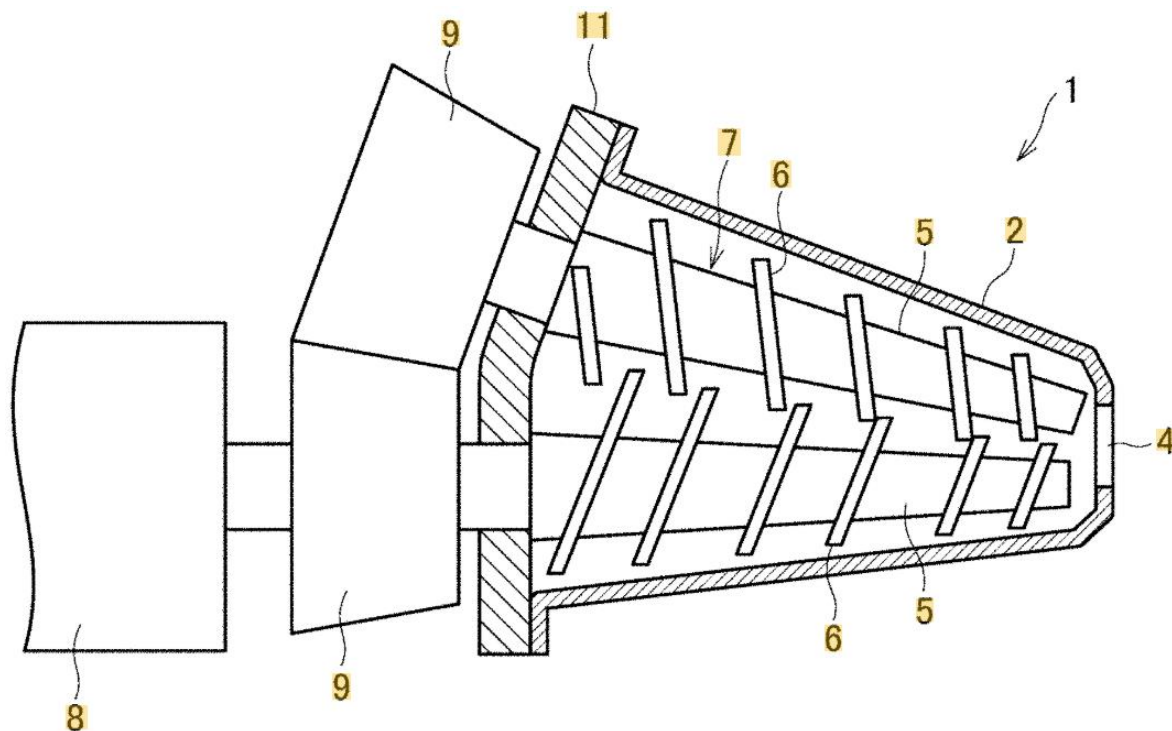
Оскільки PLA має температурну стійкість значно нижчу, ніж PEEK, високотемпературні компоненти цього екструдера є надлишковими для PLA і не можуть забезпечити стабільну роботу з ним. Високий діапазон температур призводить до ризику перегріву PLA, що може спричинити зменшення його механічних властивостей або навіть його розкладання. Конструкція патенту передбачає надмірну ізоляцію і теплові бар'єри, що додатково ускладнює роботу з PLA, для якого потрібен швидкий контроль температур на низькому рівні.

З огляду на ці недоліки, адаптація цього екструдера для PLA потребувала б заміни системи нагріву та охолодження, щоб знизити температури до 180-200°C, а також забезпечити більш плавне охолодження. Однак такі зміни могли б значно змінити саму суть екструдера, роблячи його менш ефективним для початкової цілі — екструзії високоміцних полімерів.



Патент US20210138711A1 не підходить для роботи з PLA через його орієнтацію на високотемпературні матеріали. PLA потребує набагато нижчих температур для ефективної обробки, що робить цей екструдер недостатньо гнучким для роботи з PLA.

Патент US20220001590A1 орієнтований на екструзію композитних матеріалів, включаючи армовані полімери, які містять добавки, такі як скловолокно або вуглецеве волокно. Основна мета цього екструдера — забезпечити рівномірну структуру та міцність матеріалу шляхом змішування і дозування компонентів при високих температурах та тиску. Ця система добре підходить для обробки високоміцних композитів, які використовуються в галузях, що вимагають міцності та довговічності, як-от автомобільна та авіаційна промисловість.



Однією з головних особливостей екструдера, описаного в цьому патенті, є двоступенева система подачі, яка включає додатковий шнековий механізм для стабілізації тиску та забезпечення рівномірної подачі матеріалу. Такий механізм дозволяє змішувати компоненти полімеру та армувальних добавок у процесі екструзії, що забезпечує однорідну текстуру матеріалу на виході. Крім того, для цього екструдера розроблено спеціальну систему контролю температур, яка підтримує стабільну високу температуру в процесі подачі матеріалу, але не передбачає швидкого зниження температури, що важливо для матеріалів з низькою температурою розм'якшення.

Для забезпечення міцності екструдера його корпус виготовлений із зносостійких матеріалів, стійких до високого тиску та температур, оскільки екструдер повинен витримувати довготривалу дію в умовах високих навантажень. Окрім цього, екструдер оснащений додатковими теплоізоляційними елементами для зменшення тепловтрат, що сприяє більш ефективному витрачання енергії при екструзії армованих полімерів.

Fig.1

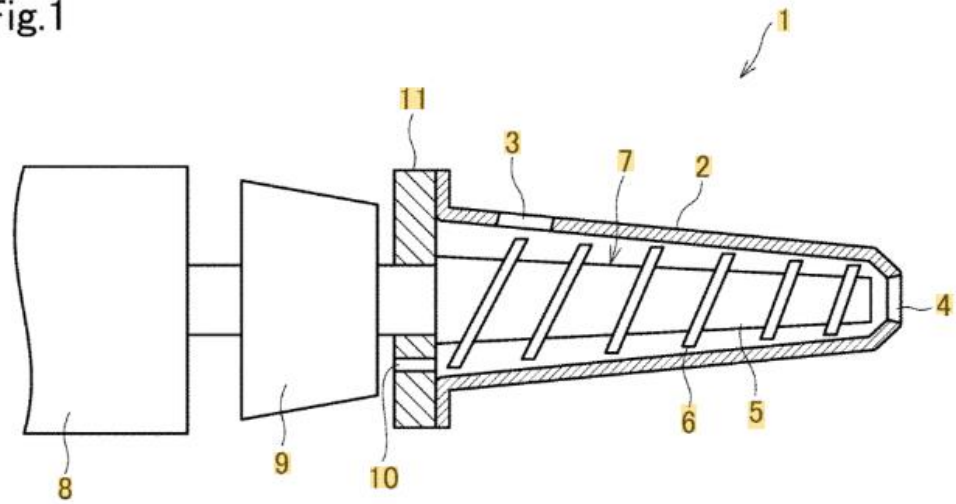
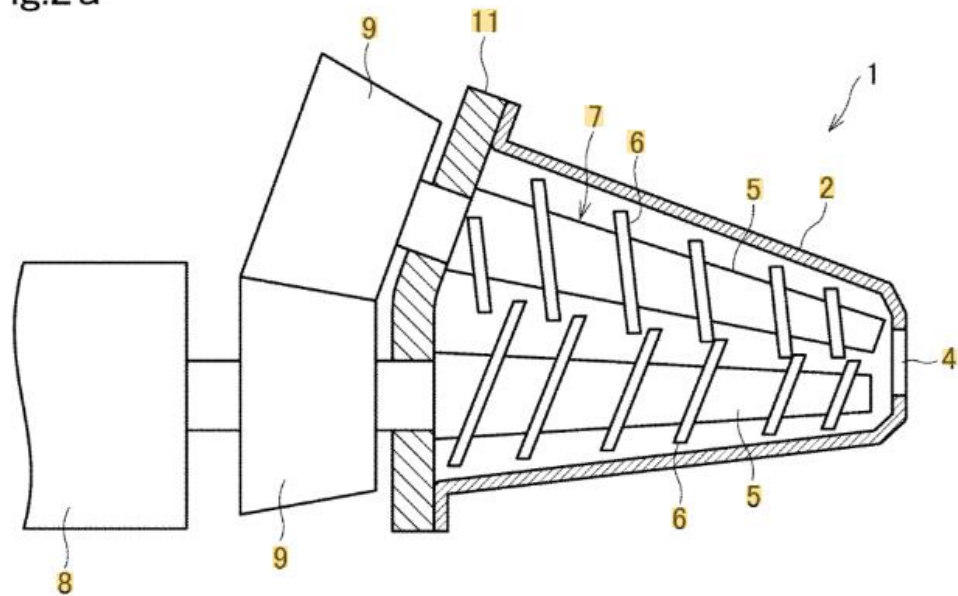


Fig.2 a



Цей екструдер найкраще підходить для роботи з високов'язкими матеріалами, зокрема з композитами на основі поліаміду, полікарбонату, а також інших полімерів, що потребують додаткового зміцнення армуванням. Вони витримують високі температури і тиск, що дозволяє екструдеру забезпечувати належну структуру виробу з підтримкою стабільної однорідності. З іншого боку, PLA не є придатним матеріалом для такої конструкції екструдера, оскільки він має низьку в'язкість і плавиться при набагато нижчих температурах — близько 180-200°C.

Використання PLA в екструдері, призначеному для композитних матеріалів, спричиняє низку проблем. Перш за все, система подачі, що орієнтована на високов'язкі матеріали, створює надмірний тиск, що може призвести до нерівномірної подачі PLA та його деформації у процесі екструзії. Також підтримка високих температур, необхідних для змішування армованих компонентів, є надлишковою для PLA і може спричинити його перегрів або навіть розкладання.

Основний недолік цього екструдера для PLA полягає в тому, що його конструкція не забезпечує ефективного контролю температур нижче 200°C, які є критичними для стабільності PLA. Додатковий шнековий механізм подачі також виявляється надмірним для PLA, що характеризується меншою в'язкістю порівняно з армованими композитами. Через це виникає ризик нерівномірного розподілу PLA по довжині шнека, що може спричинити проблеми з рівномірністю виробу.

Fig. 5

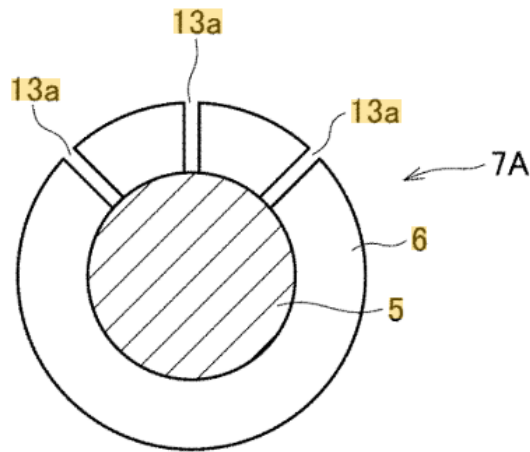
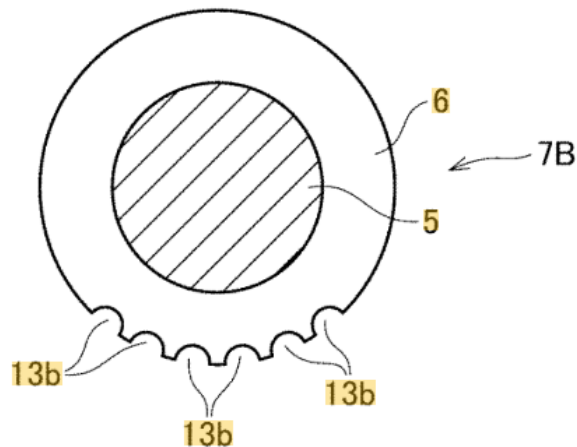


Fig. 6

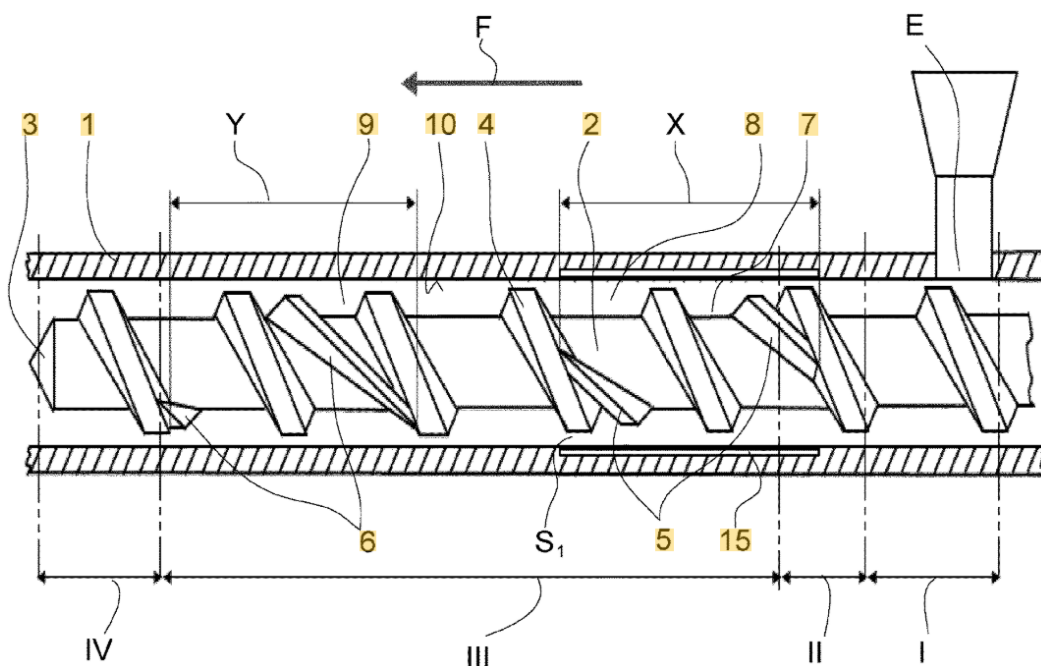


Додатково, наявність системи ізоляції для підтримання високих температур призводить до надмірної витрати енергії при роботі з PLA, що знижує ефективність екструдера та підвищує витрати на виробництво. Через це потрібна модернізація системи нагріву і подачі матеріалу для роботи з PLA, що суттєво змінює основні конструктивні особливості екструдера та його робочі параметри.

Патент US20220001590A1 не є оптимальним для екструзії PLA, оскільки система подачі та контролю температури розроблені для високов'язких матеріалів, що потребують високих температур та тиску. PLA має значно нижчу температуру плавлення, що робить цей екструдер надмірно потужним для такого матеріалу. Використання екструдера, орієнтованого на композити, не

відповідає потребам PLA, що обмежує можливість його ефективного використання без значної модернізації.

Патент US20230046870A1 розроблений для екструзії матеріалів, які вимагають високих температур і стабільної теплової підтримки під час обробки. В основі його функціональності лежить концепція додаткового локального нагрівання, що дозволяє підвищити температуру на конкретних ділянках шнека для більш ефективного плавлення і формування термостійких полімерів. Система була створена з орієнтацією на полімери, такі як поліаміди та полікарбонати, які потребують температур понад 250°C для належного розплавлення та стабільної екструзії. Такий підхід дозволяє екструдеру підтримувати однорідність матеріалу навіть при обробці на високих температурах.



Однією з ключових конструктивних особливостей цього екструдера є наявність додаткового нагрівального елемента, який розташований у центральній частині шнека. Такий елемент дозволяє підтримувати локальне підвищення температури саме в тих точках, де матеріал має бути максимально розплавлений. Це сприяє однорідному розплавленню термостійких полімерів, які потребують високих температур, і забезпечує стабільність при екструзії матеріалів зі складною структурою.

Конструкція охолоджувальної системи екструдера в цьому патенті розрахована на поступове зниження температури, необхідне для забезпечення контролю над формою готового виробу. Однак ця система охолодження не є достатньо гнучкою для швидкого зниження температур, що робить її неефективною для роботи з полімерними матеріалами з низькими температурами плавлення, такими як PLA. Охолодження в цьому екструдері більше орієнтоване на підтримку стабільної температури при високих температурах, а не на швидке її зниження.

Екструдер, представлений у патенті, призначений для роботи з поліамідами, полікарбонатами та іншими термостійкими матеріалами, що потребують високих температур і стабільного термічного середовища. Ці матеріали використовуються в галузях, де потрібна стійкість до температурних коливань, наприклад, в автомобільній і авіаційній промисловості. Основною перевагою цього екструдера є його здатність працювати на температурах понад 250°C, що дозволяє досягати високої продуктивності при екструзії полімерів, що вимагають інтенсивного нагрівання.

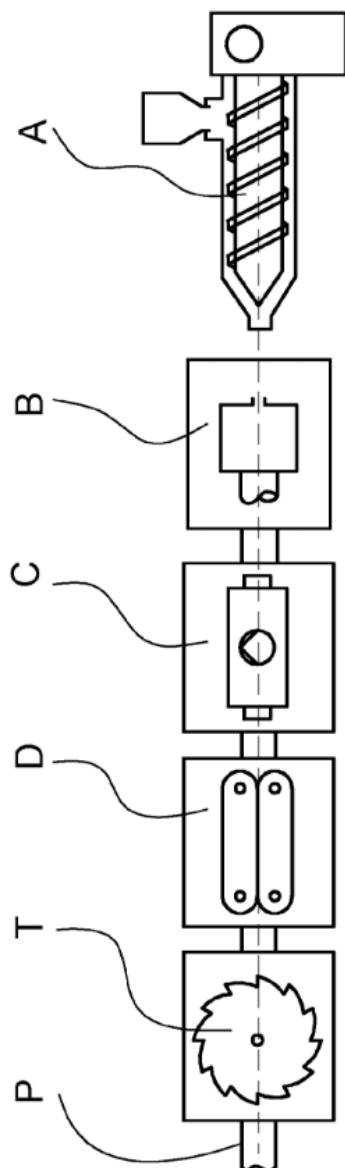


Fig. 1

На відміну від термостійких полімерів, PLA є матеріалом з низькою температурною стійкістю, що плавиться при набагато нижчих температурах (близько 180-200°C). Через це використання PLA у цьому екструдері є не вигідним, оскільки система локального нагрівання не передбачає належного контролю за низькими температурами. Висока температура може спричинити швидке розплавлення PLA з подальшим перегрівом, що призводить до зниження міцності та якості готового виробу.

Однією з основних проблем використання екструдера US20230046870A1 для PLA є його орієнтація на високу температуру та система нагрівання, яка забезпечує тільки локальний контроль. Для PLA такий підхід не є доцільним, оскільки цей полімер потребує рівномірного нагрівання при нижчих

температурах. Локальне підвищення температури може призвести до неоднорідного розплавлення PLA, що суттєво знижує якість виробу і може спричинити його деформацію під час охолодження.

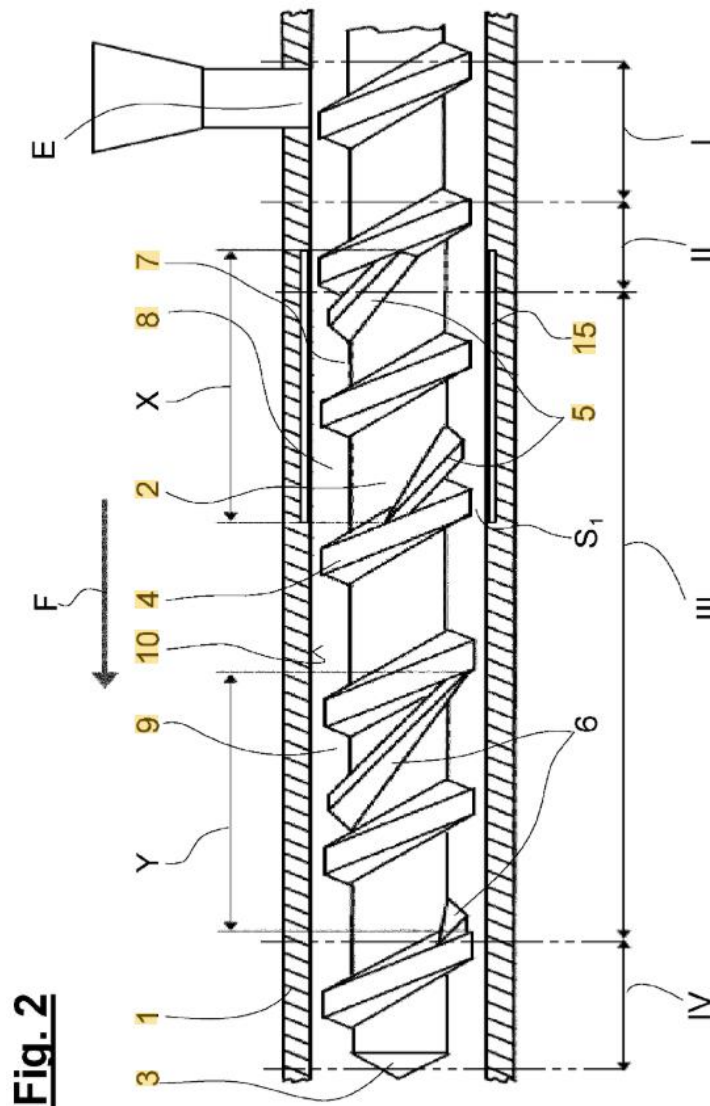


Fig. 2

Також система охолодження екструдера не забезпечує швидкого і рівномірного зниження температури, що є важливим для роботи з PLA. Висока температура, яка підтримується протягом усього процесу, ускладнює можливість створення рівномірного температурного середовища для PLA. Це створює додаткові труднощі в контролі процесу екструзії і може призвести до збільшення часу охолодження, що негативно впливає на продуктивність.

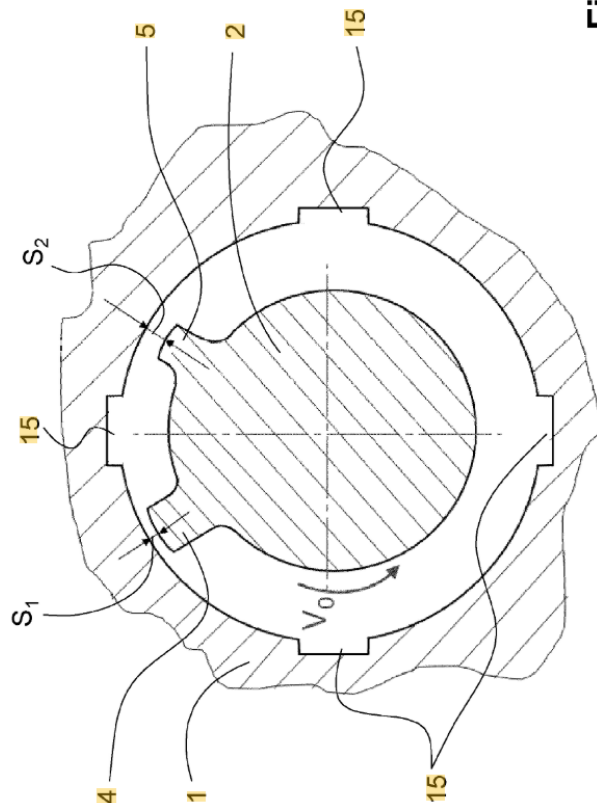
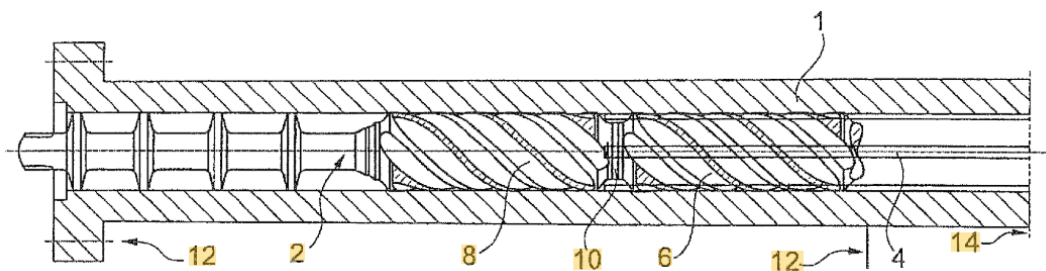


Fig. 4

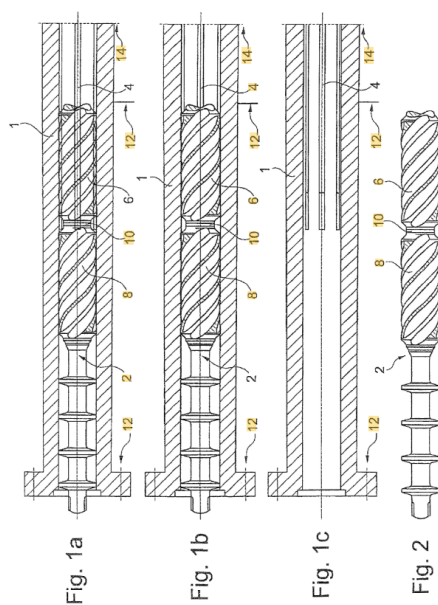
Патент US20230046870A1 не підходить для роботи з PLA через його конструктивну орієнтацію на високотемпературні матеріали та відсутність ефективної системи контролю низьких температур. Локальне нагрівання і система охолодження, що не дозволяє швидко знижувати температуру, є надмірними для PLA, який вимагає значно нижчих і стабільніших температур для досягнення якісного екструдювання.

Патент US9156201B2 описує екструдер з подвійним шнеком, призначений для обробки багатокомпонентних термопластів. Основна мета розробки цього пристрою полягає в створенні системи, яка дозволяє підтримувати високу продуктивність при обробці складних полімерних матеріалів, що містять кілька компонентів з різними властивостями. Завдяки наявності подвійного шнека цей екструдер може забезпечувати більш рівномірну подачу та змішування матеріалів, що особливо важливо для складних термопластів.



Такий екструдер є популярним у промисловості, де потрібна висока продуктивність, оскільки він дозволяє швидше обробляти великі об'єми матеріалів з різними фізико-хімічними характеристиками. Подвійний шнек не тільки покращує рівномірність розплавлення, але і дозволяє створювати вироби з полімерів, які вимагають високої стійкості до температурних і механічних навантажень.

Подвійний шнек є основною особливістю конструкції, що дозволяє цьому екструдеру ефективно змішувати компоненти матеріалу. Кожен шнек відповідає за певний рівень подачі та забезпечує стабільний рух матеріалу вздовж екструдера. Цей механізм особливо підходить для роботи з високоміцними полімерними сумішами та забезпечує ефективне змішування компонентів, уникнення розшарування, що може виникати при екструзії матеріалів з різними властивостями. Завдяки цьому забезпечується однорідність отриманого виробу.



Температурний контроль у цьому екструдері налаштований на широкий діапазон значень, оскільки він повинен відповідати вимогам матеріалів з

високою температурною стійкістю. Система нагріву розташована вздовж шнеків, що забезпечує рівномірне нагрівання полімеру. Однак система охолодження розрахована на стабілізацію при високих температурах і не дозволяє швидко знизити їх до рівнів, необхідних для матеріалів з низькою температурою плавлення, таких як PLA.

Екструдер, представлений у патенті US9156201B2, призначений для роботи з полімерними сумішами, що вимагають рівномірного змішування компонентів і високих температур для досягнення належної текучості. Цей підхід є корисним для високоміцних полімерів, які містять домішки для зміцнення матеріалу, наприклад, скловолокно або вуглецеві волокна. Такі полімери зазвичай використовуються в умовах, які вимагають стійкості до зносу, ударних навантажень та високих температур.

На відміну від цих високоміцних полімерів, PLA є матеріалом з низькою в'язкістю і потребує набагато нижчих температур для плавлення. Використання PLA в цьому екструдері створює ряд труднощів, оскільки його низька в'язкість у поєднанні з подвійним шнековим механізмом може спричинити нерівномірний розподіл матеріалу вздовж шнека, що призводить до зниження якості готового виробу. Крім того, PLA не вимагає інтенсивного змішування, оскільки є однокомпонентним полімером, і подвійний шнек стає надлишковим для його обробки.

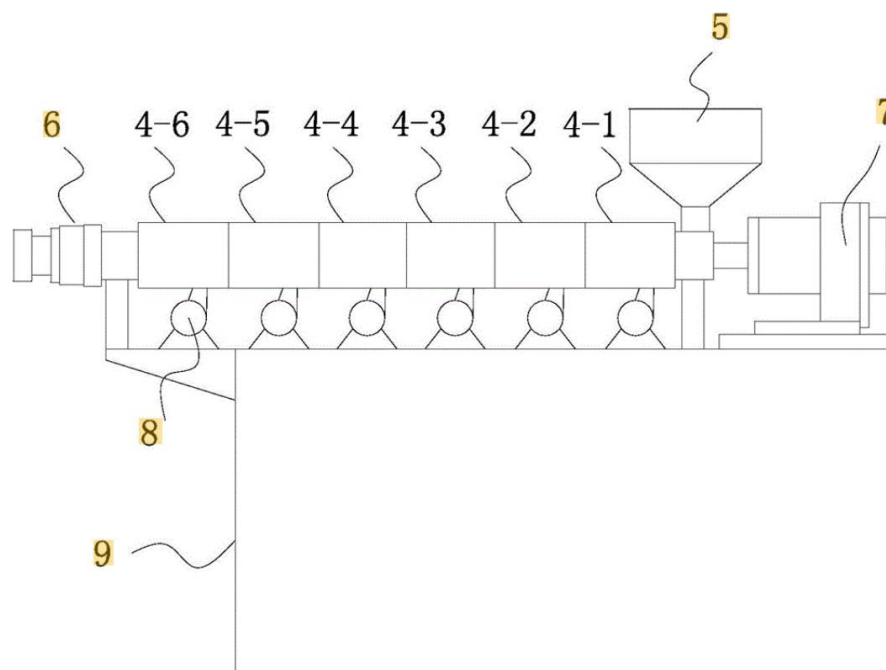
Основним недоліком екструдера US9156201B2 для PLA є його орієнтація на високу продуктивність та високу температуру, що робить його непридатним для матеріалів з низькою температурною стійкістю. Система температурного контролю та охолодження не передбачає можливості підтримувати температуру нижче 200°C на постійній основі, що є необхідним для роботи з PLA. Підвищений тиск, який створюється подвійним шнеком, є надлишковим для PLA і може призвести до його перегріву або втрати механічних властивостей через надмірне навантаження.

Крім того, подвійний шнек, розроблений для високоміцних композитів, не дозволяє досягти необхідної рівномірності при роботі з PLA, оскільки цей

матеріал потребує менших механічних навантажень. Отже, застосування цього екструдера для PLA не дозволяє досягти бажаної якості виробу без суттєвої модернізації конструкції.

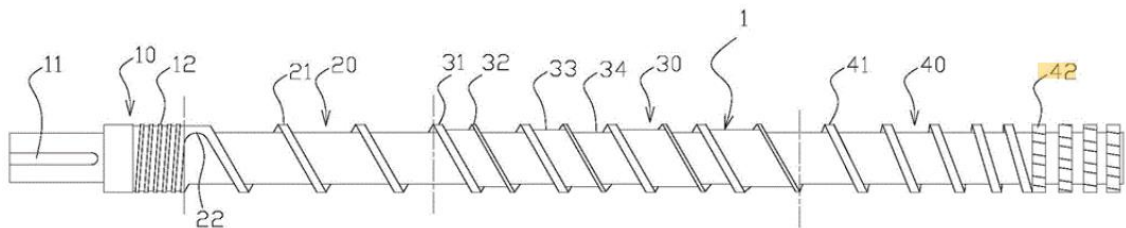
Патент US9156201B2 не підходить для роботи з PLA через специфічну орієнтацію на полімери, що потребують інтенсивного змішування і високих температур. Подвійний шнек створює надмірний тиск, а система температурного контролю не дозволяє стабілізувати температуру на рівні, оптимальному для PLA. Для роботи з PLA необхідна конструкція, що забезпечує низькі температури та рівномірний рух матеріалу без надмірного тиску, що робить цей екструдер непридатним для роботи з PLA.

Патент CN214726303U представляє собою унікальну конструкцію екструдера, спеціально розробленого для роботи з полімерними матеріалами, які потребують стабільного температурного режиму в діапазоні низьких і середніх температур. Основна мета цього патенту полягає у забезпеченні стабільного екструдювання матеріалів із низькою температурною стійкістю, зокрема PLA та ABS, який є одним із найбільш екологічно чистих та перероблюваних полімерів.



Ця конструкція створена для роботи з матеріалами, що мають високу чутливість до температурних коливань, і дозволяє досягти стабільного та рівномірного розплавлення без ризику перегріву або деформації. Одна з найважливіших особливостей конструкції цього екструдера — це точний температурний контроль, який забезпечується за допомогою багатозонної системи нагріву та охолодження. Така система дозволяє підтримувати рівномірний температурний режим у кожній зоні екструдера, що особливо важливо при роботі з матеріалами, які мають тенденцію до розм'якшення при нижчих температурах. Завдяки цьому PLA та подібні полімери можуть оброблятися стабільно, без ризику термічного розкладання.

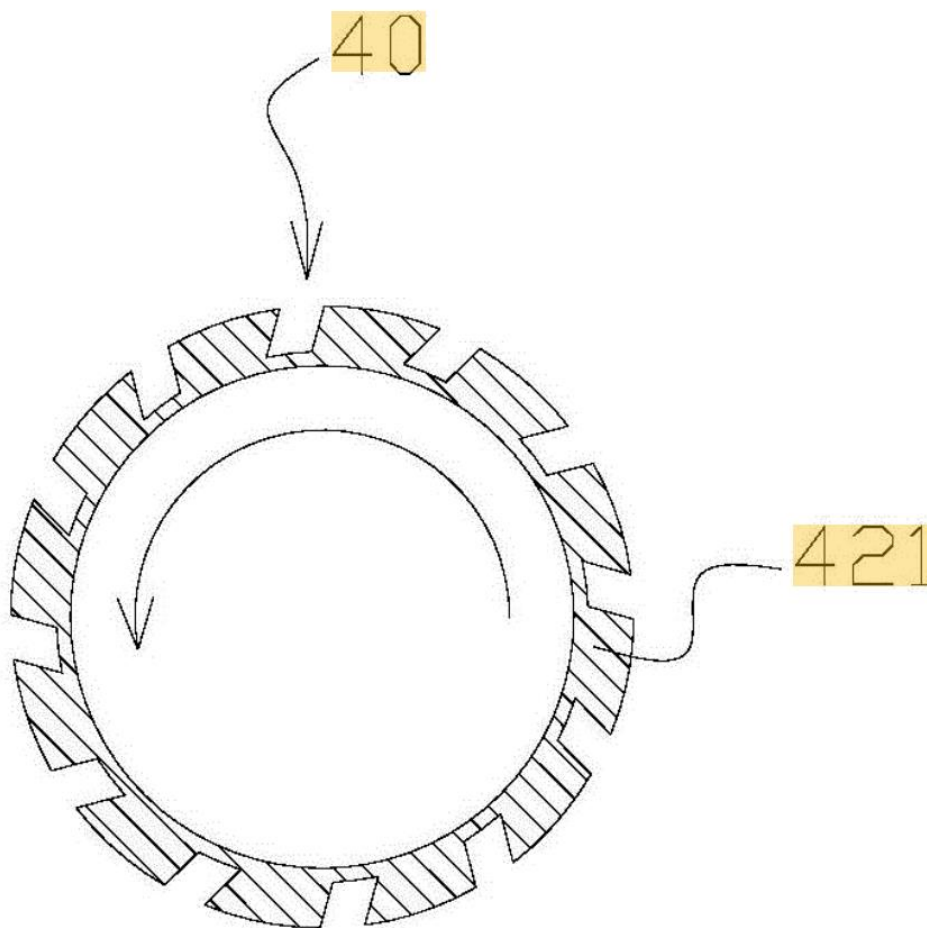
Ще однією важливою конструктивною особливістю є модифікований шнековий механізм із додатковими каналами для стабілізації тиску, що дозволяє зменшити надмірний тиск, часто характерний для екструдерів, призначених для високоміцних матеріалів. Це особливо корисно при роботі з PLA, оскільки цей матеріал не вимагає високого тиску для стабільної подачі і схильний до деформації під надмірним навантаженням. Тому ця конструкція забезпечує плавний і рівномірний рух PLA без ризику розриву або зміни структури.



Крім того, екструдер оснащений інноваційною системою охолодження, яка дозволяє швидко знижувати температуру в кінцевій зоні, де матеріал вже сформований. Це є критичним для створення виробів із PLA, оскільки дозволяє запобігти небажаному тепловому впливу на готовий виріб. Охолодження також сприяє збереженню точної форми та механічної міцності кінцевого продукту, що робить цей екструдер особливо ефективним для виробництва деталей, які потребують високої точності.

Патент CN214726303U орієнтований на роботу з PLA та іншими біорозкладними матеріалами, які відзначаються низькою температурною

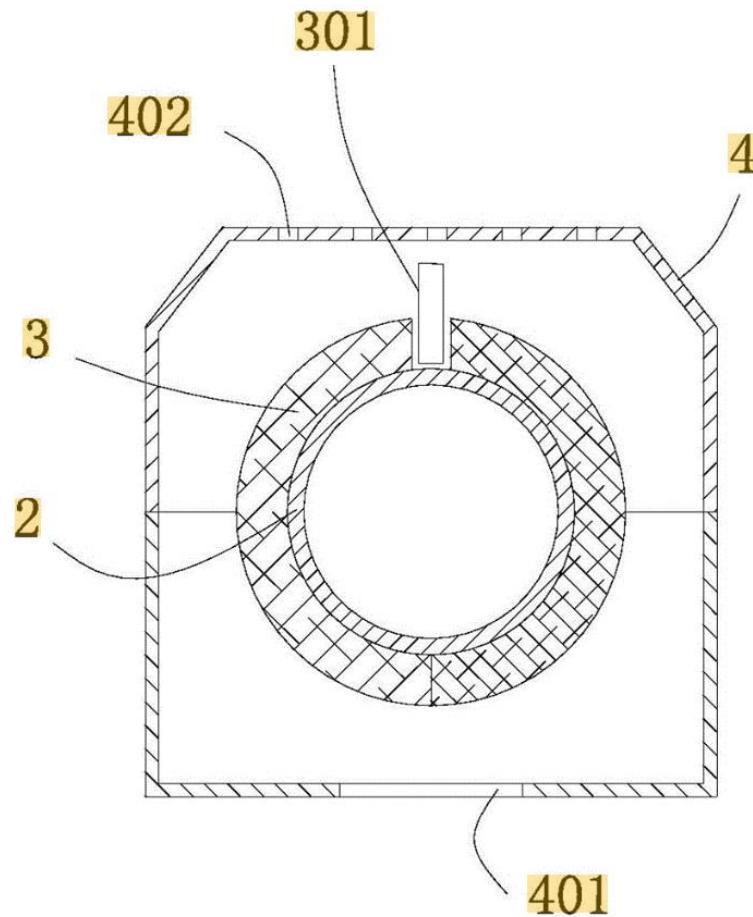
стійкістю і є екологічно безпечними. PLA особливо підходить для цього екструдера, оскільки система дозволяє точно підтримувати температурний режим у межах 180-210°C, що є оптимальним для плавлення PLA. Окрім того, використання PLA у цій системі забезпечує стабільність і рівномірність екструзії, оскільки екструдер розроблений для роботи з матеріалами, які не потребують високих температур чи надмірного тиску.



На відміну від екструдерів, розроблених для високоміцних композитів або полімерів, що потребують високих температур, цей екструдер забезпечує не лише рівномірне розплавлення, але й швидке охолодження, що є критичним для збереження механічних властивостей PLA. Завдяки цьому кінцеві вироби з PLA виходять більш точними та міцними, що особливо важливо для виготовлення таких елементів, як лопаті вітрогенераторів.

Головна перевага цього екструдера для роботи з PLA полягає в можливості точного контролю температури і стабілізації тиску, що дозволяє уникнути перегріву та деформації матеріалу. Модернізований шнек з

додатковими каналами знижує тиск на матеріал, що дозволяє PLA рухатися плавно, не викликаючи внутрішньої напруги, яка може призвести до дефектів у готовому виробі. Крім того, система охолодження екструдера дозволяє швидко стабілізувати температуру після формування виробу, що сприяє збереженню його форми та міцності.



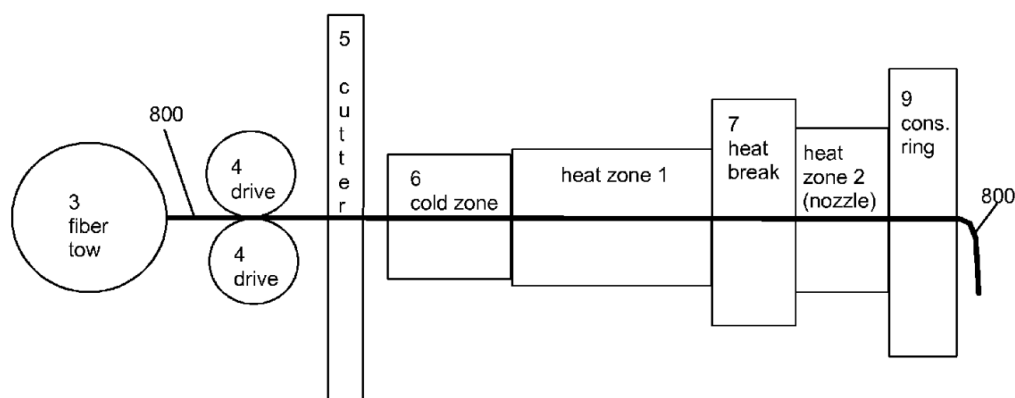
Також варто відзначити екологічні переваги цього екструдера при роботі з PLA. Оскільки PLA є біорозкладним полімером, його використання в умовах стабільного температурного режиму не тільки забезпечує високу якість виробів, але й сприяє зменшенню впливу на навколишнє середовище, оскільки екструдер розроблений із врахуванням вимог до обробки екологічно чистих матеріалів.

Патент CN214726303U є ідеальним варіантом для роботи з PLA завдяки його здатності підтримувати стабільний температурний режим у межах, необхідних для екструзії цього матеріалу, та точному контролю тиску. Цей екструдер поєднує всі необхідні елементи для ефективної і безпечної роботи з PLA, включаючи багатозонну систему нагріву, адаптовану систему подачі та

ефективне охолодження. Завдяки цим характеристикам, екструдер CN214726303U є найкращим вибором для виробництва великих, точних виробів із PLA, таких як лопаті вітрогенераторів, забезпечуючи якість і екологічність процесу екструзії.

3.2 Патентний пошук для модернізації сопла 3D-прінтера

Патент WO2019141892A1 описує метод і систему для виготовлення лопаті турбомашини з використанням адитивних технологій, де ключовим є топологічно оптимізована внутрішня структура. Основна мета полягає у покращенні механічної надійності та зменшенні втомних навантажень за рахунок розробки внутрішніх порожнин чи ґратчастих структур, котрі забезпечують оптимальний розподіл напружень. У конструкції передбачені внутрішні секції, спроєктовані за допомогою топологічної оптимізації, що підвищує міцність лопаті без істотного збільшення ваги. Для цього застосовуються ґратчасті структури або щільні зони, сформовані у місцях максимальних навантажень.

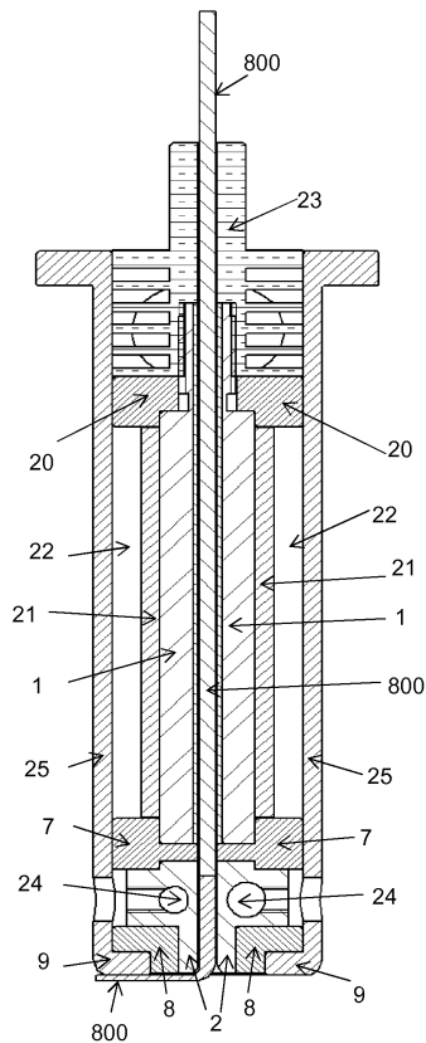


Переважно використовують жароміцні суперсплави на основі нікелю, титанові сплави або інші композитні матеріали. Завдяки адитивному процесу можна комбінувати кілька видів порошків у межах одного виробу, забезпечуючи гнучкість застосування у різних турбомашинах.

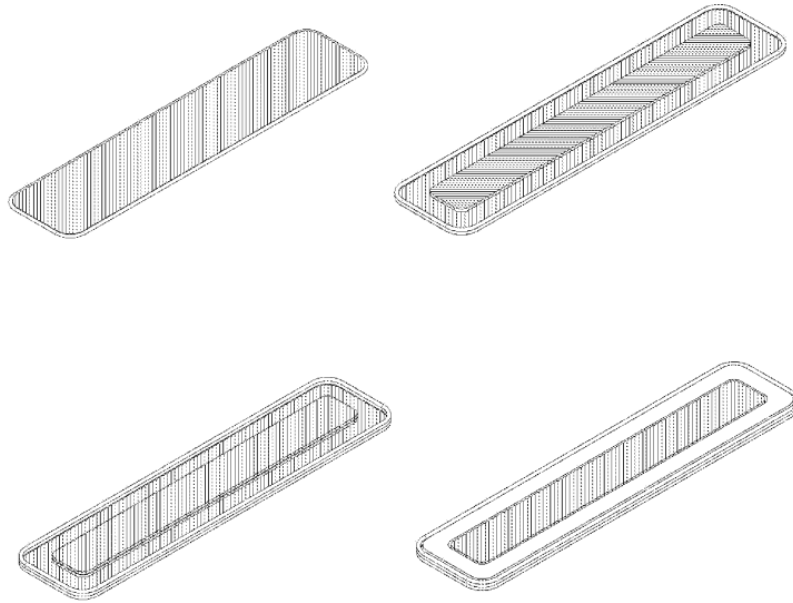
Хоча патент пропонує цікавий підхід до внутрішніх структур і топологічної оптимізації, він не надає рішень щодо удосконалення сопла 3D-

принтера або механізму подавання матеріалу. Орієнтація патенту — на оптимізацію лопатей, а не на технологічні вузли самого принтера.

Патент стосується системи та методу виготовлення лопатей чи деталей аеродинамічного профілю з використанням адитивних технологій, придатних як для промислових турбін, так і для авіаційних двигунів. Особливу увагу приділено контролю процесу адитивного нарощування для мінімізації деформацій і пор у виробі.

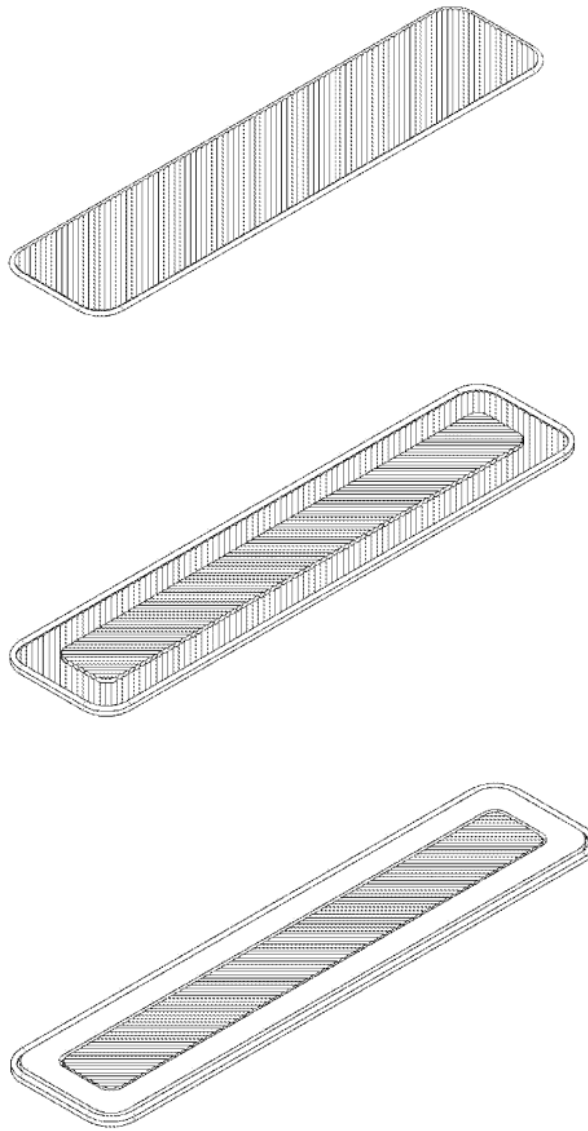


Запропоновано спеціалізовану конструкцію контурів лопаті з додатковими ребрами жорсткості та внутрішніми каналами складної форми. Окремо наголошено на можливості інтегрувати вузли кріплення чи інші функціональні елементи безпосередньо під час друку.



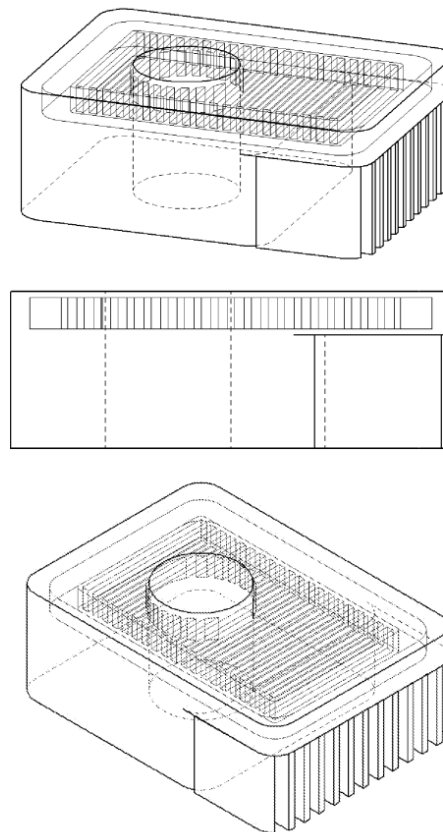
Рекомендується використання металевих порошків (нікель, титанові сплави), а також композиційних матеріалів із металокерамікою. Завдяки адитивному виробництву можливе плавне поєднання різних сплавів у межах одного виробу.

Основний акцент патенту — на формуванні специфічної геометрії лопатей із підсиленою конструкцією та високою точністю профілювання. У документі немає опису технічних рішень для вдосконалення конструкції сопла 3D-принтера, системи змішування порошків чи подачі розплаву.



Патент описує удосконалені лопаті турбіни з покращеним охолодженням, що реалізується завдяки складним внутрішнім каналам. Такий підхід є критичним для високотемпературних умов, зокрема у газотурбінних двигунах.

Передбачено внутрішні канали різного перетину, що забезпечують краще відведення тепла від стінок лопаті за рахунок підвищеної турбулентності потоку. Адитивна технологія дозволяє друкувати такі канали без складних технологічних витрат, як у традиційному литті.

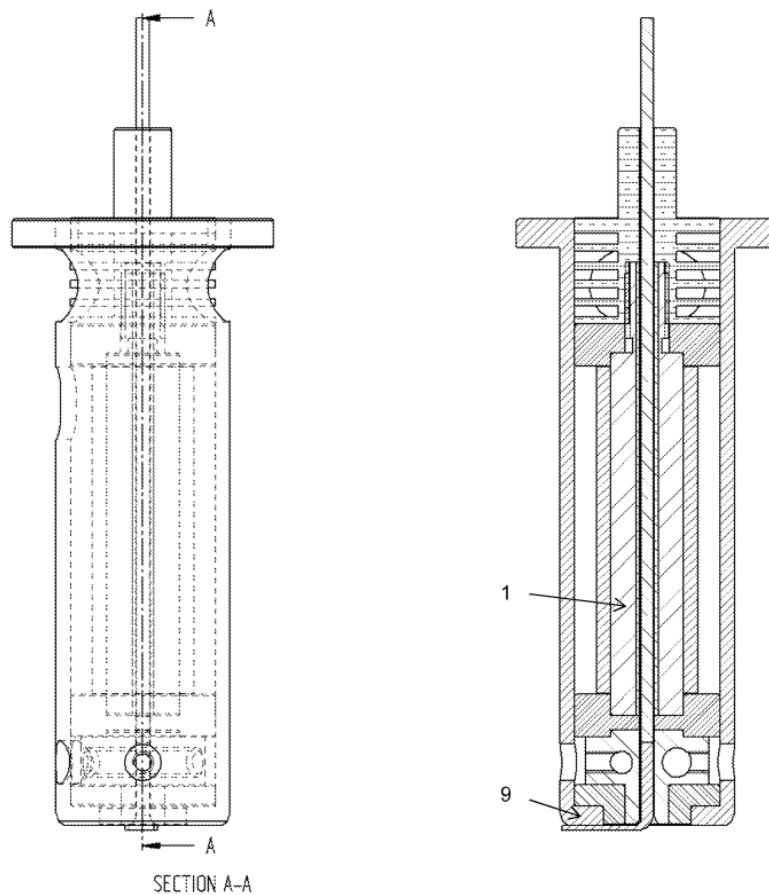


Переважно застосовуються жароміцні суперсплави (Inconel, nimonic) або титанові сплави, рідше — керамічні композити. Ключова перевага полягає в можливості точно створювати складні канали навіть у матеріалах зі складними фізико-механічними властивостями. Патент орієнтований на поліпшення охолоджувальних властивостей лопаті та внутрішньої структури виробу. Конструктивні вдосконалення стосуються насамперед гідравліки та терморегулювання лопатей, а не конструкції чи функціоналу сопла 3D-принтера

Патент описує систему та методи адитивного виробництва лопатей турбомашин із додатковими вбудованими засобами моніторингу процесу друку. Система дозволяє в реальному часі відстежувати параметри формування шару (температуру, швидкість плавлення, товщину тощо) та коригувати процес для мінімізації дефектів. Застосовуються оптичні датчики, лазерні відбивачі та термопари для контролю якості кожного шару. Автоматично регулюються режими друку: швидкість,

потужність лазера чи інші параметри. Це полегшує створення тонкостінних секцій та внутрішніх порожнин, важливих у лопатях.

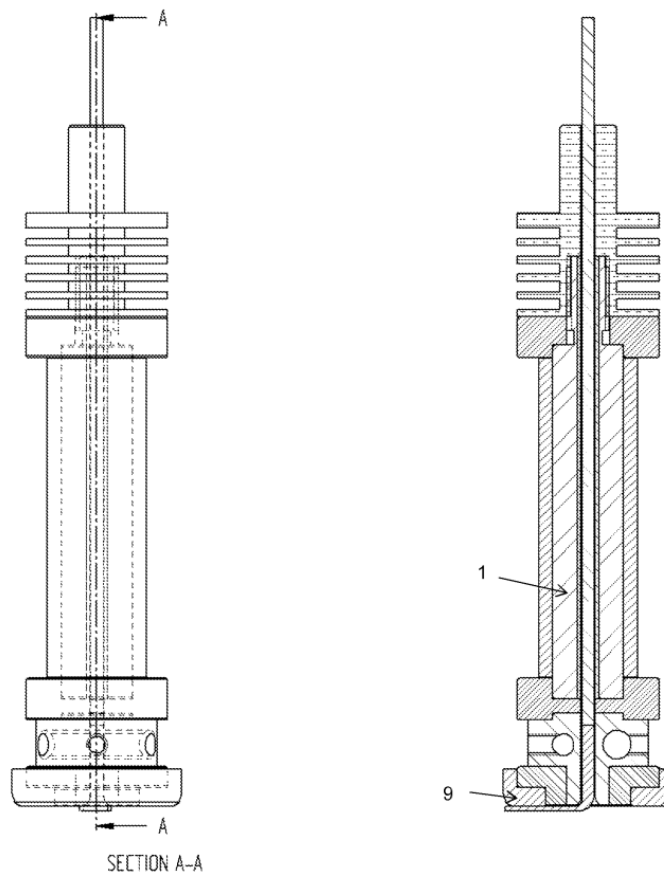
Система адаптивного контролю дозволяє використовувати жароміцні, титанові та багатокомпонентні сплави. Знижується ризик появи розшарувань чи неоднорідності структури, що дає змогу друкувати складні деталі з підвищеною надійністю.



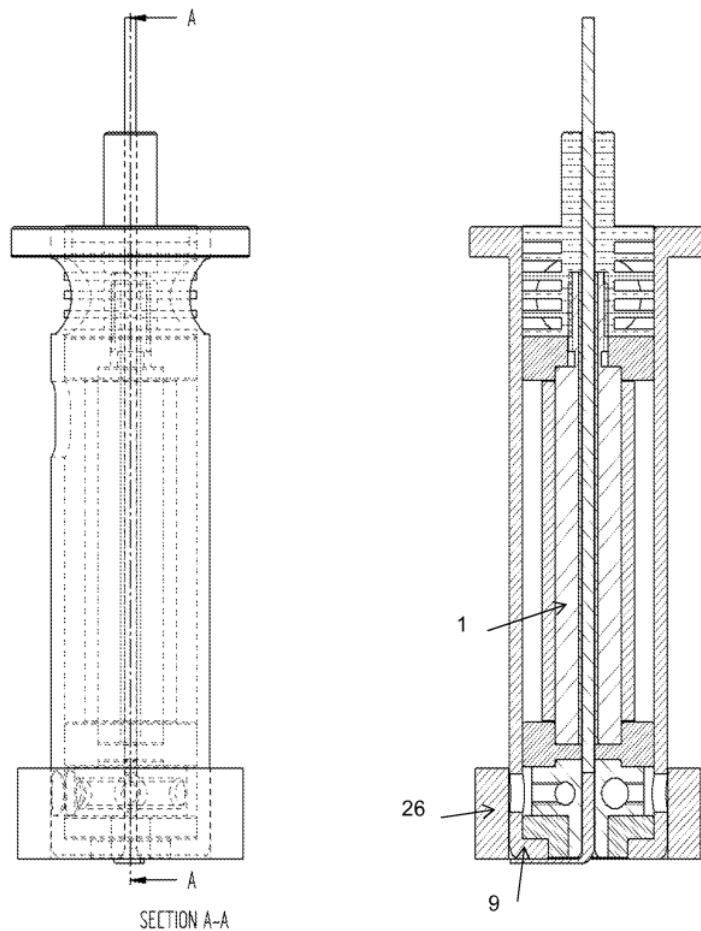
Основний фокус патенту — на технології моніторингу та автоматичного регулювання параметрів друку, а не на розробці чи модернізації сопла. Хоча контроль процесу є важливим, запропоновані рішення не охоплюють задачі нашого проєкту щодо мультифункціонального чи багатокомпонентного сопла.

Цей патент розкриває метод виготовлення компонентів турбомашин з використанням адитивних технологій, де особлива увага приділяється інтеграції додаткових елементів, таких як сенсорні вузли або елементи підвищеної міцності. Метод спрямований на поєднання кількох функціональних зон у межах одного друкованого виробу.

Передбачено можливість створення внутрішніх порожнин довільної форми, куди можуть бути вбудовані сенсорні модулі (для контролю температури чи вібрацій). Також можлива інтеграція армуючих вставок із різних матеріалів (металеві дроти, карбонові волокна) на етапі друку, що забезпечує гібридну конструкцію з високою жорсткістю та додатковими функціональними можливостями.



Використовується широкий спектр порошкових сплавів — від титанових до залізонікелевих і кобальтових композицій. Для друку сенсорних зон можуть застосовуватися провідникові чи діелектричні полімери.



Патент приділяє увагу саме багатокомпонентності та можливості інтеграції різних функціональних зон у межах одного виробу. Це відкриває широкі перспективи для модернізації сопла 3D-принтера, зокрема в аспектах:

- одночасна подача кількох типів матеріалів;
- інтеграція армуючих та сенсорних елементів під час друку;
- адаптивний підхід до зміни складу й конфігурації друку «на льоту».

Тому WO2019141892A1 може слугувати основою для розробки багатофункціонального вузла подачі в нашому проєкті.

4 ОБГРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЙ

4.1 Обґрунтування модернізації шнека екструдера за патентом CN214726303U

Модернізація екструдера для виробництва лопатей вітрогенераторів з екологічно чистих матеріалів, таких як PLA, є важливим кроком у напрямку сталого розвитку. Вибір екструдера, який дозволяє підтримувати оптимальні температурні умови, стабільність тиску та ефективне охолодження для матеріалів з низькою температурною стійкістю, є критичним для забезпечення якості кінцевого виробу та зменшення впливу на навколишнє середовище. На основі аналізу чотирьох альтернативних варіантів екструдерів, представлених у патентах US20210138711A1, US20220001590A1, US20230046870A1 та US9156201B2, було обрано патент CN214726303U як найбільш підходящий для модернізації екструдера з метою роботи з PLA.

Патент US20210138711A1 пропонує екструдер для роботи з матеріалами, що вимагають високих температур, таких як PEEK. Основна особливість цього екструдера — система нагріву, здатна підтримувати стабільні температури понад 300°C, що забезпечує однорідне розплавлення термостійких матеріалів. Однак така конструкція є надлишковою для PLA, оскільки цей матеріал плавиться при значно нижчих температурах (близько 180-200°C). Відсутність можливості точного контролю нижчих температур ускладнює обробку PLA і робить цей екструдер непридатним для нашого завдання.

Патент US20220001590A1 фокусується на обробці композитних матеріалів, зокрема армованих полімерів, які вимагають високого тиску та температур для стабільного змішування. Подвійна система подачі та високотемпературний контроль роблять цей екструдер ефективним для композитів, але не підходять для PLA. Через високий тиск та температури PLA може втрачати свої механічні властивості, що призводить до погіршення якості виробу. Додатково, надмірний контроль температури та тиску в цьому

екструдері є непотрібним для PLA, що робить його не вигідним вибором для нашого проекту.

У патенті US20230046870A1 застосовано підхід локального нагрівання для підтримки високих температур у певних ділянках шнека, що сприяє рівномірному розплавленню термостійких полімерів, таких як поліаміди та полікарбонати. Однак цей підхід не підходить для PLA, який вимагає рівномірного нагрівання при нижчих температурах. Відсутність ефективної системи охолодження та контролю низьких температур унеможливорює обробку PLA, оскільки локальне підвищення температури призводить до ризику перегріву і деформації матеріалу.

Патент US9156201B2 пропонує екструдер з подвійним шнеком для роботи з багатокомпонентними полімерними сумішами. Цей екструдер орієнтований на підтримку високих температур і стабільного тиску для матеріалів, що вимагають інтенсивного змішування. Подвійний шнек є надлишковим для PLA, оскільки цей матеріал не вимагає складного змішування і потребує набагато нижчих температур. Висока в'язкість полімерів, з якими працює цей екструдер, також створює надмірний тиск, що може призвести до перегріву PLA. Тому цей варіант не підходить для нашого завдання.

Патент CN214726303U представляє собою ідеальний варіант для роботи з PLA завдяки можливості точного контролю температур у межах 180-210°C — оптимального діапазону для PLA. Система багатозонного нагріву забезпечує рівномірний температурний режим на всій довжині шнека, що дозволяє уникнути локального перегріву і забезпечує стабільну структуру матеріалу. Модифікований шнековий механізм із додатковими каналами для стабілізації тиску знижує надмірний тиск, дозволяючи PLA плавно рухатися екструдером без втрати механічних властивостей.

Також, наявність інноваційної системи охолодження в патенті CN214726303U дозволяє швидко знижувати температуру в кінцевій зоні, що критично важливо для виробів з PLA. Це сприяє збереженню точної форми і механічної міцності виробів, таких як лопаті вітрогенераторів. Ця система

також відповідає екологічним вимогам, оскільки забезпечує оптимальне середовище для роботи з PLA, що є біорозкладним полімером, зменшуючи енергетичні витрати на охолодження та підтримку температури.

На основі проведеного аналізу, патент CN214726303U було обрано як найоптимальніший варіант для модернізації екструдера під роботу з PLA. Його унікальні конструктивні особливості, такі як багатозонна система нагріву, модифікований шнековий механізм і інноваційна система охолодження, забезпечують точний контроль температури та тиску, необхідний для обробки PLA. Цей екструдер не тільки забезпечує високу якість кінцевих виробів, але й відповідає екологічним вимогам, що робить його ідеальним вибором для виробництва великих і точних виробів, таких як лопаті вітрогенераторів.

4.2 Обґрунтування модернізації сопла 3D-прінтера за патентом WO2019141892A1

Патент WO2019141892A1 описує технологію, яка передбачає інтеграцію різних функціональних матеріалів і сенсорних елементів у межах одного адитивного процесу. Це досягається за допомогою багатокомпонентної подачі матеріалів та спеціально розроблених внутрішніх каналів, що дозволяють формувати гібридні структури (металева матриця з армувальними вставками, сенсорні шари тощо). Таким чином, модернізація сопла 3D-прінтера на основі цього патенту обґрунтована можливістю:

1. Поєднання кількох матеріалів під час друку: конструктивні рішення дають змогу одночасно подавати різnorідні матеріали (метали, полімери, кераміка), забезпечуючи створення лопатей чи інших деталей із варіативними властивостями за одним циклом друку.
2. Інтеграції сенсорних вузлів та функціональних елементів: внутрішні порожнини в поєднанні з багатокомпонентною подачею матеріалів створюють передумови для встановлення датчиків або інших функціональних систем безпосередньо в процесі виготовлення деталі.

3. Покращення механічних властивостей деталей: можливість друку армованих структур чи перехідних зон із різним хімічним складом сприяє підвищенню міцності та витривалості виробів при збереженні невеликої ваги.

Завдяки цим можливостям, запропоноване патентом рішення дає технічну базу для створення вдосконаленого сопла 3D-прінтера, яке зможе реалізовувати багатофункціональний підхід до друку високотехнологічних деталей, зокрема лопатей із комплексними внутрішніми структурами.

5 РОЗРАХУНКИ

5.1 Розрахунок продуктивності базової одночерв'ячної машини

Продуктивність одночерв'ячної машини — це обсяг матеріалу, який машина може обробити за одиницю часу. Розрахунок базується на основних параметрах черв'яка, швидкості його обертання та фізичних характеристиках оброблюваного матеріалу.

У якості орієнтира для наступних розрахунків було обрано екструдер філаменту для 3D-прінтеру Filabot EX2 Filament Extruder, який має продуктивність 4,5 кг/год. Габаритні розміри шнека також підбиралися під цей екструдер.

Формула для розрахунку:

Продуктивність Q (кг/год) для окремих ділянок чер'яка визначається як:

$$Q = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 \text{ де:}$$

S – площа зовнішнього діаметру (м),

s – площа внутрішнього діаметру (м),

p – крок витку (м),

n – частота обертання черв'яка (об/хв),

I – коефіцієнт наповнення жолобу (%),

sw – питома вага речовини (кг/м³)

60 – хвилин у годині

Вихідні дані:

Питома вага ABS: $p = 1020$ кг/м³,

Внутрішній діаметр черв'яка: d = від 0,12 до 0,16 м,

Зовнішній діаметр чер'яка: $D = 0,2$ м,

Частота обертання: $n = 50$ об/хв (припущення),

Коефіцієнт наповнення жолобу: $I = 45\%$.

Розрахунок:

Для початку потрібно обрахувати площу зовнішнього діаметру S та площу внутрішнього s . Зробити це можна за наступними формулами:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

та

$$s = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

Обрахування площі зовнішнього перерізу:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{0,2}{2}\right)^2 = 0,314 \text{ м}^2$$

Для обрахування площі внутрішніх перерізів треба узяти виборку із діаметрів на різних ділянках. Для цього проводяться наступні розрахунки (для зручності початкового у мм):

$$16 - 12 = 4$$

$$\frac{4}{11} = 0,36$$

Для роботи із кожним із 11-ти перерізів (це кількість перерізів, на яких змінюється й внутрішній діаметр, й шаг) до 12 додається 0,36 на першій ділянці й по алгебраїчній прогресії далі до 11-го перерізу. Із цими даними проводяться розрахунки площі внутрішніх перерізів s:

$$s_1 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{12,36}{2}\right)^2 = 120 = 0,12 \text{ м}^2$$

$$s_2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{12,72}{2}\right)^2 = 127 = 0,127 \text{ м}^2$$

$$s_3 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{13,08}{2}\right)^2 = 134,3 = 0,134 \text{ м}^2$$

$$s_4 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{13,44}{2}\right)^2 = 141,8 = 0,141 \text{ м}^2$$

$$s_5 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{13,8}{2}\right)^2 = 149,6 = 0,15 \text{ м}^2$$

$$s_6 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{14,16}{2}\right)^2 = 0,157 = 0,157 \text{ м}^2$$

$$s_7 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{14,52}{2}\right)^2 = 165,6 = 0,165 \text{ м}^2$$

$$s_8 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{14,88}{2}\right)^2 = 173,9 = 0,173 \text{ м}^2$$

$$s_9 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{15,24}{2}\right)^2 = 182,4 = 0,182 \text{ м}^2$$

$$s_{10} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{15,6}{2}\right)^2 = 191,1 = 0,191 \text{ м}^2$$

$$s_{11} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{15,96}{2}\right)^2 = 200 = 0,2 \text{ м}^2$$

Також мається наступний однаковий крок для кожної ділянки:

$$s = 30 \text{ мм}$$

Результати розрахунку продуктивності одночерв'ячної машини

Для розрахунку усі данні підставляються до існуючої формули:

$$Q_1 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,12) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 8014$$

$$Q_2 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,127) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 7725$$

$$Q_3 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,134) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 7435$$

$$Q_4 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,141) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 7146$$

$$Q_5 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,15) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 6774$$

$$Q_6 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,157) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 6485$$

$$Q_7 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,165) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 6155$$

$$Q_8 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,173) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 5824$$

$$Q_9 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,182) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 5452$$

$$Q_{10} = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,191) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 = 5081$$

$$Q_{11} = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,2) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 = 4709$$

Середня продуктивність, узята з усіх перерізів:

$$Q_{\text{сер}} = \frac{8014+7725+7435+7146+6774+6485+6155+5824+5452+5081+4709}{11} = \frac{70800}{11} =$$

$$6436 = 6,4 \text{ кг/год}$$

Отримане значення продуктивності перевищує значення для екструдера-орієнтира, тому можна зробити висновок, що шнек працюватиме із гарною ефективністю у заданій машині.

5.2 Розрахунок продуктивності модернізованої одночерв'ячної машини

Вихідні дані:

Питома вага ABS: $p = 1020 \text{ кг/м}^3$,

Внутрішній діаметр черв'яка: $d = \text{від } 0,12 \text{ до } 0,16 \text{ м}$,

Зовнішній діаметр черв'яка: $D = 0,2 \text{ м}$,

Частота обертання: $n = 50 \text{ об/хв}$ (припущення),

Коефіцієнт наповнення жолобу: $I = 45\%$.

Розрахунок:

Для початку потрібно обрахувати площу зовнішнього діаметру S та площу внутрішнього s . Зробити це можна за наступними формулами:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

та

$$s = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

Обрахування площі зовнішнього перерізу:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{0,2}{2}\right)^2 = 0,314 \text{ м}^2$$

Для обрахування площі внутрішніх перерізів треба узяти виборку із діаметрів на різних ділянках. Для цього проводяться наступні розрахунки (для зручності початкового у мм):

$$16 - 12 = 4$$

$$\frac{4}{11} = 0,36$$

Для роботи із кожним із 11-ти перерізів (це кількість перерізів, на яких змінюється й внутрішній діаметр, й шаг) до 12 додається 0,36 на першій ділянці й по алгебраїчній прогресії далі до 11-го перерізу. Із цими даними проводяться розрахунки площі внутрішніх перерізів s:

$$s_1 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{12,36}{2}\right)^2 = 120 = 0,12 \text{ м}^2$$

$$s_2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{12,72}{2}\right)^2 = 127 = 0,127 \text{ м}^2$$

$$s_3 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{13,08}{2}\right)^2 = 134,3 = 0,134 \text{ м}^2$$

$$s_4 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{13,44}{2}\right)^2 = 141,8 = 0,141 \text{ м}^2$$

$$s_5 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{13,8}{2}\right)^2 = 149,6 = 0,15 \text{ м}^2$$

$$s_6 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{14,16}{2}\right)^2 = 0,157 = 0,157 \text{ м}^2$$

$$s_7 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{14,52}{2}\right)^2 = 165,6 = 0,165 \text{ м}^2$$

$$s_8 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{14,88}{2}\right)^2 = 173,9 = 0,173 \text{ м}^2$$

$$s_9 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{15,24}{2}\right)^2 = 182,4 = 0,182 \text{ м}^2$$

$$s_{10} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{15,6}{2}\right)^2 = 191,1 = 0,191 \text{ м}^2$$

$$s_{11} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{15,96}{2}\right)^2 = 200 = 0,2 \text{ м}^2$$

Для перерізів s_{12} , s_{13} , s_{14} , s_{15} площа буде однаковою, так як маємо однаковий внутрішній діаметр:

$$s_{12,13,14,15} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{18}{2}\right)^2 = 254,34 = 0,25 \text{ м}^2$$

Також мається наступний змінюючийся крок у наступному порядку для кожної ділянки:

$$s_1 = 30 \text{ мм}$$

$$s_2 = 30 \text{ мм}$$

$$s_3 = 30 \text{ мм}$$

$$s_4 = 17,4 \text{ мм}$$

$$s_5 = 14,4 \text{ мм}$$

$$s_6 = 11,4 \text{ мм}$$

$$s_7 = 9,4 \text{ мм}$$

$$s_8 = 50,4 \text{ мм}$$

$$s_9 = 32,6 \text{ мм}$$

$$s_{10} = 20,5 \text{ мм}$$

$$s_{11} = 18,5 \text{ мм}$$

$$s_{12} = 12,6 \text{ мм}$$

$$s_{13} = 15,6 \text{ мм}$$

$$s_{14} = 18,6 \text{ мм}$$

$$s_{15} = 21,6 \text{ мм}$$

Результати розрахунку продуктивності одночерв'ячної машини

Для розрахунку усі данні підставляються до існуючої формули:

$$Q_1 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,12) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 8014$$

$$Q_2 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,127) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 7725$$

$$Q_3 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,134) \cdot 0,03 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 7435$$

$$Q_4 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,141) \cdot 0,017 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 4049$$

$$Q_5 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,15) \cdot 0,014 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 3161$$

$$Q_6 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,157) \cdot 0,011 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 2378$$

$$Q_7 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,165) \cdot 0,094 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 19286$$

$$Q_8 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,173) \cdot 0,05 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 9707$$

$$Q_9 = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,182) \cdot 0,032 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 5816$$

$$Q_{10} = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,191) \cdot 0,02 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 3387$$

$$Q_{11} = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,2) \cdot 0,018 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 2825$$

Як вже було вказано, для перерізів s_{12} , s_{13} , s_{14} , s_{15} площа буде однаковою, так як маємо однаковий внутрішній діаметр. Однак мається різний крок, тому є наступні розрахунки:

$$Q_{12} = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,25) \cdot 0,012 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 1057$$

$$Q_{13} = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,25) \cdot 0,015 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 1321$$

$$Q_{14} = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,25) \cdot 0,018 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 1586$$

$$Q_{15} = (S - s) \cdot p \cdot n \cdot I \cdot sw \cdot 60 = (0,314 - 0,25) \cdot 0,021 \cdot 50 \cdot 45\% \cdot 1020 \cdot 60 \\ = 1850$$

Середня продуктивність, узятa з усіх перерізів:

$$Q_{\text{сер}} =$$

$$\frac{8014+7725+7435+4049+3161+2378+19286+9707+5816+3387+2825+1057+1321+1586+1850}{15} =$$

$$\frac{79597}{15} = 5306 = 5,3 \text{ кг/год}$$

Отримане значення продуктивності перевищує значення для екструдера-орієнтира, тому можна зробити висновок, що шнек працюватиме із гарною ефективністю у заданій машині.

Хоча для модернізованого шнеку значення продуктивності й менше, ніж для базової моделі – це вплив модернізації, направленої на покращення пластифікації готового продукту. Тому цей недолік допустимий з урахуванням того, що шнек усе одно виконує необхідну кількість роботи, що підтверджено розрахунками.

5.3 Розрахунок перепаду тиску в екструзійній головці екструдера із базовим шнеком

Наступний розрахунок проведено на загальній перепад тиску $\Delta P_{\text{заг}}$ у конусному наконечнику шнеку для матеріалу ABS. Головка складається з двох частин: циліндра довжиною 1 мм, та конуса висотою 8 мм. Ця геометрія забезпечую не тільки забезпечує різке стиснення потоку, а й зручне кріплення до основного валу шнека. Загальний перепад тиску є сумою трьох основних компонентних втрат, які виникають у процесі екструзії: в'язких втрат в конічній секції $\Delta P_{\text{кон}}$, в'язких втрат у циліндричній секції $\Delta P_{\text{кор.цил}}$ і критично важливих невязких (еластичних) втрат на вході в головку $\Delta P_{\text{гол}}$.

$$\Delta P_{\text{заг}} = \Delta P_{\text{конуса}} + \Delta P_{\text{циліндра}} + \Delta P_{\text{головки}}$$

Вихідні параметри та реологічна модель:

ABS представляється як рідина, яка розраховується за степеневим законом Оствальда–де-Вале. Цей розрахунковий метод використовують для опису

поведінки розплавів полімерів, пов'язує напруження зсуву τ зі швидкістю зсуву $\dot{\gamma}$:

$$\tau = K|\dot{\gamma}|^n$$

Надані дані дозволяють узяти індекс консистенції як $K = 35000 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$, а індекс течії n дорівнює 0.40. Оскільки значення n значно менше одиниці ($n = 0.40$), матеріал демонструє сильну зсувно-розріджувальну (псевдопластичну) поведінку.

Вхідні дані (у системі СІ):

Витрати (Q): $1.743 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$

Індекс консистенції (K): $35000 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$

Індекс течії (n): 0.40

Вхідний радіус конуса ($R_{\text{вхід}}$): 0.008 м

Вихідний радіус конуса ($R_{\text{вихід}}$): 0.0005 м

Довжина конуса ($H_{\text{кон}}$): 0.008 м

Довжина циліндра ($L_{\text{цил}}$): 0.001 м

Розрахунок:

Спочатку потрібно розрахувати напруження здвигу на стінці τ_w , для цього треба визначити дійсну швидкість здвигу $\dot{\gamma}_w$:

1. Хибна швидкість здвигу на стінці $\dot{\gamma}_{\text{хиб}} = \frac{4Q}{\pi R_{\text{вихід}}^3}$ для круглої труби розраховується за наступною формулою:

$$\dot{\gamma}_{\text{хиб}} = \frac{4Q}{\pi R_{\text{вихід}}^3} = \frac{4 \cdot 1.743 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}}{\pi \cdot (0.008 \text{ м})^3} = 8871.43 \text{ с}^{-1}$$

2. Так, як ABS є неньютонівською рідиною, до нього потрібно застосувати поправку Рабіновича для визначення дійсної швидкості здвигу на стінці $\dot{\gamma}_w$:

$$\dot{\gamma}_w = \left(\frac{3n + 1}{4n} \right) \dot{\gamma}_{\text{хиб}}$$

Підставляємо $n = 0.40$:

$$\dot{\gamma}_w = \left(\frac{3(0.40) + 1}{4(0.40)} \right) 8871.43 \text{ с}^{-1} = \left(\frac{2.2}{1.6} \right) 8871.43 \text{ с}^{-1} = 12200.72 \text{ с}^{-1}$$

3. Напруження здвигу на стінці (τ_w) розраховується з застосуванням степеневого закону:

$$\tau_w = K(\dot{\gamma}_w)^n = 35000(12200.72)^{0.40} = 1803220 \text{ Па}$$

По результатам бачимо, що здвигове розжиження достатньо сильно знижує супротив потоку для робочих умов.

4. В'язкі втрати у циліндричній частині ($\Delta P_{\text{циліндра}}$) розраховуються через відношення напруження здвигу:

$$\Delta P_{\text{циліндра}} = \frac{2 \cdot \tau_w \cdot L_{\text{цил}}}{R_{\text{вихід}}} = \frac{2 \cdot 1803220 \text{ Па} \cdot 0.001 \text{ м}}{0.0005 \text{ м}} = 7.213 \text{ МПа}$$

Далі потрібно розрахувати $\Delta P_{\text{конуса}}$ з наступними параметрами $K = 35000$, $n = 0.40$, $3n = 1.2$, $\tan(\alpha) = 0.9375$, $Q = 1.743 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

Спочатку обраховується константа потоку C_Q :

$$C_Q = \frac{(3n + 1) Q}{n \pi} = \frac{2.2 \cdot 1.743 \cdot 10^{-6}}{0.4 \pi} = 3.05 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$$

А потім рахується коефіцієнт за скобками:

$$\text{Коефіцієнт} = \frac{2K}{3n \cdot \tan(\alpha)} (C_Q)^n = \frac{2 \cdot 35000}{1.2 \cdot 0.9375} (3.05 \cdot 10^{-6})^{0.40} = 71.86$$

Розрахунок $\Delta P_{\text{конуса}}$:

$$\Delta P_{\text{конуса}} = 71.86 \cdot 3072.8 = 220854 \text{ Па} = 0.221 \text{ МПа}$$

Далі потрібно розрахувати нев'язкі втрати на вході у зону. Для цього ми використали метод корекції Беглі, який заснован на дійсному напруженні здвигу на стінці $\tau_w = 1803220 \text{ Па}$.

$$\Delta P_{\text{входу}} = e_0 \cdot \tau_w = 15 \cdot 1803220 = 27048300 \text{ Па} = 27.048 \text{ МПа}$$

Остаточні розрахунки:

Загальний перепад тиску ($\Delta P_{\text{заг}}$) є сумою трьох розрахованих компонентів:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{заг}} &= \Delta P_{\text{конуса}} + \Delta P_{\text{циліндра}} + \Delta P_{\text{головки}} = \\ &= 0.221 \text{ МПа} + 7.213 \text{ МПа} + 27.048 \text{ МПа} = 34.482 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Результати розрахунку перепаду тиску в екструзійній головці:

За результатами розрахунків можна сказати, що втрати в секції конусу ($\Delta P_{\text{конуса}}$) майже не впливають на загальний тиск (менше 1%). Втрати у циліндрі

($\Delta P_{\text{циліндра}}$) становлять приблизно одну п'яту частину загального тиску (20,9%). Переважна частка загального перепаду тиску (78,4%) обумовлена невязкими втратами на вході ($\Delta P_{\text{входу}}$).

5.4 Розрахунок перепаду тиску в екструзійній головці екструдера із модернізованим шнеком

Вхідні параметри та реологічна модель

У цих розрахунках зберігаються тиж самі дані для пластику ABS.

Вхідні дані:

Вхідні дані (у системі СІ):

Витрати (Q): $1.443 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$

Індекс консистенції (K): $35000 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$

Індекс течії (n): 0.40

Вхідний радіус конуса ($R_{\text{вхід}}$): 0.008 м

Вихідний радіус конуса ($R_{\text{вихід}}$): 0.0005 м

Довжина конуса ($H_{\text{кон}}$): 0.008 м

Довжина циліндра ($L_{\text{цил}}$): 0.001 м

Хибна швидкість здвигу на стінці:

$$\dot{\gamma}_{\text{хиб}} = \frac{4Q}{\pi R_{\text{вихід}}^3} = \frac{4 \cdot 1.443 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}}{\pi \cdot (0.0005 \text{ м})^3} = 7338.27 \text{ с}^{-1}$$

Дійсна швидкість здвигу на стінці:

$$\dot{\gamma}_w = \left(\frac{3(0.40) + 1}{4(0.40)} \right) 7338.27 \text{ с}^{-1} = \left(\frac{2.2}{1.6} \right) 7338.27 \text{ с}^{-1} = 10090.10 \text{ с}^{-1}$$

Напруження здвигу на стінці:

$$\tau_w = K(\dot{\gamma}_w)^n = 35000(10090.10)^{0.40} = 1617700 \text{ Па}$$

Розрахунок $\Delta P_{\text{конуса}}$:

$$\Delta P_{\text{конуса}} = \frac{2 \cdot \tau_w \cdot L_{\text{цил}}}{R_{\text{вихід}}} = \frac{2 \cdot 1617700 \cdot 0.001 \text{ м}}{0.0005 \text{ м}} = 6470800 \text{ Па} = 6.471 \text{ МПа}$$

Константа потоку:

$$C_Q = \frac{(3n+1)Q}{n\pi} = \frac{2.2 \cdot 1.443 \cdot 10^{-6}}{0.4\pi} = 2.529 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\Delta P_{\text{конуса}} = 199634 \text{ Па} = 0.2 \text{ МПа}$$

Втрати на вході:

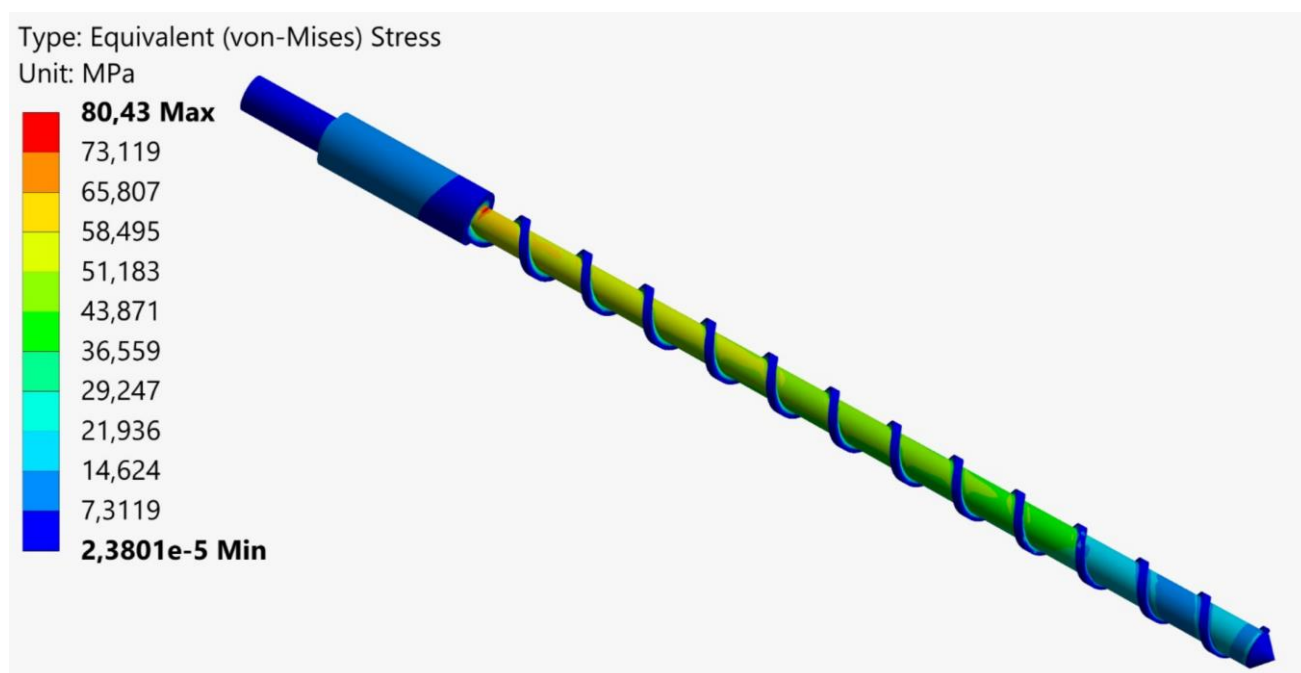
$$\Delta P_{\text{входу}} = e_0 \cdot \tau_w = 15 \cdot 1617700 \text{ Па} = 24265500 \text{ Па} = 24.266 \text{ МПа}$$

Загальні результати:

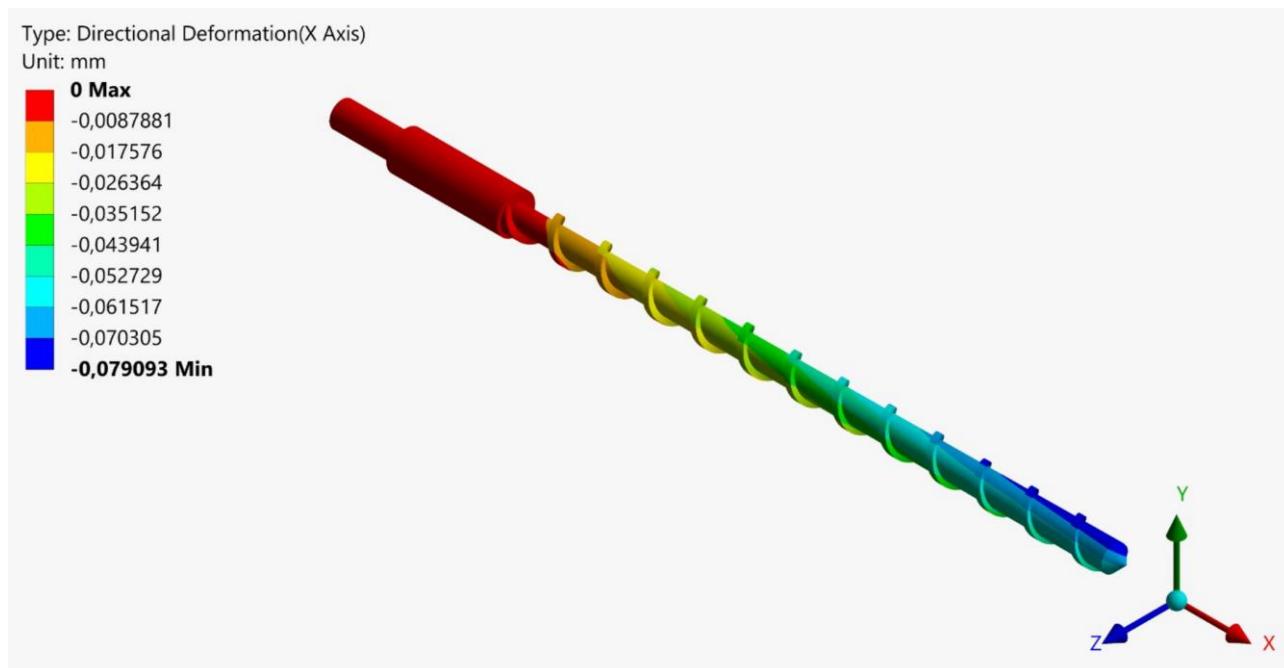
$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{заг}} &= \Delta P_{\text{конуса}} + \Delta P_{\text{циліндра}} + \Delta P_{\text{головки}} = \\ &= 0.200 \text{ МПа} + 6.471 \text{ МПа} + 24.266 \text{ МПа} = 30.937 \text{ МПа} \end{aligned}$$

Висновок: при зменшенні витрати на 17% знижається загальний перепад тиску з 34.48 МПа до 30.94 МПа, тобто на 10,4%. Це значить, що навіть незначне зменшення продуктивності буде обумовлювати сильніше зменшення навантаження на екструдер, тому що це зменшення працює за степеневим законом та змінюється пропорційно.

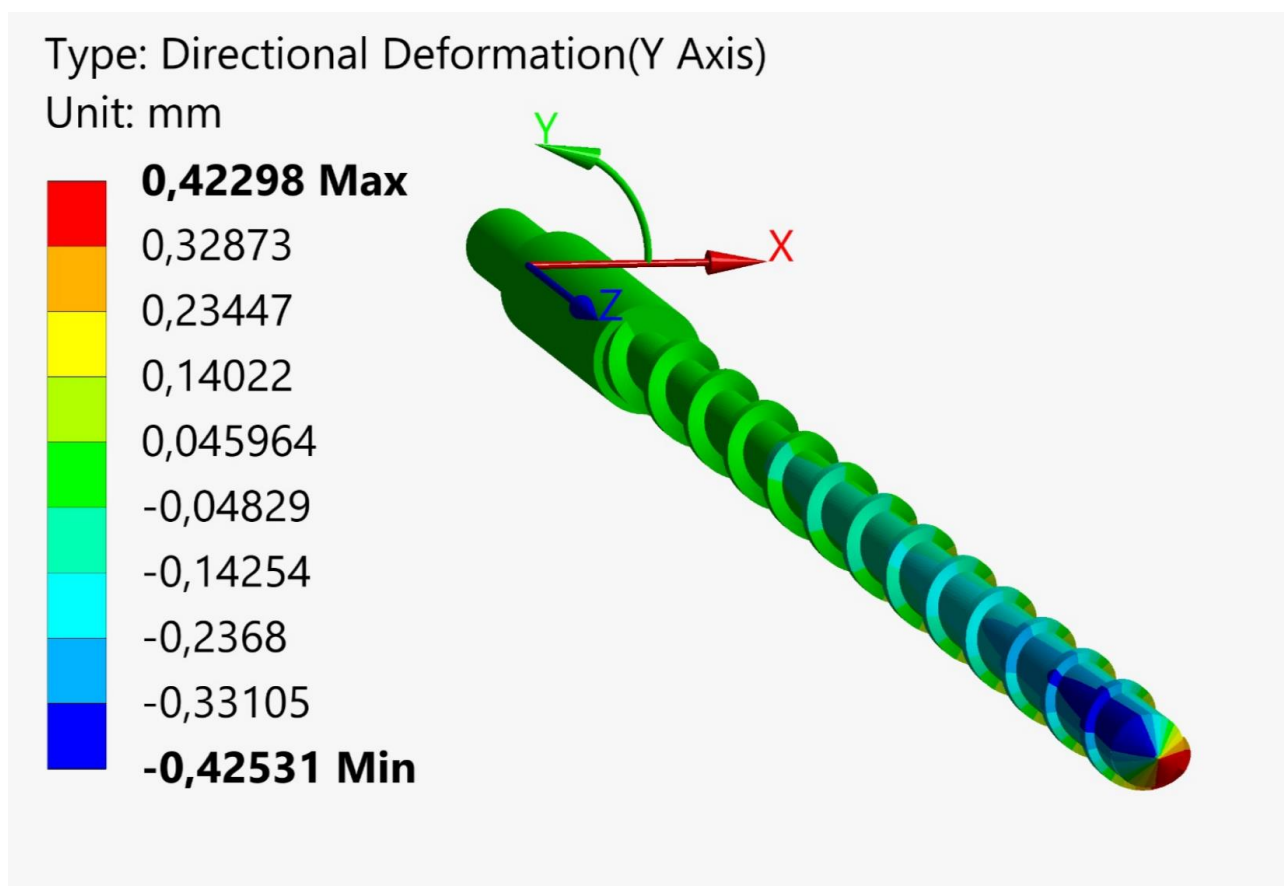
5.5 Розрахунки базового шнеку в системі Ansys



Максимальні еквівалентні напруження по Мізесу складають 80.43 МПа. Коефіцієнт запасу міцності для такого типу конструкції становить 6.34.

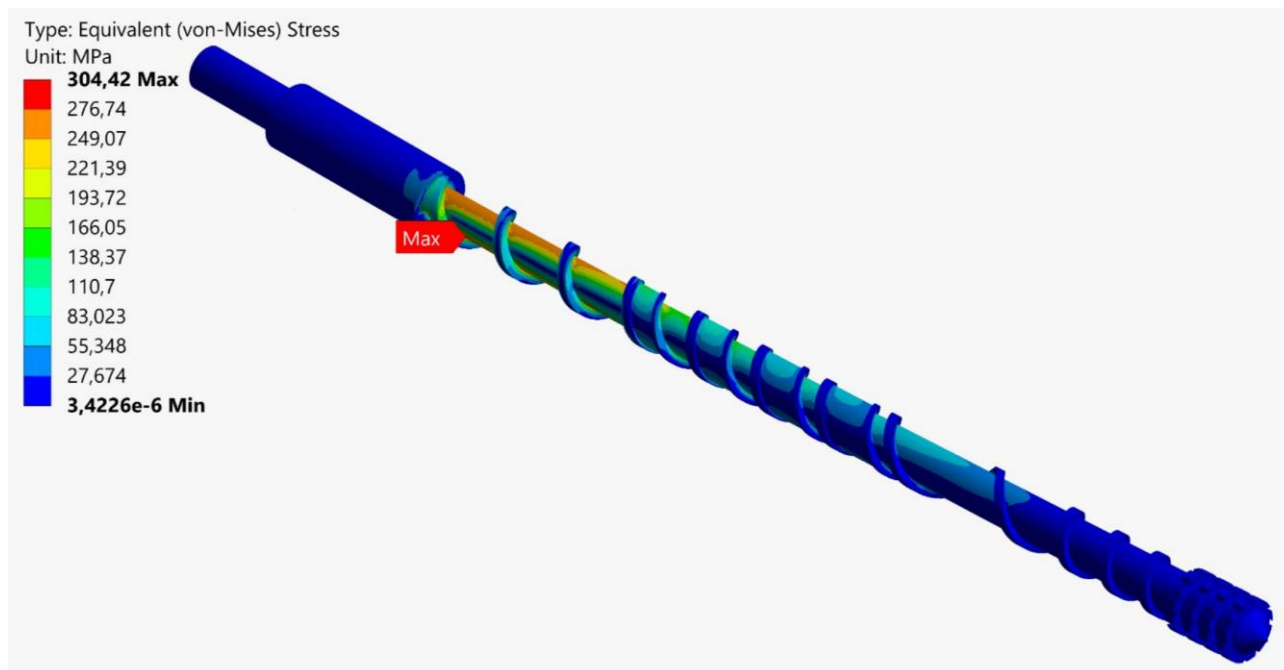


Осьові переміщення (вісь X)

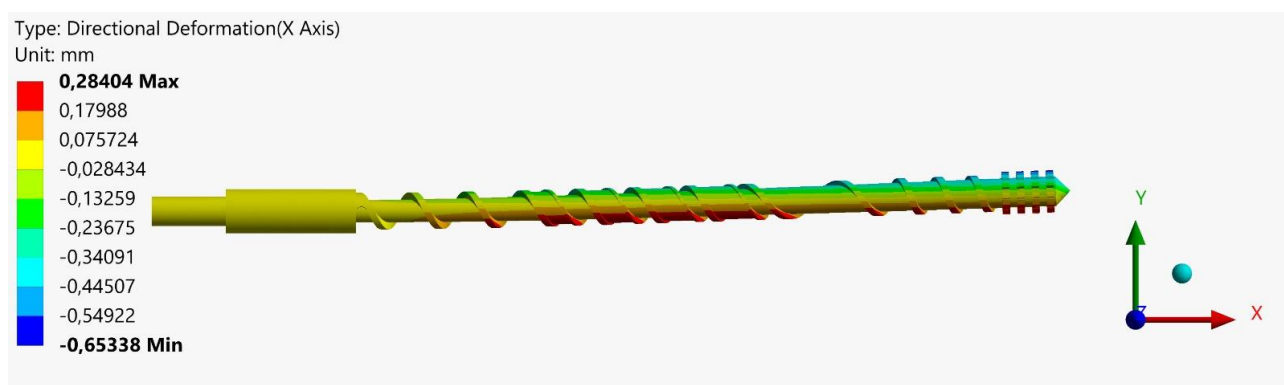


Радіальні переміщення (вісь Y)

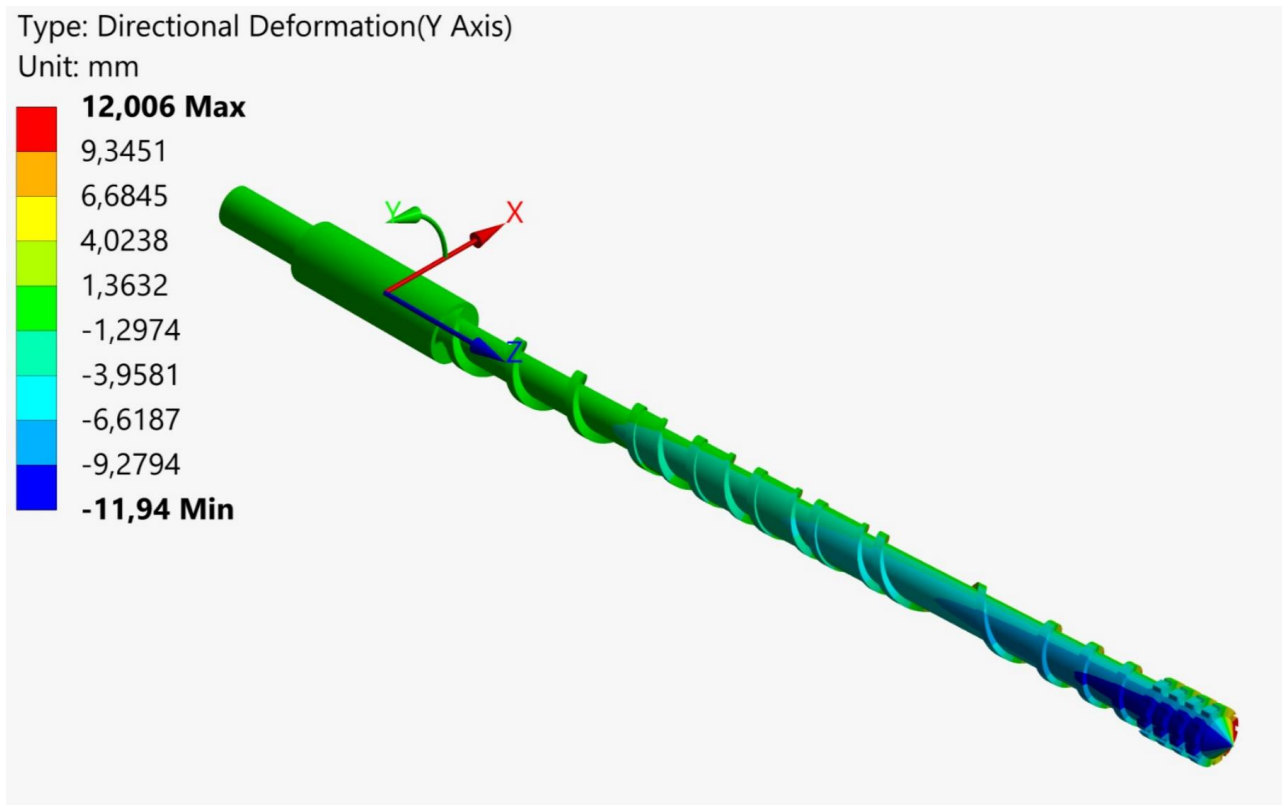
5.6 Розрахунки модернізованого шнеку в системі Ansys



Максимальні еквівалентні напруження по Мізесу складають 304.42 МПа. Коефіцієнт запасу міцності для такого типу конструкції становить 1.67 .



Осьові переміщення (вісь X)



Радіальні переміщення (вісь Y)

5.7 Комплексний термодинамічний та рідинно-динамічний аналіз високопоточної екструзійної головки (LFAM) для полімеру ABS

За габаритами екструзійної головки 3Д-прінтера можна зробити висновок, що ця конструкція є частиною великоформатного адитивного виробництва (LFAM). Тому й аналітичні, теплові та рідино-динамічні розрахунки для неї будуть проводитися із великими значеннями.

Вхідні дані:

Довжина зони плавлення: $L = 209$ мм

Діаметр каналу: $D = 5$ мм

Ключові фізичні константи ABS:

Густина (ρ): 1.05 г/см³

Питома теплоємність (C_p): 1500 кг·К

Теплопровідність (k_{ABS}): 0.15 м·К

Теплопровідність конструкційних металів:

Нагрівальний блок (кована мідь): 380 м·К

Сопло (загартована сталь): 25 м·К

Термобар'єр (нержавіюча сталь): 17 м·К

Рідинно-динамічний аналіз (Втрати тиску)

Необхідно розрахувати перепад тиску (ΔP), необхідний для проштовхування розплаву через канал $D = 5$ мм довжиною $L = 209$ мм при високих потоках, для того щоб визначити механічні обмеження системи.

За формулою, що є модифікацією рівняння Хагена-Пуазейля, визначимо перепад тиску для стаціонарної, ламінарної та повністю розчиненої течії неньютонівської рідини:

$$\Delta P = \frac{2LK}{R} \left(\frac{3n+1}{n} \cdot \frac{\dot{V}}{\pi R^3} \right)^n$$

Де $L = 0.209$ м, $R = 0.0025$ м, $K = 3000$ Па·с^{0.4}, $n = 0.40$.

Для базового потоку у 500 мм³/с та для максимального у 1000 мм³/с проведемо розрахунки.

При об'ємному потоці $\dot{V} = 5 \times 10^{-7}$ м³/с, ефективна швидкість зсуву на стінці, скоригована на неньютонівську поведінку, становить $\dot{\gamma}_{\text{eff}} \approx 560$ с⁻¹.

$$\Delta P_{\text{базовий}} \approx 3.02 \times 10^6 \text{ Па} \approx 3.0 \text{ МПа}$$

При подвоєнні об'ємного потоку до $\dot{V} = 1 \times 10^{-6}$ м³/с, ефективна швидкість зсуву подвоюється до $\dot{\gamma}_{\text{eff}} \approx 1120$ с⁻¹.

$$\Delta P_{\text{max}} \approx 3.91 \times 10^6 \text{ Па} \approx 3.9 \text{ МПа}$$

Комплексний термічний запас та визначення потужності нагрівача

Для плавлення ABS необхідна потужність визначається за необхідною енергією для підвищення температури пластику в 25 градусів, починаючи з комнатної й завершуючи екструзійною 240 градусів. При цих даних різниця температур становить 215 К.

Звідси маємо:

$$\dot{m}_{\text{базовий}} = 1050 \text{ кг/м}^3 \cdot 5 \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с} = 5.25 \times 10^{-4} \text{ кг/с}$$

$$P_{\text{плавлення}} = \dot{m}_{\text{базовий}} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$P_{\text{плавлення}} = 5.25 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \cdot 1500 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)} \cdot 215 \text{ K} \approx 169.1 \text{ W}$$

Розрахункова кондукційна втрата через тепловий бар'єр з нержавіючої сталі при підтримці холодного боку на рівні 50-100 градусів оцінюється як:

$$P_{\text{конд}} \approx 18.0 \text{ W}$$

Ця величина 18.0 W демонструє важливість вибору матеріалу. Якби замість нержавіючої сталі використовувалася б кована мідь $k = 380 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ для виготовлення термобар'єра, $P_{\text{конд}}$ зросла б у рази, спричинивши неминучий тепловий повзучий рух і заклинювання. Таким чином, низька теплопровідність нержавіючої сталі є ключовою для структурної та термічної стабільності LFAM головки.

3.2.2. Втрати Конвекцією ($P_{\text{конв}}$)

Втрати тепла від гарячого блоку Кованої Міді до навколишнього середовища зазвичай моделюються за законом охолодження Ньютона. В умовах природної конвекції (без обдування деталі) типовий коефіцієнт теплообміну h для повітря становить $\text{W/m}^2\text{K}$).

Припускаючи типову площу поверхні гарячого блоку, розрахована втрата становить:

$$P_{\text{конв}} \approx 10.75 \text{ W}$$

$$P_{\text{заг. втрати}} = 18\text{W} + 10.75\text{W} = 28.75\text{W}$$

Мінімальна робоча потужність:

$$P_{\text{min}} = P_{\text{плав}} + P_{\text{втрат}} = 169.1 \text{ W} + 28.75 \text{ W} \approx 198 \text{ W}$$

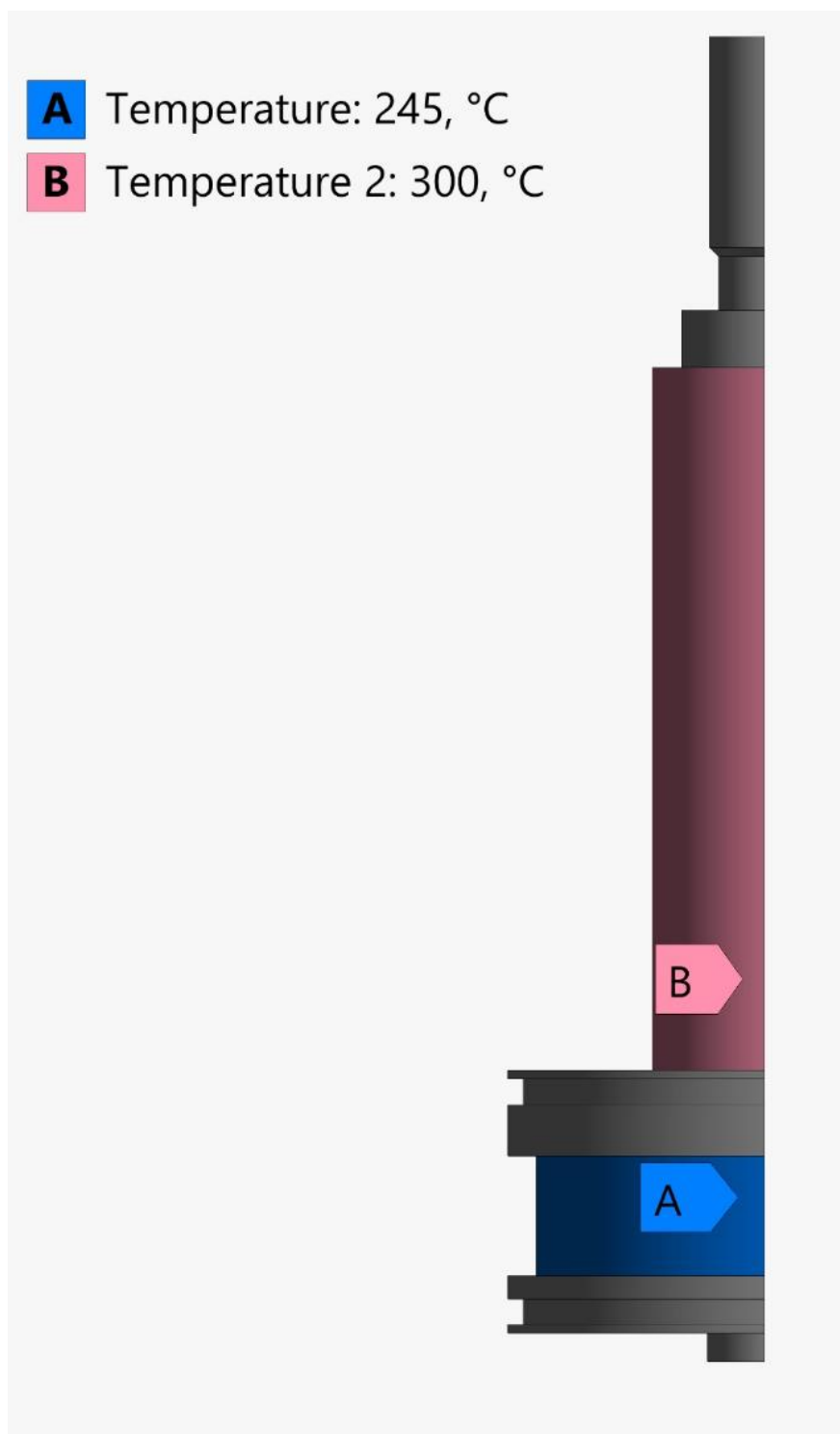
Визначення максимального теплового потоку

$$V_{\text{max, термал}} = \frac{P_{\text{використ}}}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T} = \frac{371.25 \text{ W}}{1050 \text{ kg/m}^3 \cdot 1500 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)} \cdot 215 \text{ K}} \\ \approx 1.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Висновки: Комплексний термодинамічний та рідинно-динамічний аналіз високопотокової екструзійної головки з геометричними параметрами $D=5 \text{ мм}$ та

L=209 мм підтверджує її придатність для LFAM з цільовим об'ємним потоком до 1000 мм⁵/с.

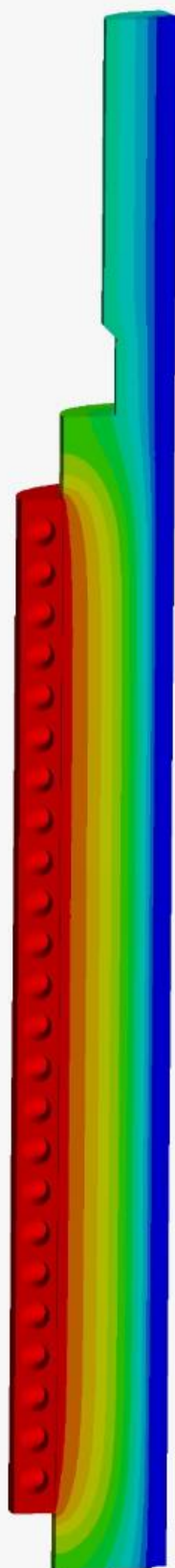
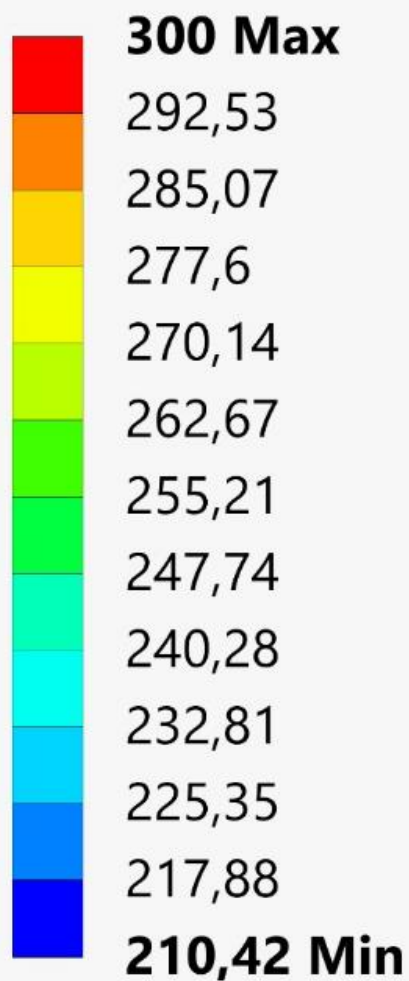
5.8 Теплові розрахунки у Ansys в зонах плавлення філаменту у друкуючій головці



Умови теплового навантаження

Type: Temperature

Unit: °C

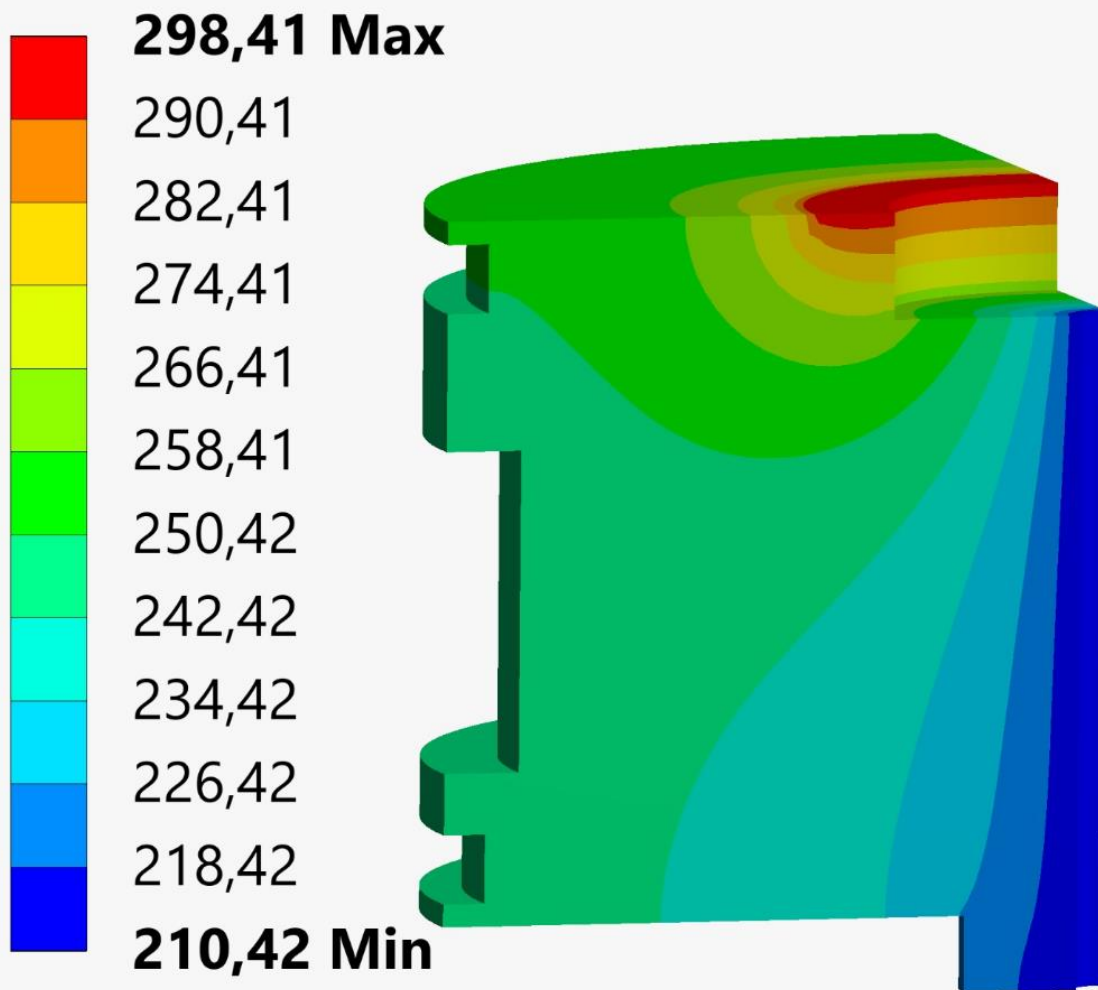


Градiєнт температур від алюмінієвої деталі до сталі

Оскільки теплопровідність алюмінію дуже висока і хороша, нагрівання саме алюмінієвої частини проходить швидко

Type: Temperature

Unit: °C



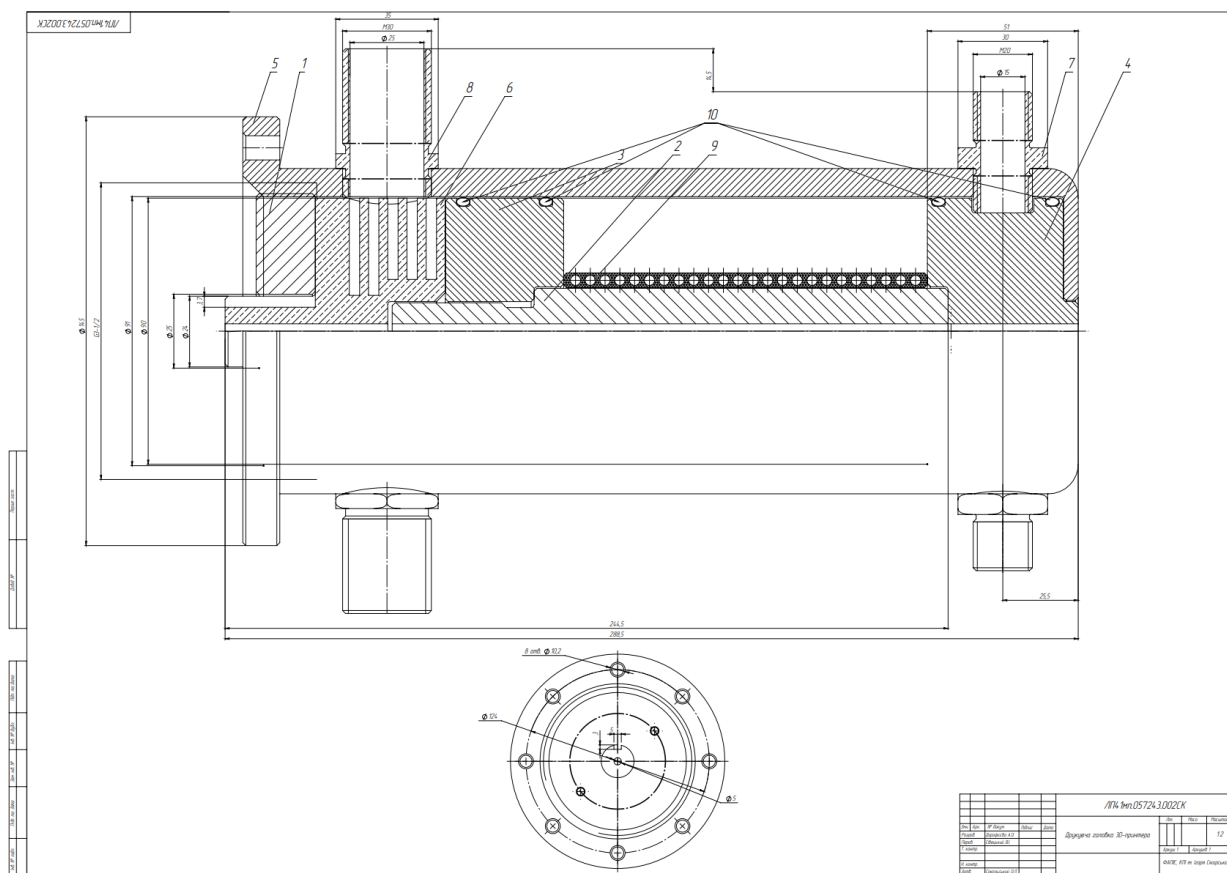
Гradient температур у сталевій деталі. Заброс майже 300 градусів Цельсію зумовлено контактом з алюмінієвою деталлю.

6 СПЕЦІАЛЬНІ РОЗДІЛИ

6.1 Монтаж і експлуатація

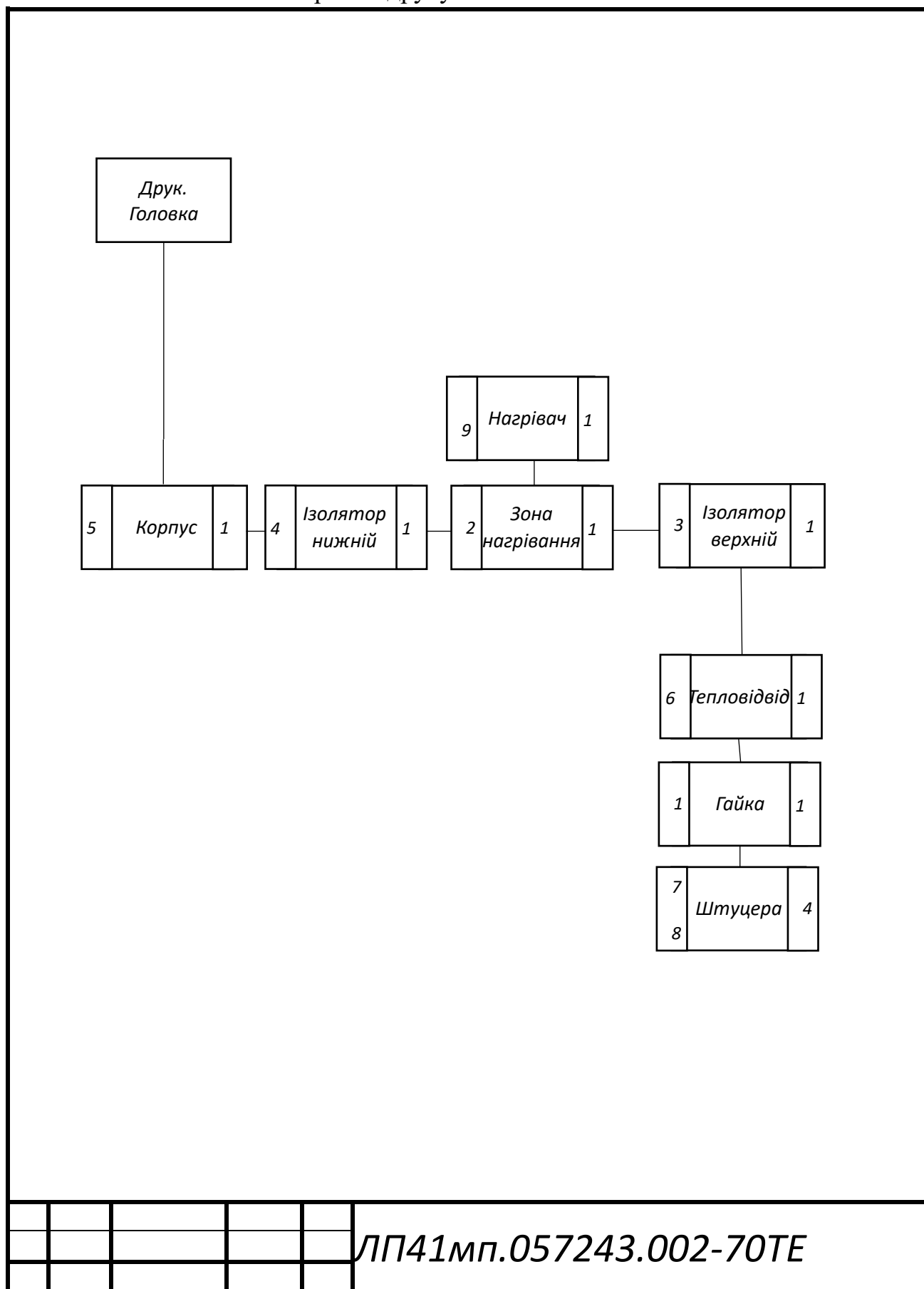
6.1.1 Технологія збирання друкуючої головки

6.1.1.1 Креслення друкуючої головки



[illegible]

6.1.1.3 Блок-схема збирання друкуючої головки

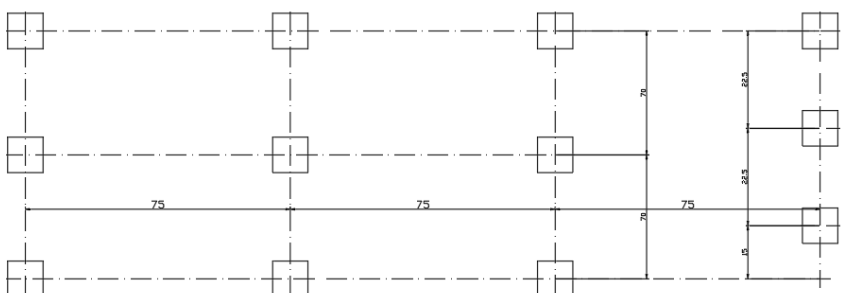


6.1.1.4 Операційна карта збирання друкуючої головки

Інв. справ.	№	Підпис і дата	Взам. Інв. №	Інв № дубл.	Підпис і дата										
						Операційна карта монтажних робіт									
№	Зміст переходу		Тех. режим		К-сть		Пристосування		Інструмент		То, хв				
1	Вставити ізолятор 4 в корпус 5		Ізолятор 4		1		Прокладка гумова								
2	Надіти нагрівач 9 на зону нагрівання 2														
			Зона нагрів. 2		1										
3	Вставити зону нагрівання 2 в корпус 5														
			Зона нагрів. 2		1										
4	Вставити ізолятор 3 зверху на зону нагрівання 2 у корпус 5														
			Ізолятор 3		1		Прокладка гумова								
5	Вставити тепловідвід 6 у корпус 5														
			Тепловідвід 6		1										
											Розробив	Дорофєєва			Арк.
											Перевіри в	Борщук С.О.			1
															Арк.
	Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Н. Контр.				2

6.1.2 Монтаж екструдера

6.1.2.1 План-схема розміщення фундаментних болтів

Інв. справ.	№	Підпис і дата	і	Взам. Інв. №	Інв № дубл.	Підпис і дата					
Карта ескізів  12 колодязів 10x10								Номер операції			
							План розміщення фундаментних болтів				

										Розробив	Дорофеева			Арк.
										Перевіри в	Борщук. С.О.			1
														Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Н. Контр.				1

6.1.2.2 Карта ескізів монтажу екструдера

Застропити, підняти станину з екструдером, встановити фундаментні болти у відповідні отвори станини, надіти шайби. Нагвинтити гайки, станину опустити за місцем.

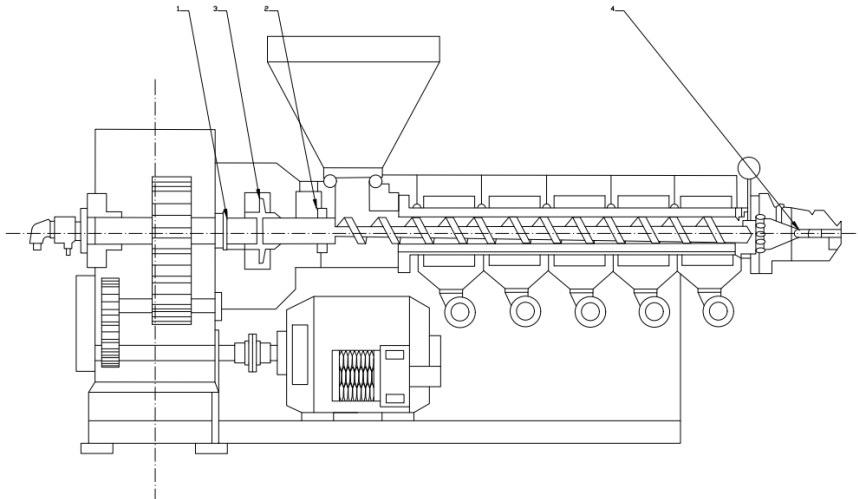
Інв. справ.	№	Підпис і дата	і	Взам. Інв. №	Інв № дубл.	Підпис і дата			

Карта ескізів	Номер операції
Монтаж екструдера	

										Розробив	Дорофеева			Арк.
										Перевіри в	Борщук С.О.			1
														Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Н. Контр.				1

6.1.3.1 Карта змащення

Найменування і позначення виробу, механізму. Номера позицій на малюнку	Найменування змазочних матеріалів	Кількість точок змащування	Спосіб змащування	Періодичність перевірки змащування і заміни змазки
1. Опора валу	Мастило індустріальне УС-3 ГОСТ 3333-80	1	Централізована. Від вузла змащування	Заміна мастила 1 раз на місяць
2. Вузол опірною підшипника	Мастило індустріальне ТАП-15 ГОСТ 3333-80	1	Централізована. Від вузла змащування	Заміна мастила 1 раз на місяць
3. Муфта	Мастило індустріальне УС-3 ГОСТ 3333-80	1	Централізована. Від вузла змащування	Заміна мастила 1 раз на місяць
4. Екструзійна головка	Interflon Paste HT1200 ISO 21469	1	Централізована. Від вузла змащування	Заміна мастила 1 раз на місяць

Інв. справ.	№	Підпис дата	і	Взам. Інв. №	Інв № дубл.	Підпис і дата								
Карта ескізів									Номер операції					
							Змащення екструдера							
														
										Розробив Перевіри в	Дорофеева Борщук. С.О.			Арк.
														1
														Арк.
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата	Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	Н. Контр				1

6.2. Стартап-проект

6.2.1 Розробка стартап-проекту

Стартап-проекти є ключовим елементом сучасної інноваційної економіки, сприяючи розвитку технологій і створенню нових рішень для вирішення актуальних завдань. У контексті зростаючого попиту на екологічно чисту енергію та необхідність зниження впливу на довкілля особливо актуальними стають розробки у сфері виробництва відновлюваних джерел енергії. Одним із таких напрямків є виготовлення лопатей для вітрових турбін з використанням 3D-принтерів.

Даний проект спрямований на створення агрегату для друку лопатей вітрових турбін із застосуванням модернізованого 3D-принтера. Унікальність проекту полягає у використанні двох інноваційних технічних рішень: модернізованого шнека екструдера для переробки PLA-пластику та вдосконаленого сопла для друку армованими волокнами. Такі вдосконалення дозволяють значно покращити якість друку, розширити асортимент матеріалів і знизити собівартість виготовлення.

Проект також спрямований на вирішення глобальних завдань сталого розвитку через впровадження екологічно чистих технологій виробництва та використання матеріалів, що піддаються вторинній переробці. У сучасних умовах такий підхід є важливим для забезпечення економічної стабільності та конкурентоспроможності на ринку.

Розробка агрегату базується на досягненнях у галузі адитивного виробництва та використанні екологічно безпечних матеріалів, що робить проект перспективним і затребуваним у різних секторах промисловості, включаючи енергетику, будівництво та машинобудування.

6.2.1.1 Етапи розроблення стартап-проекту

Розроблення стартап-проєкту включає такі основні етапи:

1. Маркетинговий аналіз:

- Аналіз ринкових можливостей для впровадження агрегату.
- Визначення цільових груп клієнтів і аналіз їх потреб.
- Оцінка конкурентного середовища, включаючи аналіз прямих конкурентів і товарів-замінників.

2. Опис ідеї проєкту:

- Деталізація технічних аспектів модернізацій 3D-принтера.
- Опис основних вигод, які отримують користувачі агрегату.
- Визначення унікальних техніко-економічних переваг проєкту.

3. Технологічний аудит:

- Аналіз існуючих технологій, необхідних для реалізації ідеї.
- Оцінка доступності технологій для авторів проєкту.
- Визначення оптимального шляху технологічної реалізації.

4. Фінансово-економічний аналіз:

- Розрахунок необхідних інвестицій та оцінка їх рентабельності.
- Визначення потенційних ризиків і шляхів їх мінімізації.

5. Розроблення ринкової стратегії:

- Формування стратегії охоплення ринку та позиціонування продукту.
- Розроблення маркетингової програми для просування проєкту.
- Визначення каналів збуту та ключових конкурентних переваг.

6. Комерціалізація проєкту:

- Підготовка інвестиційної пропозиції для залучення інвесторів.

- Планування заходів для впровадження проєкту на ринок.
- Встановлення партнерських зв'язків із потенційними замовниками.

Кожен етап розробки проєкту є важливим для його успішної реалізації та виходу на ринок. Виконання вказаних кроків забезпечує не лише якісний продукт, але й його конкурентоспроможність у динамічних ринкових умовах.

6.2.2 Мета та завдання розділу

Мета даного розділу полягає у формуванні комплексного підходу до створення інноваційного стартап-проєкту, який забезпечить високий рівень конкурентоспроможності продукту на ринку та задовольнить потреби цільової аудиторії. Особливістю проєкту є інтеграція сучасних технологій 3D-друку з використанням інноваційних матеріалів і технічних рішень, які відкривають нові можливості для виготовлення складних конструктивних елементів із мінімальним впливом на довкілля.

Завдання розділу включають:

1. Аналіз ринкових перспектив:
 - Оцінка попиту на продукцію вітрової енергетики.
 - Дослідження конкурентного середовища та визначення сильних і слабких сторін аналогів.
2. Опис інноваційних технічних рішень:
 - Вивчення технічних характеристик модернізованого шнека екструдера.
 - Аналіз функціональних можливостей удосконаленого сопла для друку армованими волокнами.
3. Формування маркетингової стратегії:
 - Розроблення методів позиціонування продукту на ринку.

- Визначення ключових конкурентних переваг і підготовка плану заходів із просування.

4. Фінансово-економічний аналіз:

- Розрахунок вартості впровадження проєкту та оцінка його рентабельності.
- Визначення потенційних ризиків і шляхів їх мінімізації.

5. Розроблення рекомендацій щодо впровадження:

- Підготовка детального плану реалізації проєкту.
- Визначення необхідних ресурсів і строків виконання ключових етапів.

Даний розділ є основою для створення практичної частини магістерської роботи, оскільки містить усі необхідні елементи для оцінки ринкової та технологічної доцільності реалізації стартап-проєкту.

6.2.3 Зміст розділу

6.2.3.1 Опис ідеї проєкту

Проєкт передбачає створення агрегату для друку лопатей вітрових турбін, що включає модернізацію існуючого 3D-принтера для роботи з PLA-пластиком і армованими волокнами. Інновації включають модернізований шнек екструдера для забезпечення рівномірного розплаву матеріалу та вдосконалене сопло, яке запобігає засміченню та підтримує стабільний друк. Основними перевагами є екологічність, економічність та широкий спектр застосування.

Таблиця 6.1. Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Агрегат для друку лопатей	Вітрова енергетика	Економічність, екологічність

Модернізований шнек екструдера	Будівельна індустрія	Якість друку, рівномірність матеріалу
Вдосконалене сопло для армування	Автомобільна та авіаційна промисловість	Стабільність процесу, розширений асортимент матеріалів

У таблиці 6.2 наведено порівняльний аналіз техніко-економічних характеристик ідеї проєкту у співставленні з конкурентами на ринку — компаніями 3DDevice та 3D4U. Аналіз дозволяє визначити сильні (S), слабкі (W) та нейтральні (N) сторони представлених характеристик, що сприяє розумінню ринкової позиції нашого проєкту.

Таблиця 6.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Мій проєкт	3DDevice	3D4U	W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
1	Використання PLA-пластику	Так	Ні	Частково	Початкові витрати	Потреба в сертифікації	Екологічність, економічність
2	Друк армованими волокнами	Так	Ні	Ні	Дорожче обладнання	Невелика кількість виробників	Покращена міцність матеріалів
3	Запобігання засміченню	Так	Ні	Частково	Висока складність обслуговування	Середній рівень надійності	Стабільність друку

	ю сопла				ння		
--	---------	--	--	--	-----	--	--

Проведений аналіз свідчить, що наш проєкт має низку суттєвих переваг у порівнянні з конкурентами. Використання PLA-пластику та друк із застосуванням армованих волокнами матеріалів забезпечує екологічність і підвищену міцність продукції, що є ключовими конкурентними перевагами. Водночас початкові витрати на сертифікацію та вартість обладнання становлять виклики для реалізації проєкту. Порівняно з конкурентами, наш проєкт демонструє стабільність технологічних процесів і потенціал для вдосконалення.

6.2.3.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

Технологічний аудит є важливим етапом оцінки можливості реалізації ідеї стартапу. Він передбачає аналіз наявних технологій, їх доступності та готовності до впровадження в рамках проєкту. У цьому розділі розглядаються ключові аспекти технічної здійсненності ідеї та її відповідність поточним можливостям виробництва.

Основними елементами технологічного аудиту є:

1. Визначення технологій реалізації ідеї: Для реалізації ідеї проєкту було обрано дві основні технології: модернізацію шнека екструдера та вдосконалення сопла для друку армованими волокнами. Обидві технології базуються на сучасних досягненнях у галузі адитивного виробництва.
2. Оцінка наявності технологій:
 - Технологія модернізації шнека екструдера існує, однак потребує адаптації до використання з PLA-пластиком.
 - Технологія друку армованими волокнами через вдосконалене сопло також доступна, але вимагає доопрацювання для забезпечення стабільної роботи обладнання.

3. Доступність технологій:

- Обидві технології доступні авторам проєкту за умови модернізації існуючого обладнання та адаптації до специфічних потреб виробництва лопатей.

Таблиця 6.3. Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№	Ідея проєкту	Технологія реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Друк лопатей із PLA-пластику	Модернізація шнека екструдера	Технологія існує, але потребує адаптації	Доступна, потребує технічної реалізації
2	Друк армованими волокнами	Використання вдосконаленого сопла	Технологія існує, але потребує доопрацювання	Доступна за умови модернізації обладнання

Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: Технології модернізації шнека екструдера та вдосконалення сопла забезпечують технічну здійсненність проєкту за умови адаптації існуючого обладнання.

6.2.3.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Аналіз ринкових можливостей є одним із найважливіших етапів реалізації стартап-проєкту, оскільки дозволяє оцінити потенціал продукту на ринку, визначити цільові сегменти клієнтів і зрозуміти основні фактори, які впливають на конкурентоспроможність проєкту. У цьому розділі представлені такі аспекти:

Таблиця 6.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
----------	-----------------------	----------------

1	Кількість головних гравців, од	10
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	100 млн грн
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Низький рівень конкуренції, потреба в сертифікації
5	Специфічні вимоги до сертифікації	Високі
6	Середня норма рентабельності	15%

Проведений аналіз потенційного ринку стартап-проєкту свідчить про його сприятливі перспективи. Незважаючи на наявність високих вимог до сертифікації та певних обмежень для входу на ринок, загальний обсяг продажів у 100 млн грн і зростаюча динаміка ринку свідчать про значний потенціал для комерціалізації продукту. Кількість головних гравців ринку обмежена (10), що сприяє створенню конкурентних переваг для нового учасника. Середня норма рентабельності в галузі становить 15%, що є привабливим для інвесторів і підприємців. Ці фактори підтверджують доцільність реалізації проєкту з урахуванням належної адаптації до ринкових умов.

Таблиця 6.5 демонструє характеристику потенційних клієнтів стартап-проєкту, що охоплює аналіз їхніх базових потреб, цільових аудиторій, поведінкових особливостей та вимог до товару. Врахування цих аспектів дозволяє глибше зрозуміти запити ринку, а також адаптувати пропозицію продукту для забезпечення максимальної відповідності очікуванням клієнтів.

Таблиця 6.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп	Вимоги споживачів до товару
---	--------------------------	--	--	-----------------------------

			клієнтів	
1	Базова потреба, яку задовольняє товар (згідно концепції потенційного товару)	Виробники вітрових турбін, будівельні компанії	Орієнтація на екологічність, низька собівартість, простота в експлуатації	Висока якість, надійність, відповідність сертифікаціям
2	Зменшення витрат на виготовлення деталей	Інженерні компанії, що займаються виробництвом обладнання	Потреба у зменшенні виробничих витрат, доступність технологій	Низька собівартість, сумісність з існуючим обладнанням

Аналіз показує, що основними цільовими аудиторіями є виробники вітрових турбін, будівельні компанії та інженерні підприємства, які займаються виробничим обладнанням. Вони орієнтовані на екологічність, зниження собівартості та простоту в експлуатації. Висока якість, надійність, відповідність сертифікації та сумісність із існуючим обладнанням є ключовими вимогами до товару. Врахування цих аспектів допоможе створити конкурентоспроможний продукт, який відповідатиме очікуванням споживачів та забезпечить успіх проекту на ринку.

Таблиця 6.6 ілюструє основні фактори загроз для реалізації стартап-проекту, які включають виклики, пов'язані з ринковими умовами, виробничими процесами та законодавчим регулюванням. Аналіз цих загроз дозволяє виявити потенційні ризики та сформулювати стратегії їхнього ефективного подолання.

Таблиця 6.6. Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Висока конкуренція	Значна кількість	Розроблення унікальної

		конкурентів на ринку	пропозиції
2	Технічні труднощі у виробництві	Потреба у вдосконаленні технологій	Інвестування у наукові дослідження
3	Зміни у законодавстві	Нові вимоги до сертифікації	Впровадження відповідності регуляторним нормам

Основними загрозами для проєкту є висока конкуренція, потреба у вдосконаленні технологій та зміни в законодавстві, які стосуються сертифікації. Для мінімізації впливу цих факторів рекомендується розробка унікальної пропозиції, що забезпечить конкурентну перевагу, інвестування у наукові дослідження та впровадження відповідності новим регуляторним нормам. Реалізація таких заходів сприятиме підвищенню стійкості проєкту в умовах динамічного ринку.

Таблиця 6.7 відображає ключові фактори можливостей для реалізації стартап-проєкту. Ці фактори включають зростання інтересу до екологічних технологій, потребу у зниженні собівартості виробництва та можливості державної підтримки. Аналіз цих можливостей сприяє визначенню шляхів розвитку проєкту та посиленню його конкурентоспроможності.

Таблиця 6.7. Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту на екологічні технології	Потреба у сталих рішеннях	Акцент на екологічності продукції
2	Зниження собівартості виробництва	Використання сучасних технологій	Оптимізація виробничих процесів
3	Державна підтримка інновацій	Фінансова підтримка від уряду	Отримання грантів

Результати аналізу демонструють значний потенціал проєкту завдяки зростанню попиту на екологічні рішення та сучасні технології, які сприяють оптимізації виробничих процесів. Додатково, державна підтримка інновацій відкриває фінансові можливості у вигляді грантів, що може значно полегшити впровадження проєкту. Зосередження на екологічності продукції, інноваційності виробничих процесів та використанні державних програм фінансування є стратегічними напрямками для успішного розвитку проєкту.

Таблиця 6.8 демонструє ступеневий аналіз конкуренції на ринку, який враховує особливості конкурентного середовища, рівень конкуренції та їх вплив на діяльність підприємства. Цей аналіз дозволяє визначити сильні та слабкі сторони ринку, що впливають на конкурентоспроможність стартап-проєкту, а також можливості для його подальшого розвитку.

Таблиця 6.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: монополія/олігополія/монополістична/чиста	На ринку переважає олігополія, де кілька великих компаній контролюють більшу частину ринку	Підвищення якості продукції, інноваційність, створення партнерських відносин
2. Рівень конкурентної боротьби: локальний/національний/...	Конкуренція на національному рівні з міжнародними учасниками	Зміцнення бренду, участь у державних програмах підтримки
3. Галузева ознака: міжгалузева/внутрішньогалузева	Внутрішньогалузева конкуренція між	Розробка унікальних технологій для

	виробниками адитивного обладнання	відмінності конкурентів
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-родова/товарно-видова/між бажаннями	Товарно-видова конкуренція з акцентом на специфічні технології друку	Запропонування додаткових послуг і сервісу
5. Характер конкурентних переваг: цінова/нецінова	Нецінова конкуренція через якість і функціональність	Зосередження на інноваціях і довгостроковій надійності
6. Інтенсивність: марочна/не марочна	Марочна конкуренція, де виробники формують сильний бренд	Вкладення у маркетинг і створення позитивного іміджу

Результати аналізу свідчать, що ринок має ознаки олігополії, де значний вплив здійснюють кілька великих компаній. Для успішної реалізації проєкту важливо підвищувати якість продукції, впроваджувати інноваційні рішення та розвивати партнерські відносини. Конкуренція на національному рівні створює умови для брендингу та участі у державних програмах підтримки. Таким чином, орієнтація на інноваційність, екологічність і доступність технологій забезпечить конкурентні переваги проєкту на цьому ринку.

Таблиця 6.9 представляє аналіз конкуренції в галузі за моделлю М. Портера. Цей підхід включає вивчення основних факторів впливу: прямих конкурентів, потенційних конкурентів, постачальників, клієнтів та товарів-замінників. Результати такого аналізу допомагають оцінити інтенсивність

конкурентної боротьби та визначити ключові бар'єри й можливості для успішного входження проєкту на ринок.

Таблиця 6.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Визначення	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загрози з боку замінників
Висновки	Визначити інтенсивність конкурентної боротьби з боку прямих конкурентів	Чи є можливості їх входу в ринок? Чи є потенційні конкуренти? Строки входу їх на ринок	Чи постачальники диктують умови роботи на ринку? Які?	Чи клієнти диктують умови роботи на ринку? Які?	Обмеження для роботи на ринку через товари замінники

Аналіз за М. Портером демонструє, що інтенсивність конкурентної боротьби з боку прямих конкурентів є помірною, однак бар'єри входження на ринок залишаються значними через вимоги до сертифікації та високий рівень очікувань клієнтів. Постачальники та клієнти мають значний вплив на ринок, диктуючи умови роботи. Товари-замінники створюють додатковий фактор загрози, обмежуючи можливості для розширення. Врахування цих аспектів дозволяє сформулювати стратегію адаптації проєкту до ринкових умов і забезпечити конкурентні переваги.

Таблиця 6.10 висвітлює обґрунтування ключових факторів конкурентоспроможності стартап-проєкту. До основних факторів належать інноваційність, екологічність та доступність технологій. Цей аналіз дозволяє визначити, які характеристики проєкту забезпечують його переваги над конкурентами та сприяють успішному впровадженню на ринок.

Таблиця 6.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Інноваційність	Використання нових технологій друку лопатей з PLA і армованими волокнами забезпечує перевагу
2	Екологічність	Використання матеріалів, які переробляються, зменшує екологічний слід
3	Доступність технологій	Можливість впровадження існуючих технологій із мінімальними витратами

Інноваційність проєкту забезпечується використанням передових технологій друку лопатей з PLA і армованими волокнами, що створює значну конкурентну перевагу. Екологічність досягається завдяки використанню матеріалів, які підлягають переробці, що зменшує екологічний слід продукції. Доступність технологій підкреслюється можливістю впровадження інновацій із мінімальними витратами. Врахування цих факторів є важливим для формування стійкої конкурентної позиції на ринку.

Таблиця 6.11 відображає порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту у співвідношенні з конкурентами. Аналіз базується на оцінці ключових факторів конкурентоспроможності: інноваційності, екологічності та доступності технологій. Оцінки (бали) дозволяють виявити позицію проєкту на ринку щодо конкурентів.

Таблиця 6.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Інноваційність	18					+1		
2	Екологічність	20						+2	
3	Доступність технологій	15							+3

Результати аналізу свідчать про значну конкурентну перевагу проекту за всіма факторами. Інноваційність отримала високий бал (18) із позитивним рейтингом (+1) порівняно з конкурентами. Екологічність є найбільш сильним аспектом (20 балів), перевершуючи конкурентів на +2. Доступність технологій (15 балів) також демонструє перевагу над ринковими аналогами (+3). Загалом, проект має потужний потенціал для успішної комерціалізації, завдяки перевагам за всіма ключовими параметрами.

Таблиця 6.12 представляє SWOT-аналіз стартап-проекту, який включає оцінку його сильних і слабких сторін, а також можливостей і загроз у зовнішньому середовищі. Цей аналіз дозволяє комплексно оцінити перспективи проекту, враховуючи як внутрішні характеристики, так і зовнішні чинники впливу.

Таблиця 6.12. SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Висока інноваційність	Початкові високі витрати на впровадження
Екологічність	Необхідність адаптації технологій
Висока якість і стабільність продукту	Складність у підготовці матеріалів
Можливість вторинної переробки матеріалів	Обмежений доступ до деяких ресурсів

Можливості:	Загрози:
Зростання попиту на екологічні технології	Висока конкуренція на ринку
Державна підтримка інновацій	Ризик зміни законодавства
Розширення асортименту продукції	Залежність від постачальників матеріалів
Можливість виходу на міжнародний ринок	Технічні труднощі у масштабуванні

SWOT-аналіз демонструє, що основними сильними сторонами проєкту є висока інноваційність, екологічність, стабільність і можливість переробки матеріалів. Серед слабких сторін виділяються високі початкові витрати на впровадження, складність підготовки матеріалів та обмежений доступ до деяких ресурсів. Можливості для проєкту полягають у зростанні попиту на екологічні технології, державній підтримці інновацій та виході на міжнародний ринок. Основні загрози включають високу конкуренцію, зміни у законодавстві, залежність від постачальників матеріалів та технічні труднощі у масштабуванні. У цілому, проєкт має високий потенціал за умови ефективного управління ризиками та реалізації стратегій адаптації до ринкових умов.

Таблиця 6.13 представляє альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту. Ці варіанти включають співпрацю з державними структурами, залучення приватних інвестицій через краудфандингові платформи та вихід на міжнародні ринки через партнерства. Аналіз цих альтернатив дозволяє визначити найефективніший шлях реалізації проєкту з урахуванням доступних ресурсів і строків реалізації.

Таблиця 6.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

№	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Співпраця з державними структурами для отримання грантів	Висока	6-12 місяців

2	Залучення приватних інвестицій через краудфандингові платформи	Середня	12-18 місяців
3	Вихід на міжнародні ринки через партнерства	Висока	18-24 місяці

Серед альтернатив ринкового впровадження найбільш перспективними є співпраця з державними структурами, яка має високу ймовірність отримання ресурсів у відносно короткі строки (6-12 місяців), та вихід на міжнародні ринки через партнерства, що дозволяє розширити масштаб проєкту в межах 18-24 місяців. Залучення приватних інвестицій через краудфандинг також є важливим варіантом, хоча має середню ймовірність отримання ресурсів і потребує більше часу (12-18 місяців). Обрання стратегії залежить від пріоритетів розвитку проєкту, але використання державної підтримки виглядає найбільш ефективним на початковому етапі.

6.2.3.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Таблиця 6.14 демонструє вибір цільових груп потенційних споживачів для стартап-проєкту. Вона аналізує профіль кожної групи, готовність споживачів сприймати продукт, орієнтовний попит, інтенсивність конкуренції та простоту входу в сегмент. Цей аналіз допомагає визначити найбільш перспективні ринки для реалізації проєкту.

Таблиця 6.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
---	--	---	---	--------------------------------------	--------------------------

1	Малий та середній бізнес, що займається будівництвом	Висока	Значний	Середня	Легка
2	Виробники екологічних рішень	Середня	Середній	Висока	Помірна
3	Освітні установи для проведення наукових досліджень	Висока	Помірний	Низька	Висока

Аналіз показав, що найбільш сприятливими цільовими групами є малий та середній бізнес у будівельній галузі через легкість входу в сегмент та значний попит. Виробники екологічних рішень демонструють середній рівень готовності та високий потенціал розвитку з помірною простотою входу. Освітні установи для наукових досліджень також представляють важливий сегмент, маючи високу готовність до сприйняття продукту, хоча конкуренція у цьому сегменті є найнижчою. Ці висновки дозволяють сконцентрувати маркетингові та виробничі зусилля на найбільш перспективних ринках.

Таблиця 6.15 містить визначення базової стратегії розвитку стартап-проекту. У таблиці представлено три альтернативи розвитку, кожна з яких включає стратегію охоплення ринку, ключові конкурентоспроможні позиції та базову стратегію розвитку. Це дає змогу оцінити, яка стратегія найкраще відповідає цілям проекту та умовам ринку.

Таблиця 6.15. Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до	Базова стратегія розвитку
---	------------------------------	---------------------------	---	---------------------------

	проєкту		обраної альтернативи	
1	Вихід на міжнародний ринок	Сегментоване охоплення	Інноваційність, екологічність, адаптивність	Розширення
2	Залучення приватних інвестицій	Масове охоплення	Доступність, рентабельність	Оптимізація
3	Співпраця з державними структурами	Нішеве охоплення	Технологічність, інноваційність	Інноваційність

Аналіз стратегій розвитку показав, що вихід на міжнародний ринок із сегментованим охопленням є найбільш перспективним варіантом завдяки адаптивності, інноваційності та екологічності. Масове охоплення через залучення приватних інвестицій забезпечує доступність і рентабельність, що сприяє оптимізації витрат. Нішева стратегія охоплення при співпраці з державними структурами дозволяє зосередитись на технологічності та інноваційності, що ідеально підходить для стартового етапу проєкту. Обрання стратегії залежить від доступності ресурсів і бажаного темпу масштабування.

Таблиця 6.16 розкриває базові стратегії конкурентної поведінки стартап-проєкту. Вона аналізує можливості бути «першопрохідцем» на ринку, способи залучення нових споживачів чи перехоплення існуючих у конкурентів, а також імовірність копіювання основних характеристик товарів конкурентів. Це дозволяє визначити оптимальну стратегію для успішного функціонування проєкту на ринку.

Таблиця 6.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проєкт «першопрохідцем»	Чи буде компанія шукати нових	Чи буде компанія копіювати основні	Стратегія конкурентної
---	------------------------------	-------------------------------	------------------------------------	------------------------

	на ринку?	споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	характеристики товару конкурента, і які?	поведінки
1	Так	Шукати нових споживачів	Ні	Інновації
2	Ні	Забирати існуючих споживачів	Частково (цінова політика)	Адаптація

Аналіз показує, що для проєкту доцільно дотримуватись стратегії інновацій як «першопрохідця» на ринку, що дозволить залучити нових споживачів. У разі адаптації до умов ринку стратегія зміщення існуючих клієнтів через цінову політику також може бути ефективною. Поєднання інноваційного підходу та часткової адаптації забезпечує гнучкість і конкурентоспроможність проєкту.

Таблиця 6.17 висвітлює стратегії позиціонування стартап-проєкту з урахуванням вимог до товару цільової аудиторії, обраної базової стратегії розвитку, ключових конкурентних позицій, а також асоціацій, що формують комплексне сприйняття проєкту. Аналіз цих елементів допомагає визначити оптимальний підхід до формування бренду та ринкового іміджу.

Таблиця 6.17. Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап- проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту
1	Екологічність, доступність, якість	Розширення	Висока екологічність, доступність, стабільність	Екологія, Інновації, Надійність

2	Інноваційність, гнучкість	Інноваційність	Швидка адаптація до змін ринку, унікальність	Технології, Прогрес, Висока якість
---	---------------------------	----------------	--	------------------------------------

Визначення стратегій позиціонування показало, що основними акцентами мають бути екологічність, доступність, стабільність, інноваційність та унікальність. Стратегія розширення сприятиме задоволенню потреб широкої аудиторії, тоді як інноваційний підхід забезпечить адаптивність до змін ринку та створення довготривалого конкурентного іміджу.

6.2.3.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Таблиця 6.18 містить визначення ключових переваг концепції потенційного товару, які задовольняють основні потреби цільової аудиторії. У фокусі аналізу — екологічність, ефективність та доступність, що сприяють формуванню унікальних конкурентних переваг на ринку.

Таблиця 6.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Екологічність	Зменшення екологічного сліду	Використання матеріалів, що повністю переробляються
2	Ефективність	Швидкий і точний процес друку	Інноваційні технології забезпечують високу якість
3	Доступність	Конкурентна ціна при високій якості	Економія матеріалів завдяки оптимізації технологій

Результати аналізу демонструють, що використання екологічних матеріалів, інноваційних технологій друку та оптимізації процесів забезпечує

конкурентну ціну і високу якість продукту. Ці фактори дозволяють не лише зменшити екологічний слід, але й ефективно позиціонувати товар як інноваційний і доступний на ринку.

Таблиця 6.19 відображає три рівні моделі товару: задум, реальне виконання та підтримка. Вона демонструє, як продукт відповідає потребам споживачів, забезпечує високий рівень якості та надійності, а також пропонує унікальні переваги у порівнянні з конкурентами.

Таблиця 6.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівень товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Задоволення базової потреби споживача у надійних, екологічних та функціональних лопатях для вітрогенераторів.
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики: - Механічна міцність: 500 МПа - Вага: 25 кг - Екологічний матеріал: PLA + армовані волокна Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування тощо Пакування: Картонна коробка з вторинної сировини з логотипом компанії Марка: назва організації-розробника + назва товару.
III. Товар із підтримкою	Передпродажний супровід: консультації з вибору моделі Післяпродажний супровід: гарантійне обслуговування 2 роки, технічна підтримка.
Післяпродажна підтримка	За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання
1. Використання унікальних екологічних матеріалів.	Унікальність матеріалів і патентування забезпечують конкурентну перевагу.
2. Інноваційність технології виробництва.	Авторські права та захист інноваційних рішень.
3. Захист авторських прав та патентування розробок.	Правове регулювання використання технологій.

Аналіз моделі товару показує, що поєднання екологічних матеріалів, високих технічних характеристик та комплексної післяпродажної підтримки забезпечує унікальність продукту. Водночас використання авторських прав і патентування сприяє захисту розробок та створенню конкурентних переваг на ринку.

Таблиця 6.20 представляє межі встановлення ціни на товар залежно від ринкових умов, включаючи рівні цін на товари-замінники, аналоги та доходи цільової групи споживачів. Вона допомагає визначити оптимальні цінові діапазони, що забезпечують конкурентоспроможність і дохідність.

Таблиця 6.20. Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Високий	Середній	Середній	Від 1000 до 1500 грн
2	Середній	Низький	Високий	Від 800 до 1200 грн
3	Низький	Високий	Низький	Від 500 до 900 грн

Аналіз показує, що для різних рівнів ринку та доходів цільової аудиторії можливі цінові діапазони від 500 до 1500 грн. Встановлення ціни враховує співвідношення між якістю товару, доходами споживачів і ринковою конкуренцією, що сприяє задоволенню потреб різних сегментів ринку.

Таблиця 6.21 розкриває специфіку формування системи збуту для стартап-проекту, враховуючи закупівельну поведінку цільових клієнтів, функції збуту, які мають виконувати постачальники, а також глибину каналу збуту. Це дозволяє розробити оптимальні канали реалізації продукції.

Таблиця 6.21. Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових	Функції збуту, які має виконувати	Глибина каналу	Оптимальна система збуту
---	--	-----------------------------------	----------------	--------------------------

	клієнтів	постачальник товару	збуту	
1	Прямі закупівлі великими компаніями	Надання технічної підтримки	Короткий канал збуту	Прямий продаж
2	Закупівлі через посередників середніми та малими підприємствами	Логістика, консультації	Середній канал збуту	Через дистриб'юторів
3	Інтернет-замовлення окремими споживачами	Онлайн-консультації, доставка	Довгий канал збуту	Продаж через інтернет-магазини

Визначено три основні канали збуту: прямий продаж для великих компаній, дистриб'юторська система для середнього та малого бізнесу, а також онлайн-замовлення для окремих споживачів. Кожен канал адаптований до специфічних потреб і поведінки клієнтів, що забезпечує ефективне охоплення ринку та максимізацію продажів.

Таблиця 6.22 презентує концепцію маркетингових комунікацій, спрямовану на ефективне донесення інформації до цільової аудиторії. Враховано специфіку поведінки клієнтів, використовувані канали комунікацій, ключові позиції для позиціонування, завдання рекламних повідомлень і їх концепції.

Таблиця 6.22. Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
---	---------------------------------------	--	--	----------------------------------	--------------------------------

1	Клієнти шукають екологічно чисті технології	Соціальні мережі, спеціалізовані форуми	Екологічність, ефективність	Підкреслити переваги матеріалів	«Захищай природу разом із сучасними рішеннями!»
2	Бізнес, що займається інноваційними рішеннями	Галузеві виставки, семінари	Інноваційність, надійність	Залучити увагу до нових технологій	«Майбутнє починається вже сьогодні!»
3	Навчальні заклади для наукових досліджень	Освітні платформи, партнерські програми	Унікальність, адаптивність	Просунути можливості для навчання	«Навчайся та вдосконалюй з нами!»

Для кожної цільової аудиторії розроблено відповідний підхід: соціальні мережі для екологічно свідомих клієнтів, галузеві виставки для бізнесу, та освітні платформи для наукових установ. Це забезпечує різносторонню взаємодію з клієнтами, підкреслюючи екологічність, інноваційність та унікальність продукції.

6.2.4 Висновки

Проведений аналіз демонструє, що стартап-проект має значний потенціал для ринкової комерціалізації. Згідно з результатами дослідження, попит на екологічні та інноваційні технології на ринку демонструє позитивну динаміку, а рентабельність роботи в галузі є прийнятною для успішного впровадження проекту.

Оцінка перспектив впровадження свідчить про наявність потенційних груп клієнтів, які зацікавлені у використанні продукції проекту. Бар'єри входження на ринок є помірними, що дозволяє реалізувати

конкурентоспроможний продукт із врахуванням потреб клієнтів. Аналіз конкуренції та конкурентоспроможності проєкту підтверджує можливість успішного позиціонування на ринку завдяки використанню унікальних матеріалів та інноваційних технологій.

За результатами розгляду можливих альтернатив впровадження, найбільш доцільним варіантом є співпраця з державними структурами для отримання грантів та подальше розширення ринків збуту через партнерські програми та вихід на міжнародні ринки. Цей підхід забезпечує високі шанси на реалізацію проєкту з мінімальними фінансовими ризиками.

Таким чином, подальша імплементація проєкту є доцільною, враховуючи перспективи ринкової реалізації та можливість масштабування у майбутньому. Стартап-проєкт відповідає сучасним тенденціям розвитку технологій, що робить його актуальним та конкурентоспроможним.

6.3 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

Охорона праці спрямована на створення умов, що запобігають травмам, професійним захворюванням, аваріям, пожежам, а також забезпечують безпеку працівників під час виконання робіт. Ця діяльність передбачає розробку та реалізацію комплексу заходів, які усувають потенційні загрози на виробництві. Основою для організації таких заходів є Закон України "Про охорону праці", прийнятий 14 жовтня 1992 року Верховною Радою України. Цей нормативний акт гарантує право працівників на безпечні умови праці, визначає стандарти безпеки на підприємствах та регулює відносини у сфері охорони праці. Дотримання положень цього закону сприяє зменшенню кількості травм і покращенню умов роботи.

У межах дипломного проєкту "Агрегат для друку лопатей з модернізацією 3D-принтера" були передбачені заходи, що забезпечують безпеку роботи персоналу, який експлуатує обладнання в машинобудівній галузі. Всі умови

відповідають державним стандартам, галузевим вимогам та санітарним нормам, що спрямовані на захист здоров'я та безпеки працівників.

Недотримання правил техніки безпеки, вимог виробничої санітарії чи норм пожежної безпеки може стати причиною травм, професійних хвороб, аварій або пожеж. Помилки у проєктуванні обладнання чи недотримання норм безпеки нерідко призводять до серйозних інцидентів на виробництві. Тому інтеграція питань охорони праці в процеси проєктування технологічного обладнання та виробництв є важливим елементом будь-якого інженерного рішення.

Для зменшення ймовірності травмувань на виробництві було проаналізовано умови роботи, у ході чого визначено ключові небезпечні фактори, які виникають під час експлуатації одночерв'ячного екструдера для друку термопластичних виробів. Основними ризиками є можливість ураження електричним струмом, пожежонебезпека, надмірний рівень шуму та недостатня освітленість робочої зони. Робочий процес здійснюється у приміщенні площею 100 м² і об'ємом 1200 м³, що враховано для забезпечення необхідних санітарно-гігієнічних вимог і безпечного середовища.

6.3.1 Електробезпека

Електробезпека в умовах експлуатації агрегату для друку лопатей з модернізацією 3D-принтера забезпечується шляхом виконання вимог щодо роботи з електрообладнанням. Основними джерелами потенційної небезпеки є електричні нагрівальні елементи, силові кабелі, двигун екструдера та системи автоматичного керування. Для зменшення ризику ураження електричним струмом передбачено використання захисного заземлення всіх елементів обладнання, яке забезпечує відведення струму у разі його витoku. Робота агрегату відбувається під напругою 380 В, що вимагає суворого дотримання правил експлуатації.

У конструкції агрегату застосовуються кабелі з подвійною ізоляцією, які відповідають сучасним стандартам безпеки та термостійкості. Усі електричні

вузли оснащені автоматичними пристроями захисту, такими як пристрої захисного вимкнення (ПЗВ), що спрацьовують при короткому замиканні або перевантаженні. Для забезпечення стабільної роботи використовуються електронні реле струму, які відключають обладнання при витоку струму понад 30 мА. Також встановлено датчики температури, що дозволяють контролювати роботу нагрівальних елементів і запобігати перегріванню.

Для безпечної експлуатації агрегату персонал зобов'язаний використовувати засоби індивідуального захисту, зокрема діелектричні рукавички, спеціальне взуття та гумові килимки на робочих місцях. Робочі місця операторів обладнуються щитами з ізолюючими матеріалами, що зменшує ймовірність випадкового контакту з струмоведучими частинами.

Перед початком роботи обов'язково проводиться перевірка стану електрообладнання, включаючи тестування опору ізоляції, який має перевищувати 1 МОм, та справності заземлювальних пристроїв. Регулярне технічне обслуговування передбачає перевірку всіх електричних з'єднань, діагностику автоматичних захисних систем та контроль напруги у мережі, яка не повинна відхилятися від номінального значення більше ніж на $\pm 10\%$.

Дотримання цих заходів дозволяє уникнути аварійних ситуацій, зберегти працездатність обладнання та забезпечити безпечні умови праці для операторів.

6.3.2 Повітря робочої зони

Забезпечення якості повітря у робочій зоні є одним із ключових факторів для збереження здоров'я персоналу та підвищення безпеки праці під час експлуатації агрегату для друку лопатей. Основними джерелами потенційного забруднення повітря є продукти термічної деструкції матеріалів, зокрема термопластичних смол, а також пил, що утворюється при обробці полімерів.

Згідно з державними стандартами України, вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК). Для матеріалів, які використовуються в екструдері,

наприклад, поліетилену або PLA, ГДК становить не більше 10 мг/м³ для пилю полімерів та не більше 5 мг/м³ для летких органічних сполук. Температура повітря у приміщенні повинна підтримуватися в межах 18–25°C, а відносна вологість – на рівні 40–60%.

Для досягнення необхідних показників чистоти повітря у приміщенні встановлюється система загальнообмінної вентиляції із забезпеченням трикратного повітрообміну за годину. У зонах роботи з нагрівальними елементами передбачено локальні витяжні пристрої, які видаляють продукти розкладу матеріалів безпосередньо від джерела їхнього утворення. Для додаткової очистки повітря застосовуються фільтри, що утримують дрібнодисперсний пил і леткі речовини.

Моніторинг стану повітря здійснюється за допомогою автоматичних датчиків, що контролюють вміст шкідливих речовин, температуру і вологість. У разі перевищення нормативів система вентиляції працює у посиленому режимі, забезпечуючи ефективне видалення забруднень.

Дотримання цих заходів дозволяє забезпечити відповідність повітря робочої зони санітарним нормам, створити комфортні умови для роботи персоналу та знизити ризик виникнення професійних захворювань.

6.3.3 Виробничий шум

Рівень шуму у виробничих приміщеннях є важливим фактором, що впливає на комфорт і здоров'я персоналу під час роботи з агрегатом для друку лопатей. Основними джерелами шуму є двигун екструдера, вентилятори системи охолодження, робота нагрівальних елементів і система автоматичного керування. Надмірний рівень шуму може спричиняти зниження продуктивності праці, втому, стрес і, у разі тривалого впливу, професійні захворювання слуху.

Згідно з чинними нормами Державних санітарних правил України, допустимий рівень шуму у робочій зоні не повинен перевищувати 80 дБ для

постійного шуму та 110 дБ для короткочасного впливу. Для забезпечення відповідності цим нормам в агрегаті використовуються шумознижувальні заходи, такі як спеціальні звукоізолювальні кожухи для двигуна та нагрівальних елементів, які знижують рівень шуму на 10–15 дБ.

Також встановлюються антивібраційні елементи під час монтажу агрегату, що запобігають передаванню механічних коливань на підлогу та інші конструкції приміщення. Робочі місця операторів обладнуються звукопоглинаючими екранами, що локально знижують рівень шуму у зоні роботи.

Моніторинг рівня шуму здійснюється за допомогою портативних шумомірів, які регулярно використовуються для перевірки відповідності нормативам. У разі перевищення допустимих значень приймаються додаткові заходи, наприклад, збільшення звукоізоляції або корекція режимів роботи обладнання.

Працівники забезпечуються засобами індивідуального захисту, такими як шумозахисні навушники або вкладиші, що знижують вплив шуму на слух. Ці заходи дозволяють зменшити негативний вплив виробничого шуму на здоров'я персоналу, забезпечити комфортні умови праці та зберегти продуктивність операторів.

6.3.4 Освітлення на робочих місцях

Якісне освітлення на робочих місцях є важливим фактором для забезпечення комфортних умов праці, підвищення продуктивності та зменшення ризиків травмування персоналу. У процесі роботи з агрегатом для друку лопатей необхідно забезпечити оптимальний рівень освітленості, що відповідає чинним санітарним нормам.

Згідно з вимогами Державних будівельних норм (ДБН) України, рівень освітленості у виробничих приміщеннях для точних робіт має бути не менше ніж 500 лк. Для досягнення таких показників у робочій зоні встановлюються світлодіодні лампи, які забезпечують рівномірне освітлення без мерехтіння та знижують навантаження на зір.

Робочі місця операторів обладнуються локальними джерелами світла з регульованою яскравістю та направленим світловим потоком, що дозволяє уникнути утворення тіней у зоні роботи. Загальне освітлення приміщення організоване таким чином, щоб мінімізувати контраст між яскраво освітленими та темними зонами, що знижує втому очей.

Світильники захищені від пилу та вологи відповідно до класу захисту не нижче IP54, що забезпечує їхню надійність у виробничих умовах. Для зменшення витрат електроенергії та підвищення ефективності використовується система автоматичного керування освітленням, яка регулює його інтенсивність залежно від рівня природного світла.

Контроль стану освітлення здійснюється регулярно за допомогою люкметрів, які перевіряють відповідність нормативним показникам. У разі зниження рівня освітленості через зношення ламп або забруднення світильників проводиться їхня заміна або очищення.

Дотримання цих заходів сприяє створенню комфортних умов праці, зменшує навантаження на зір працівників та підвищує безпеку під час експлуатації обладнання.

6.3.5 Пожежна безпека

Забезпечення пожежної безпеки при експлуатації агрегату для друку лопатей є критично важливим завданням, оскільки робоча температура нагрівальних елементів досягає 170°C , а залишки полімерних матеріалів, таких як термопластичні смоли, можуть загорятися при температурі понад 250°C . Для мінімізації ризику пожежі всі елементи конструкції виготовляються з негорючих або важкогорючих матеріалів, а кабелі мають вогнетривку ізоляцію, яка витримує нагрівання до 200°C без втрати ізоляційних властивостей.

Приміщення, де розташований агрегат, обладнане системою загальнообмінної вентиляції, яка забезпечує триразовий повітрообмін за годину, що запобігає накопиченню горючих парів і забезпечує стабільний повітряний потік при температурі $18\text{--}25^{\circ}\text{C}$. Локальні витяжки ефективно видаляють тепле повітря та продукти термічної деструкції безпосередньо з робочої зони, що дозволяє уникнути утворення горючих сумішей у приміщенні.

Для гасіння пожеж у приміщенні передбачено використання порошкових вогнегасників об'ємом 5 кг, які розташовані на відстані не більше 10 метрів від робочих місць. Обладнання підключене до автоматичної системи живлення, яка вимикає електропостачання у разі короткого замикання або підвищення температури вище 200°C у критичних точках. Кабельні траси додатково захищені ізоляційними кожухами, що знижує ризик іскроутворення при механічних пошкодженнях.

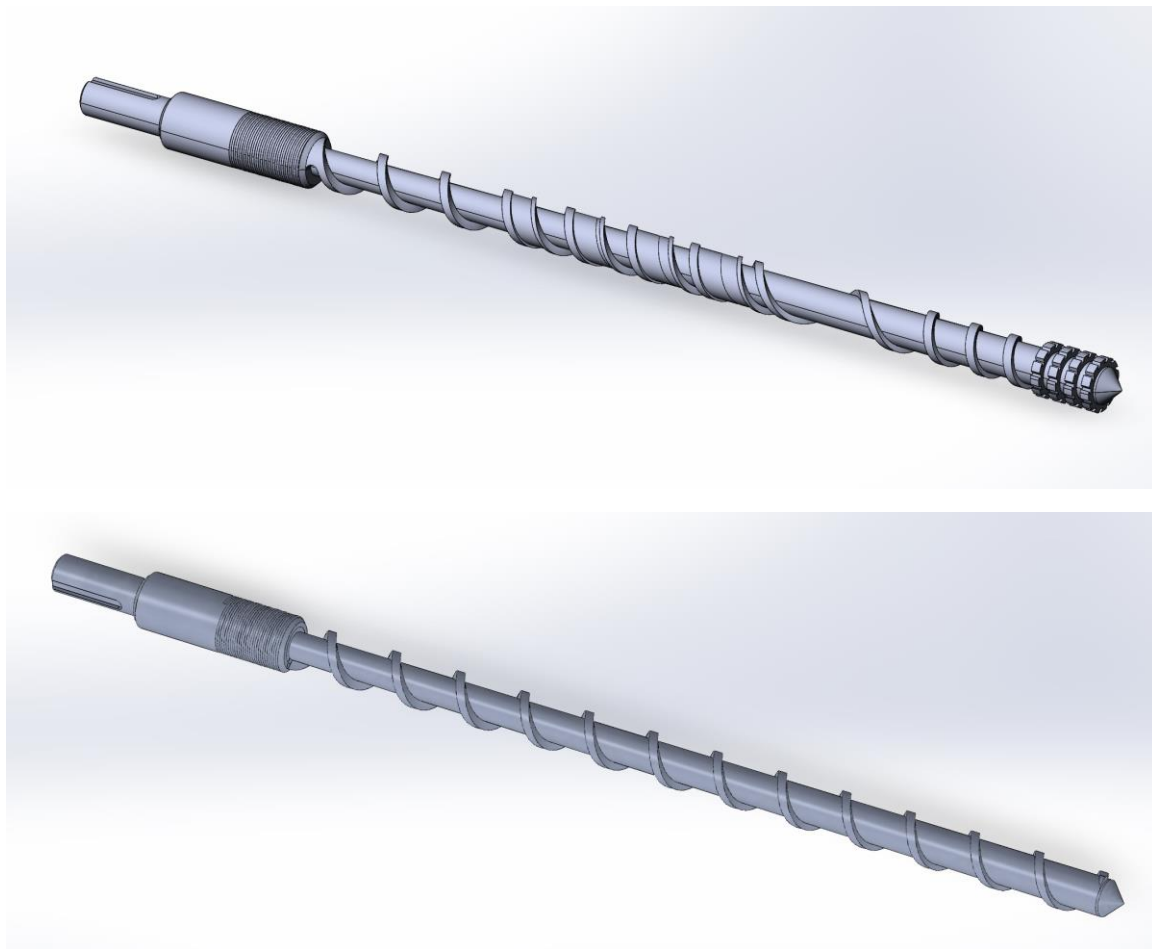
Агрегат розміщений на відстані не менше ніж 1,5 метра від легкозаймистих матеріалів і стін, а планування приміщення передбачає наявність аварійних виходів, які залишаються вільними для швидкої евакуації. Температура навколишніх поверхонь поблизу нагрівальних елементів не повинна перевищувати 40°C , що досягається завдяки використанню теплоізоляційних матеріалів у конструкції обладнання.

Персонал регулярно проходить інструктаж із пожежної безпеки, включаючи правила використання вогнегасників та порядок дій у разі пожежі.

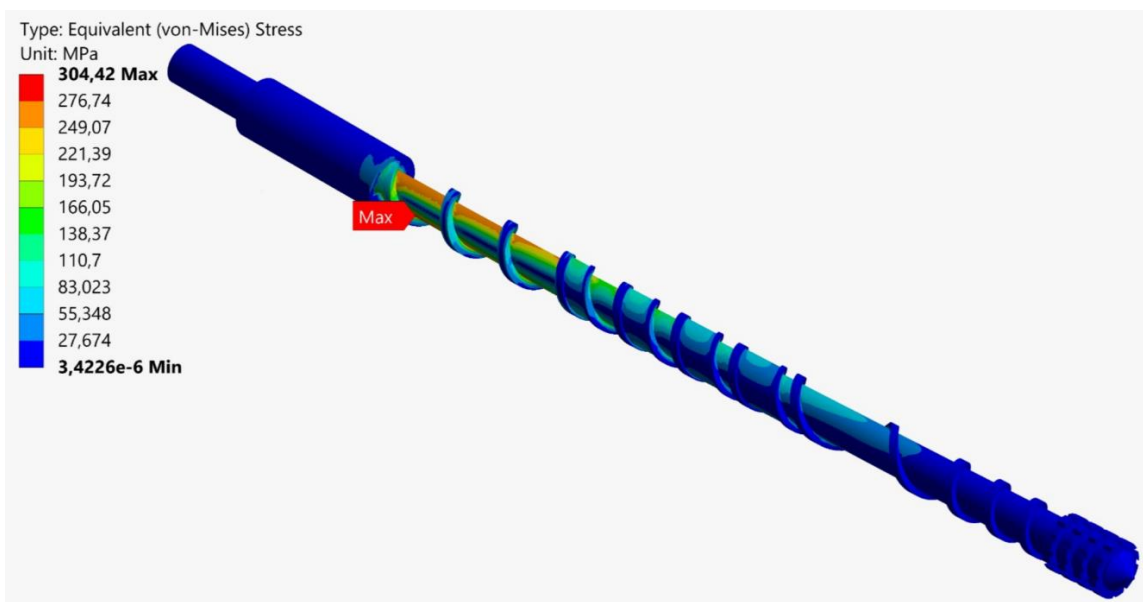
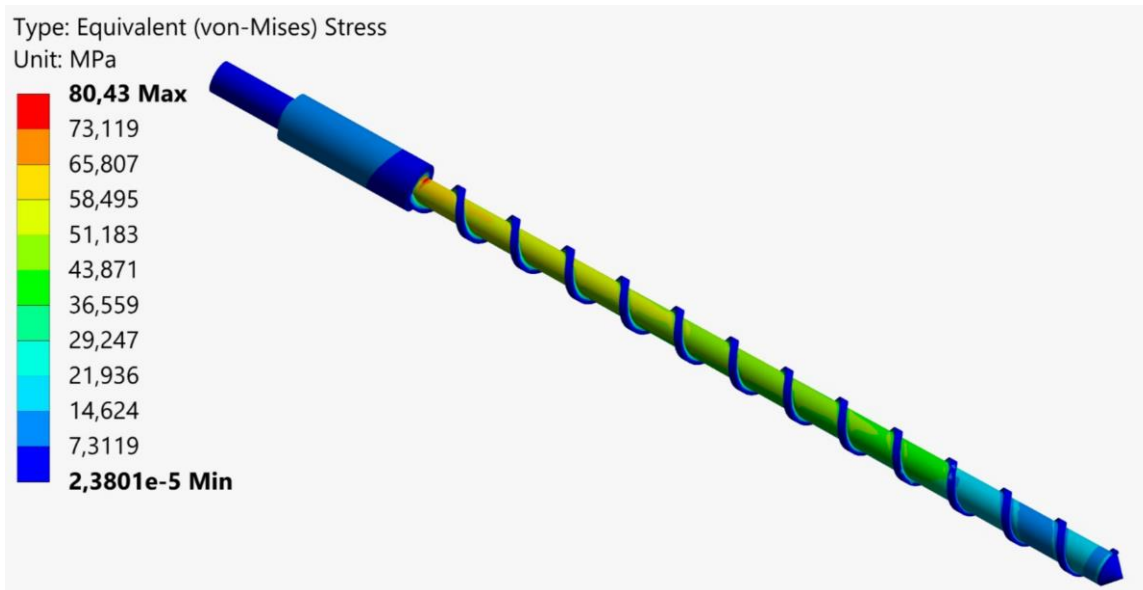
Планові перевірки включають оцінку стану вентиляційної системи, тестування вогнегасників і огляд обладнання, щоб гарантувати відповідність протипожежним нормам. Ці заходи дозволяють мінімізувати ризик виникнення пожежі, створити безпечне робоче середовище та забезпечити оперативне реагування у разі надзвичайної ситуації.

7 АНСІС

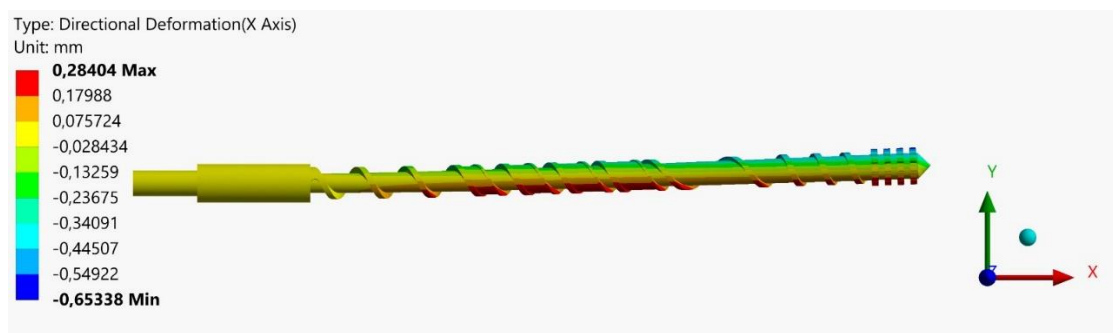
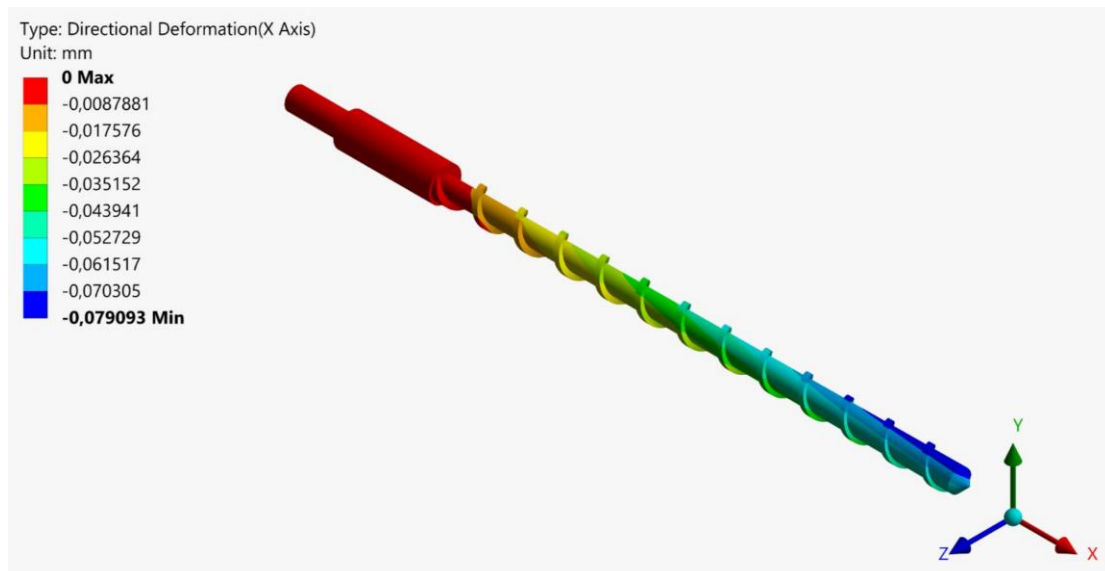
7.1 Розробка 3D-моделей базової та модернізованої деталі та вузла



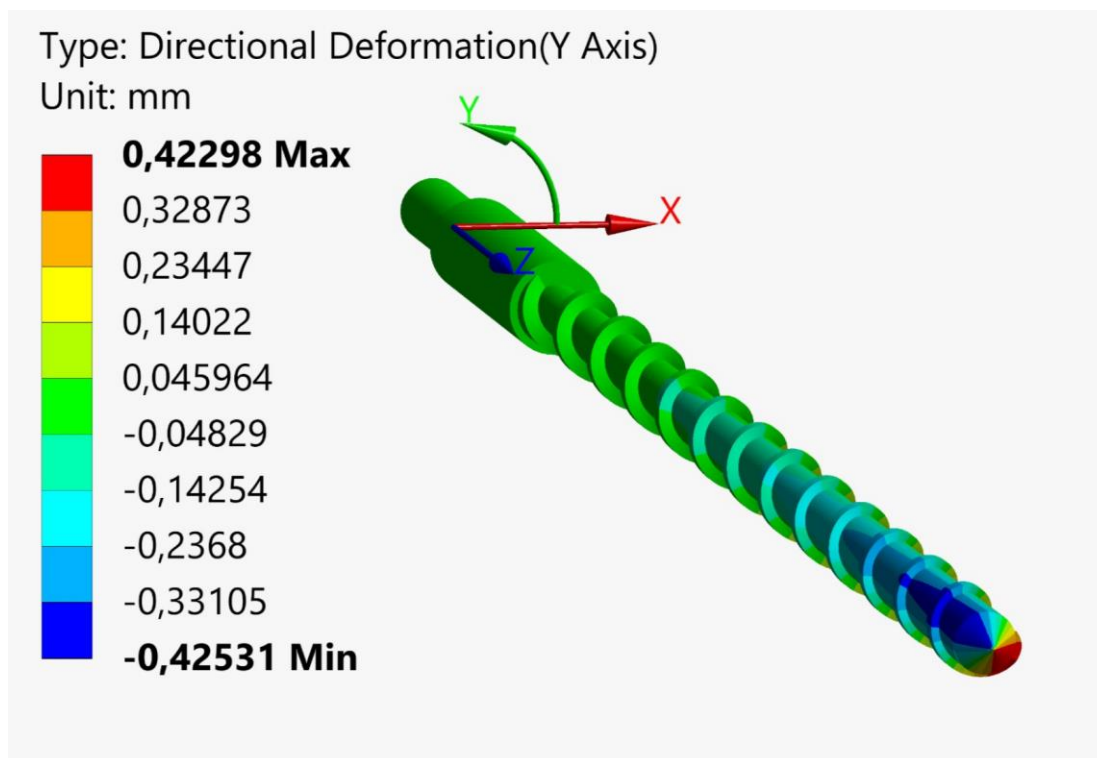
7.2 Максимальні еквівалентні напруження по Мізесу.

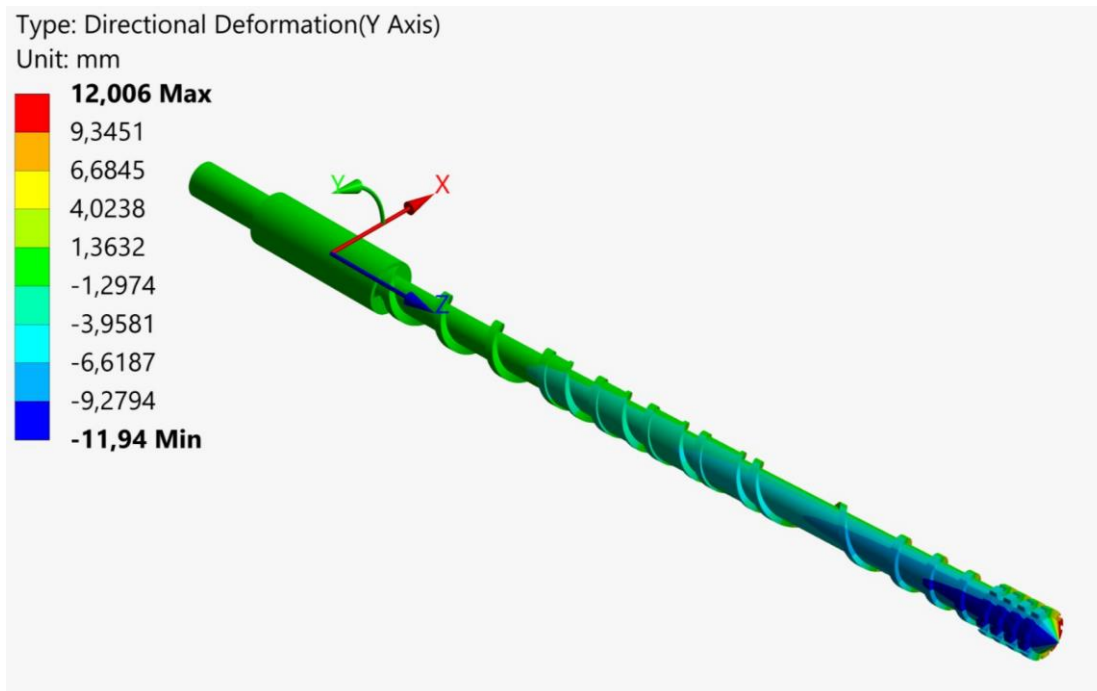


7.3 Осьові переміщення (вісь X)



7.4 Радіальні переміщення (вісь Y)





7.5 Висновки про працездатність модернізованої конструкції

Модернізована конструкція має запас міцності по радіальним переміщенням дещо менше, ніж базова. Але конструкція є працездатною та ці показники не критичні, так як модернізація була направлена покращення пластифікації перероблююмого полімеру, а не на покращення міцності.

За розрахунками із пункту 5 ми можемо зробити висновок, що конструкція працює із високою продуктивністю та витримує кількість оборотів, які були задані для цієї продуктивності.

8 ОЧІКУВАНІ МЕХАНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Очікувані механіко-економічні показники є ключовими параметрами, які визначають ефективність розробки агрегату для друку лопатей з модернізацією 3D-принтера. Вони охоплюють оцінку продуктивності, технічних характеристик, експлуатаційної надійності та економічної доцільності застосування розробленого обладнання у промислових умовах.

Продуктивність модернізованого екструдера оцінюється на рівні 15 кг/год, що забезпечує виготовлення до 30 лопатей довжиною 1,5 метра за одну зміну (8 годин). Завдяки використанню матеріалів, таких як термопластична смола PLA або Elium, досягається висока якість друку, що відповідає вимогам до міцності та довговічності виробів. Очікуваний строк служби лопатей становить не менше 10 років, враховуючи використання армувальних шарів зі скловолокна або перероблених вуглецевих волокон.

Витрати електроенергії агрегату оцінюються на рівні 10 кВт для двигуна та 14 кВт для нагрівальних елементів. Ефективність енергоспоживання підвищується за рахунок впровадження сучасної системи керування температурою, яка знижує витрати енергії на 15% у порівнянні з базовою моделлю. Очікувані експлуатаційні витрати становлять приблизно 0,5 грн за 1 кг матеріалу, що значно знижує собівартість виготовлення однієї лопаті порівняно з традиційними методами.

Економічна доцільність розробки підтверджується терміном окупності обладнання, який не перевищує 2 роки при середній завантаженості виробництва. Інвестиції у модернізований агрегат дозволяють скоротити витрати на закупівлю стандартних лопатей, оскільки їх виготовлення на місці знижує логістичні витрати до 30%. Додатковою перевагою є екологічність процесу, зокрема можливість повторного використання залишків матеріалів і зменшення кількості відходів.

Очікувані механічні характеристики лопатей включають високі показники міцності на вигин (не менше 200 МПа) і ударної в'язкості (до 40 кДж/м²), що

забезпечує їх стійкість до динамічних навантажень у реальних умовах експлуатації. Завдяки точному налаштуванню процесу друку з використанням сучасного програмного забезпечення забезпечується мінімальна похибка у геометричних параметрах виробів, яка не перевищує 0,5 мм.

Таким чином, розроблений агрегат для друку лопатей забезпечує оптимальне співвідношення продуктивності, економічної ефективності та якості виготовленої продукції. Його впровадження дозволить знизити виробничі витрати, підвищити конкурентоспроможність підприємства та забезпечити екологічно безпечний процес виготовлення елементів для вітрових генераторів.

ВИСНОВКИ

Під час виконання магістерської дисертації на тему «Агрегат для другу лопатей із модернізацією 3D-прінтеру» розроблено технологічну лінію для виготовлення лопатей та запропоновано дві модернізації для черв'яка екструдера та сопла 3D-прінтера.

В рамках проведеного дослідження детально проаналізовано призначення, конструкцію та принцип роботи одночерв'ячного екструдера, а також визначено його основні переваги та недоліки. Для усунення виявлених недоліків проведено літературно-патентний огляд, за результатами якого запропоновано два варіанти модернізації обладнання.

Перший варіант модернізації передбачає впровадження нової конструкції черв'яка з додаванням подвійного різблення та відрізаючих кілець. Це забезпечує кращу пластифікацію матеріалу. Нова конструкція черв'яка за ствердженням у пат. CN214726303U підвищує якість кінцевої продукції не впливаючи на продуктивність.

Другий варіант модернізації стосуються сопла 3D-прінтеру із додаванням зони охолодження та кільця консолідації. Це розв'язує проблеми з якістю виробленої на 3D-принтері продукції, оптимізує швидкість та ефективність процесу, знижує кількість виробничого браку та розширює друкарські можливості.

У рамках дослідження проведено параметричні, теплові та міцнісні аналітичні розрахунки екструдера, які підтверджують працездатність базової конструкції екструдера.

Окрім технічної частини, в дисертації виконано розділи, присвячені монтажу й експлуатації, стартап-проєкту та охороні праці, які демонструють доцільність впровадження модернізованого екструдера та сопла.

Графічна частина магістерської дисертації включає розробку таких креслень та плакатів: технологічну схему лінії з виробництва лопатей; складальні креслення загального виду екструдера, 3D-прінтера, сопел базової

та модернізованої конструкції та черв'яків базової та модернізованої конструкцій.

За результатами магістерської дисертації опубліковано тезу у збірнику XIX всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки», яка відбулася 13-14 червня 2024 року в НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, та 2 тези у збірнику XX всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки», яка відбулася 17-18 грудня 2024 року в НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сокольський О.Л., Сівецький В.І., Мікульонок І.О. Проектування формуючих пристроїв обладнання для переробки пластмас: навч. посібник Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 148 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25307>
2. Джабран Саройя, Янен Ван, Цінхуа Вей, Мінджу Лей, Сінпей Лі, Ін Го, Кун Чжан. Огляд 3D-друку матричних полімерних композитів: його потенціал і майбутні проблеми. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Т. 106, с. 1695–1721. (дата звернення: 01.12.24)
3. Ву Хуей-Ян Клариса, Чін Хуа Чіа, Сарані Закарія, Ян Чіа-Ян Ев'ян. Последние достижения в области 3-D друки: нанокompозити з додатковою функціональністю. Manufacturing Progress in Additive. 2022. Т. 7, с. 325–350. (дата звернення: 02.12.2024).
4. Хайрул Ізван Ісмаїл, Це Чуен Яп, Рехан Ахмед. 3D-друковані полімерні композити, армовані волокном, за допомогою моделювання методом наплавленого осадження (FDM): Довжина волокна і методи впровадження волокон. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/21/4659> (дата звернення: 03.12.2024).
5. Всесвітня організація інтелектуальної власності, Патент № WO2019141892A1. WO2019141892A1. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2019141892A1/en?q=WO2019141892A1> (дата звернення: 24.10.2024).
6. Радченко Л.Б., Сівецький В.І. Основи моделювання і конструювання черв'ячних екструдерів.– Київ : Політехніка, 2002. – 146 с.
7. Басов Н.І., Козаков Ю.Ю., Любартович В.А. Розрахунок та конструювання обладнання для виробництва і переробки полімерних матеріалів – М.: 1986. – 486с.
8. Мікульонок І.О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини. – Київ : Політехніка, 2009 – 103 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/28259>

9. Ян В., Чен Л., Чжан Д. Полімерні композити для вітрових турбін. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/6/2508> (дата звернення: 07.11.2024).
10. Томпсон М., Лі С. 3D-друк для виробництва лопатей вітрових турбін: огляд матеріалів, дизайну, оптимізації та проблем. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/379783490_3D_Printing_for_wind_turbine_blade_manufacturing_a_review_of_materials_design_optimization_and_challenges (дата звернення: 08.09.2024).
11. Перес Р., Гомес Х. Гліцерин, як органічний карбонат: екологічно безпечний пластифікатор для PLA. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/377976650_Glycerol-derived_organic_carbonates_environmentally_friendly_plasticizers_for_PLA (дата звернення: 07.11.2024).
12. Китайський патент № CN214726303U. Екструдер для соломки PLA. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/CN214726303U/en?q=CN214726303U> (дата звернення: 24.10.2024).
13. Мікульонок І. О., Сокольський О. Л., Сівецький В. І., Радченко Л. Б. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки «Машинобудування» / НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 200 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25367>
14. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020 – 291 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/68766>
15. Н. Іванечко, Т. Борисова, Ю. Процишин; за ред. Н. Р. Іванечко. – Маркетинг: навч. посіб. / Тернопіль : ЗУНУ, 2021. - 180 с.
16. І. В. Коваленко – Монтаж, експлуатація та ремонт обладнання хімічних виробництв / 2011. – 575 с.
17. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів [Електронний

ресурс]: навч. посіб. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 391 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11636>

18. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування», «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів і виробів» / А. Я. Карвацький. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 391 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23916>
19. Сівецький В.І., Щербина В.Ю., Гондляр О.В. Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання. Лінії для виготовлення листових і профільних полімерних виробів [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. – 113 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45732>
20. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
21. Yudina N.V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society // Marketing and Management of innovations. – 3’2017. – P.245-256.-DOI:10.21272/mmi.2017.3-23 Access mode : <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>.
22. Yudina. N. Economic “Butterfly” and Futurology of the War in Ukraine. Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022.№23 (2022). PP. 77-82. URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/264637>
23. Semeniuk, S., Levytskyi, V., Fomina, O., Fedorchenko, K., Yudina, N., Ratynskiy, V., Shcherbatiuk, O., Bendiuh, V., & Zhurakivska, Y. (2024). Overcoming barriers to

digitalization of small and medium-sized enterprises under martial law. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(13 (129), 57–69.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304997> [Scopus / Web of Science]
<https://journals.uran.ua/eejet/article/view/304997> .

24. Yudina Nataliya. Business Forecasting of Marketing Activity Riskiness of Companies in Markets. Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". №17(2020). P. 372-383. URL :
<http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/216380/>
25. Nataliya Yudina, Olena Pidlisna Marketing Perception Of Technological Uncertainty By Decision-Makers. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of
26. National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №18 (2021). PP. 1-10 URL :
<http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/238105>
27. Nataliya Yudina Future Study Implementation Into Marketing Activity Of Companies. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №18 (2021). PP. 1-9 URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/240315>
28. Юдіна Н. В. Визначення циклічних залежностей в економіці України на основі аналізу окремих макроекономічних показників. Економічний Вісник НТУУ «КПІ». №13(2016). <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/80084/75643>
29. Юдіна Н. В. «Дорожня карта» підприємства у контексті футурології техногенної економіки. Традиції і інновації. [Електронний ресурс] / Н. В. Юдіна // Інновації та фундаментальні науки в умовах техногенної економіки : зб. матеріалів міждисциплінар. наук.-практ. конф., Київ, 25 листоп. 2016 р. / [уклад. Л. І. Юдіна]. – К., 2016. – Режим доступу :
<http://futurollog.com.ua/publish/2/Zbirnyk.pdf#page=6>.

ДОДАТОК А. Патенти використані для модернізації агрегата для другу лопатей із використанням 3D-прінтеру

PLA straw extruder	CN214726303U
Fiber-reinforced 3d printing	WO2019141892A1

(19) 中华人民共和国国家知识产权局



(12) 实用新型专利



(10) 授权公告号 CN 214726303 U

(45) 授权公告日 2021.11.16

(21) 申请号 202120963207.4

(22) 申请日 2021.05.07

(73) 专利权人 南京捷阳机械有限责任公司

地址 210039 江苏省南京市雨花经济开发区
风华路18号2幢(阿尔法楼)B203室

(72) 发明人 张新海

(51) Int. Cl.

B29C 48/10 (2019.01)
B29C 48/535 (2019.01)
B29C 48/575 (2019.01)
B29C 48/65 (2019.01)
B29C 48/80 (2019.01)
B29C 48/82 (2019.01)
B29C 48/92 (2019.01)

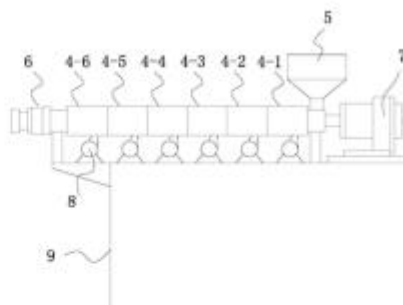
权利要求书1页 说明书4页 附图2页

(54) 实用新型名称

一种PLA吸管挤出机

(57) 摘要

本实用新型公开了一种PLA吸管挤出机,包括进料斗、挤出头、挤出螺杆、挤出料筒及电机,挤出螺杆自进料侧向出料侧依次设有输送段、融化压缩段和混炼段;输送段螺杆上设有第一单头螺纹;融化压缩段螺杆上设有双头螺纹,混炼段螺杆设有第二单头螺纹和剪切环,挤出料筒自进料侧向出料侧依次设有6个调温装置,第一、第二调温装置位于螺杆输送段,第三、第四调温装置位于螺杆融化压缩段,第五、第六调温装置位于螺杆混炼段,每一调温装置均包括加热模块及风冷模块,本实用新型通过调温装置与螺杆结构配合,可使PLA原料的塑化性能和成型性能均得到提高,吸管成型效果好。



CN 214726303 U

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property
Organization
International Bureau

(43) International Publication Date
25 July 2019 (25.07.2019)



(10) International Publication Number
WO 2019/141892 A1

(51) International Patent Classification:

B29C 64/18 (2017.01) B29C 64/295 (2017.01)
B29C 70/16 (2006.01) B33Y 10/00 (2015.01)
B29C 70/38 (2006.01) B33Y 30/00 (2015.01)
B29C 64/209 (2017.01) B33Y 70/00 (2015.01)

(21) International Application Number:

PCT/FI2018/050037

(22) International Filing Date:

18 January 2018 (18.01.2018)

(25) Filing Language:

English

(26) Publication Language:

English

(71) Applicant: ARCTIC BIOMATERIALS OY [FI/FI]; Osmusmyllynkatu 13, 33700 Tampere (FI).

(72) Inventors: HUTTUNEN, Mikko; c/o Arctic Biomaterials Oy, Osmusmyllynkatu 13, 33700 Tampere (FI). PIHLAJAMÄKI, Janne; c/o Minifactory Oy, Kampusranta 9, 60320 Seinäjoki (FI).

(74) Agent: KOLSTER OY AB; (Salmisaarenaukio 1), P.O.Box 204, 00181 Helsinki (FI).

(81) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of national protection available): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,

DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of regional protection available): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), European (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Published:

- with international search report (Art. 21(3))
- in black and white; the international application as filed contained color or greyscale and is available for download from PATENTSCOPE

(54) Title: FIBER-REINFORCED 3D PRINTING

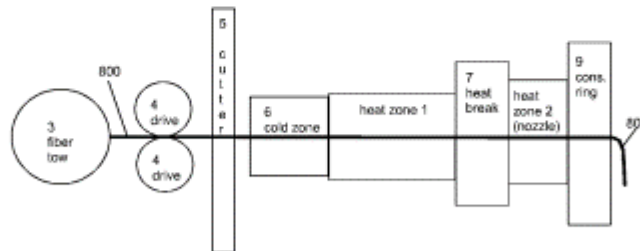


Fig. 3

(57) Abstract: A 3D printer comprises a print head (500) for supplying pre-impregnated fiber composite filament (800) including inelastic axial fiber strands within thermoplastic matrix material. A first heating zone (1) between the filament supply and a heated nozzle (2) is heatable above the melting temperature of the matrix. A consolidation element (9) after the nozzle applies a consolidation force to the filament to attach the filament to the part. The nozzle is heatable to at least the melting temperature of the matrix. The filament is driven through the first heating zone into the nozzle. A cold zone (6) before the first heating zone maintains the temperature of the filament below the melting temperature of the matrix. A heat break (7) between the first heating zone and the nozzle creates a temperature gap between the first heating zone and the nozzle. The print head/consolidation element is movable in three degrees of freedom. The application further relates to a method for additive manufacturing of a part.

WO 2019/141892 A1

ДОДАТОК Б. Специфікації

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка	
Перше з'яст.							
				Документація			
	A1		ЛП4.1мп.057243.002СК	Складальний кресленик			
Додат. №				Деталі			
		1	ЛП4.1мп.057243.002.01	Гайка під спецключ	1		
		2	ЛП4.1мп.057243.002.02	Зона нагріву	1		
		3	ЛП4.1мп.057243.002.03	Ізолятор верхній	1		
		4	ЛП4.1мп.057243.002.04	Ізолятор нижній	1		
		5	ЛП4.1мп.057243.002.05	Корпус головки	1		
		6	ЛП4.1мп.057243.002.06	Тепловідвід	1		
		7	ЛП4.1мп.057243.002.07	Штуцер нижній	2		
		8	ЛП4.1мп.057243.002.08	Штуцер верхній	2		
		9	ЛП4.1мп.057243.002.09	Нагрівач	1		
				Стандартні вироби			
		10	Кільце 84-91-4 ГОСТ 9833-73		4		
Підп. та дата							
Інв. № дубл.							
Зам. інф. №							
Підп. та дата							
Інф. № орг.							
ЛП4.1мп.057243.002СК							
Змн.	Арж.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Дорофєєва А.О.					
Перев.		Сібецький В.І.					
Н. контр.							
Затв.		Сокоальський О.Л.					
Друкуюча головка 3D-принтера					Літ.	Аржуш	Аржуш
							1
					ФАПІЄ, КПІ ім. Ігоря Сікорського		

Формат А4

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
Перше зост.						
Додат. №						
Лист та дата						
Лист № дубля						
Зам. № №						
Лист та дата						
Лист № ориг.						

ЛП4 1мн.05724.003СК

Базовий шнек екструдера

Лит.	Аркуш	Аркушів
		1

ФАПІЄ, КПІ ім. Ігоря Сікарського

ДОДАТОК В. Публікації за темою дисертації

Переробка і можливості для утилізації склопластику у складі компонентів вітрогенератора

Дорофєєва А.О., студ., Шилович Т.Б., доц., к.т.н., доц.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Запропоновано ідею спільної переробки склопластику з лопатей і мотогондоли вітряного генератора, за рахунок чого досягаються екологічні, економічні та практичні переваги. Відмінність процесу від звичайної переробки в наповнювач для неструктурних будматеріалів тільки в об'єднанні двох композитів.

Ключові слова: вітрогенератор, лопоті, гондола, мотогондола, вітряк, склопластик, переробка, будівельні матеріали.

Вступ. Вітрогенератор – це пристрій, що перетворює кінетичну енергію вітру на електричну. Він складається з лопатей, гондоли, які знаходяться у верхній частині вітряка та встановлюються на вежу, яка ґрунтується на фундаменті. Серед інших великих складових: приводний вал та електричні компоненти.

Основна частина. Перевагою вітрогенератора є використання поновлюваного природного ресурсу для отримання енергії. Конкретним недоліком вітрогенератора, що розглядається, є неможливість повної переробки або утилізації складових. Станом на зараз переробці підлягає від 85% до 95% турбіни. Найскладнішими елементами для переробки є лопаті [1].

Ведуться дослідження у сфері використання скловолокна, але вони не передбачають звичайну переробку:

- Використання смол на біологічній основі для стійких полімерних композитів [2];
- 3-D друк полімерних, армованих безперервним волокном [3];
- Застосування графенових нанопластинок у склопластикових композитах [4].

Інтерес до переробки саме «звичайних» деталей вітрогенератора зумовлений їхньою крайньою поширеністю в Україні. Необхідно створювати можливості до більш сталого поводження з матеріалами.

Більшу частину лопатей становить склопластик, найчастіше це композит зі скловолокна й епоксидної смоли [5]. Наразі не існує єдиного й ефективного способу переробки цього матеріалу [6], але його можна використовувати як наповнювач при виробництві будівельних матеріалів.

Склопластик також використовується в мотогондолі, здебільшого в кришці та зовнішній оболонці видимої форми гондоли. В складі композиту в цьому випадку може використовуватися поліефірна смола [7].

Об'єднати ці два композити лопатей та гондоли в одну суміш можна за умови, що їх суміш можна використовувати для виробництва низькосортних будівельних матеріалів, таких як неструктурний бетон і асфальт для укладання доріг, тротуарна плитка тощо [8].

Оскільки будматеріал обирають низькосортний, то склопластик для його наповнення не обов'язково має бути високого рівня частоти - це полегшує процес його переробки.

Спочатку лопаті та гондола відкручуються від кріплень і за можливості розбираються, далі опускаються на землю. Там розбираються і розпилюються на зручні для перевезення і подальшої переробки частини.

Дроблення склопластиків відбувається за допомогою великих промислових молоткових млинів або подрібнювачів. Конкретний розмір подрібненого матеріалу може залежати від кінцевого використання в бетоні або асфальті. Найбільш вдалий розмір фракцій: для неструктурного бетону – 3-4 мм; для асфальту і тротуарної плитки – до 1 мм.

Після переробки композиту під необхідну фракцію з детальної суміші видаляють металеві компоненти, що залишилися. Роблять це за допомогою магнітної сепарації. Тепер матеріал готовий до використання як наповнювач для неструктурних будматеріалів.

Перевагами сумісної переробки склопластику з лопатей і гандоли вітрогенератора є наступне:

- Зменшення кількості відходів: Оскільки у генераторів обмежений термін служби, після виведення їх з експлуатації лопаті та певні частини мотогондоли стають джерелами значних відходів. Використання склопластику в стійматеріалах допомагає зменшити кількість цих відходів.
- Економія на виробництві та переробці: Використання спільно перероблених склопластиків знижує вартість будівельних матеріалів, оскільки такий наповнювач може бути доступнішим порівняно з піском або щебенем. Також здешевлюється переробка самого склопластику. Створюються нові робочі місця, що сприяє розвитку кругової економіки.
- Поліпшення властивостей вироблених будматеріалів: Перероблений склопластик може виступати як «місток» або запобіжник від тріщин, що підвищує механічні якості бетону. Крім цього, такий наповнювач позитивно впливає на міцність, здатність до вигинів і ударну в'язкість стійматеріалу.
- Зменшення парникових викидів: Виробництво традиційних будматеріалів досить енергоємне і сприяє викиду парникових газів. Використання наповнювача зі склопластику допоможе зменшити кількість цих викидів, оскільки його переробка потребує менше енергії.

Висновки. Таким чином запропоновано об'єднати склопластик з лопатей і з мотогондоли вітрогенератора для їхньої спільної переробки в наповнювач для низькосортних будівельних матеріалів. Таке об'єднання приносить різнобічні переваги, що особливо важливо в умовах відсутності можливості екологічної утилізації розглянутих компонентів.

Перелік посилань

1. Ørsted бере на себе зобов'язання щодо сталої переробки лопатей вітрових турбін. *Ørsted*. URL: <https://orsted.com/en/media/news/2021/06/702084352457649> (дата звернення: 07.05.2024)
2. Юншенг Чжан, Чжуншунь Юань, Чунбао (Чарльз) Сюй. Смоли на біологічній основі для полімерних композитів, армованих волокнами. *Natural Fiber-Reinforced Biodegradable and Bioresorbable Polymer Composites*. 2017. С. 137-162
3. 3D-друк композитів з безперервним вуглецевим волокном: огляд сучасних технологій. *Anisoprint*. URL: https://www.youtube.com/watch?v=hOb_Lw0coou (дата звернення: 07.05.2024)
4. К.Л. Кішор, К.Т. Баларам Падал. Вплив графенових нанопластинок на мікроструктуру та зносостійкість композитів AA7075/Al2O3Nano. *Materialstoday: Proceedings*. 2022. Т. 62, № 6, С. 4424-4431
5. Створюємо кращі лопаті: Поновлене фінансування підтримує інновації лопатей вітрових турбін в NREL. *National Renewable Energy Laboratory*. URL: <https://www.nrel.gov/news/program/2023/building-better-blades-renewed-funding-supports-wind-turbine-blade-innovations-at-nrel.html> (дата звернення: 07.05.2024)
6. Кері Ларсен. Переробка лопатей вітрових турбін. *Renewable Energy Focus*. 2009. Т. 9, № 7, С. 70-73
7. Оптимізація кришки гондоли вітрової турбіни відповідно до вимог LCOE. *Composites World*. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/optimizing-a-wind-turbine-nacelle-cover-to-meet-lcoe-demand> (дата звернення: 07.05.2024)
8. Катлехо Кенеуве Хоаеле. Огляд полімерних композитів, армованих відходами деревини, та їх переробки на будівельні матеріали. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2023. Т. 16, № 1, С. 104-116

Модернізований шнек екструдера для переробки PLA і друку на 3D-принтері

Дорофєєва А.О., студ., Сівецький В.І., проф., к.т.н.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Запропоновано ідею модернізації шнека екструдера для ефективного перероблення PLA-пластику з метою подальшого друку на 3D-принтері, завдяки чому досягається поліпшення його пластикуючих властивостей, у порівнянні з переробленням у звичайному екструдері.

Ключові слова: екструдер, шнек, PLA-пластик, PLA, 3D-принтер, пластифікація, полілактид.

Вступ. PLA-пластик це екологічно безпечний матеріал. Як сировину для його створення використовують молочну кислоту з поновлюваних рослинних ресурсів, зокрема кукурудзи та цукрових буряків [1]. PLA-пластик повністю переробляється, проте його пластикуючі властивості гірші, ніж в інших матеріалів, які використовуються для 3D-друку [2].

Основна частина. Як вирішення проблеми з пластикацією PLA-пластику пропонуються різні напрямки досліджень. Хороші результати показує додавання органічно чистих пластифікаторів-карбонатів на основі гліцерин. [3].

Другий підхід не передбачає втручання в хімічну структуру PLA-пластику. Патент [4] пропонує модернізацію шнека екструдера, рис. 1. Екструзійний шнек містить три послідовні секції: завантажувально-транспортуючу 1, стиснення-плавлення 3 і дозуюче-змішувальну 8.

Секція 1 оснащена однозахідною гвинтовою навивкою 2 з постійним кроком. Це різьблення забезпечує переміщення матеріалу вперед, запобігаючи закупорюванню, під час нагрівання і розм'якшення твердих частинок.

Секція стиснення-плавлення 3 має подвійне різьблення, що включає основне 4 і допоміжне 5. Між ними утворено дві розділені транспортувальні канавки: канавка твердої фази 7 (глибша і зменшується за об'ємом праворуч) та канавка рідкої фази 6 (дрібніша і збільшується за об'ємом праворуч). Такий поділ унеможливає проникнення погано пластикованого матеріалу у зону дозування та змішування 8, покращуючи процес плавлення в зоні 3.

Дозуюча-змішувальна секція 8 містить однозахідне різьблення 9 зі змінним кроком. На правому кінці змішувальної секції 8 розташоване ріжуче кільце 10 з косими зубцями 11, що сприяє рівномірному перемішуванню розплаву.

Застосування запропонованого вдосконалення конструкції шнека екструдера в модернізації позитивно впливає на пластикацію PLA-пластику.

1. Подвійне різьблення на шнеку, зображеному на рис. 1, у секції стиснення-плавлення 3 утворює два канали транспортування матеріалу: головний і допоміжний. У головному транспортується матеріал (за допомогою основного різьблення 4), який ще не досяг необхідної температури, а в допоміжному (допоміжне різьблення 5) – розплавлений. Ці канали працюють автономно, тому різні фази плавлення PLA-пластику не змішуються.
2. Змінний крок різьблення на шнеку і додавання ріжучого кільця 10, зображеного на рис. 2, створюють статичний міксер у секції змішування 8, який ефективно перемішує та рівномірно розподіляє розплавлений матеріал, вирівнюючи його температуру і швидкість потоку. Це знижує ймовірність локального перегріву та утворення твердих включень, покращуючи пластифікацію і формування кінцевого виробу.

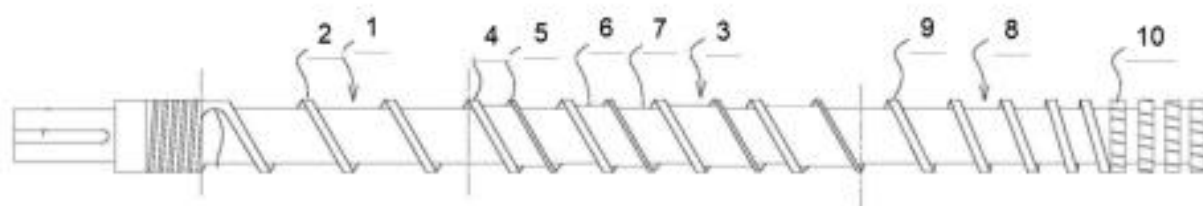


Рисунок 1 – Модернізований екструзійний шнек

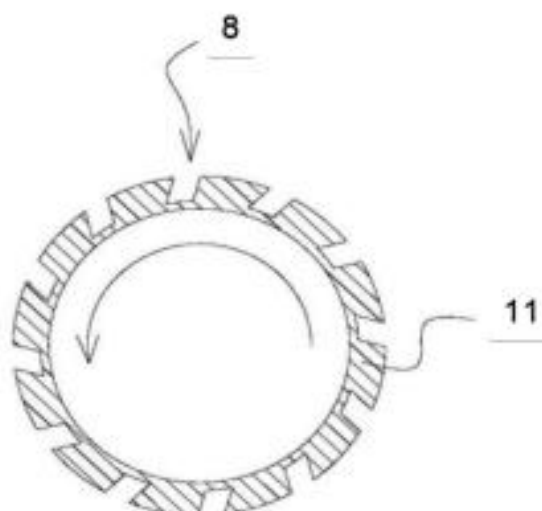


Рисунок 2 – Ріжуче кільце в кінці модернізованого шнека

Висновки. Таким чином запропоноване технічне рішення у вигляді модернізованого шнека екструдера розв'язує проблему пластикації PLA-пластику під час підготовки його до друку на 3D-принтері. Це рішення легше запровадити у виробництво філаменту як перший етап під час роботи з PLA-пластиком, без вдавання до зміни структур і компонентів матеріалу.

Перелік посилань

1. Ян В., Чен Л., Чжан Д. Полімерні композити для вітрових турбін. MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/6/2508> (дата звернення: 07.11.2024).
2. Томпсон М., Лі С. 3D-друк для виробництва лопатей вітрових турбін: огляд матеріалів, дизайну, оптимізації та проблем. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/379783490_3D_Printing_for_wind_turbine_blade_manufacturing_a_review_of_materials_design_optimization_and_challenges (дата звернення: 08.09.2024).
3. Перес Р., Гомес Х. Гліцерин, як органічний карбонат: екологічно безпечний пластифікатор для PLA. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/377976650_Glycerol-derived_organic_carbonates_environmentally_friendly_plasticizers_for_PLA (дата звернення: 07.11.2024).
4. Китайський патент № CN214726303U. Екструдер для соломки PLA. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/CN214726303U/en?q=CN214726303U> (дата звернення: 24.10.2024).

Модернізоване сопло для друку армованим волокном на 3D-принтері

Дорофєєва А.О., студ., Сівецький В.І., проф., к.т.н.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Запропоновано ідею модернізації сопла 3D-принтера для ефективного друку армованим волокном, завдяки чому поліпшуються механічні властивості кінцевих виробів і підвищується надійність процесу друку.

Ключові слова: сопло, 3D-принтер, армоване волокно, композит, композитна суміш.

Вступ. Композитні матеріали для 3D-друку включають термопластичні полімери, армовані безперервним або короткими волокнами. В джерелах [1-3] розглядається друк такими матеріалами: PLA, ABS, PETG, волокна вуглецеві та кевралові, скловолокна. Найскладніші для друку матеріали це композити – термопластики в поєднанні з армувальними волокнами.

Під час друку композитними матеріалами з використанням базового сопла можна зіткнутися з низкою поширених проблем, які описані у джерелах [2-3]. Найчастіші з них це засмічення сопла та нерівномірний розподіл волокон. Через можливу агрегацію наповнювачів сопло засмічується, що перериває процес друку, а нерівномірний розподіл армувальних волокон у матриці полімеру призводить до зниження механічних властивостей готового виробу.

Основна частина. У технічному рішенні [4] запропоновані вдосконалення сопла 3D-принтеру для вирішення цих проблем, які відображені на рис. 1.

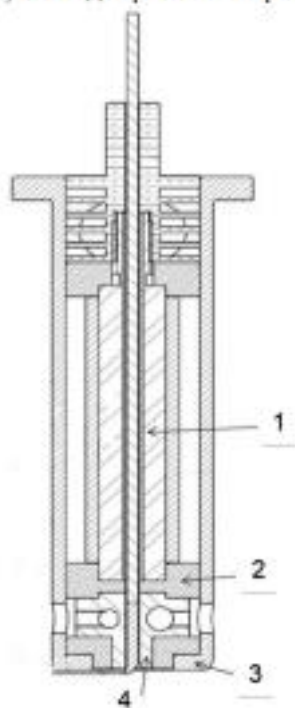


Рисунок 1 – Сопло 3D-принтера:

1 – зона нагріву; 2 – термічний розрив; 3 – сопло; 4 – елемент консолідації

На першому етапі композитна нитка нагрівається у зоні нагріву 1 до температури, що перевищує температуру плавлення матриці полімеру. Після цього матеріал потрапляє в нагріте сопло 3, яке підтримує необхідний рівень температури для забезпечення стабільної екструзії. Між зоною нагріву та соплом розташований термічний розрив 2. Цей елемент створює температурний градієнт, що запобігає небажаній теплопередачі, зокрема перегріву матеріалу. Завершальним етапом є консолідація: спеціальний елемент консолідації 4 прикладає зусилля до екструдованої нитки, забезпечуючи її належне зчеплення з друкованою деталлю.

Сопло є частиною пристрою для 3D-друку, який зокрема включає холодну зону. Ця зона підтримує температуру філаменту нижче за температуру плавлення матриці полімеру перед його подальшим нагріванням. Схема пристрою для 3D-друку із додаванням холодної зони зображена на рис. 2.

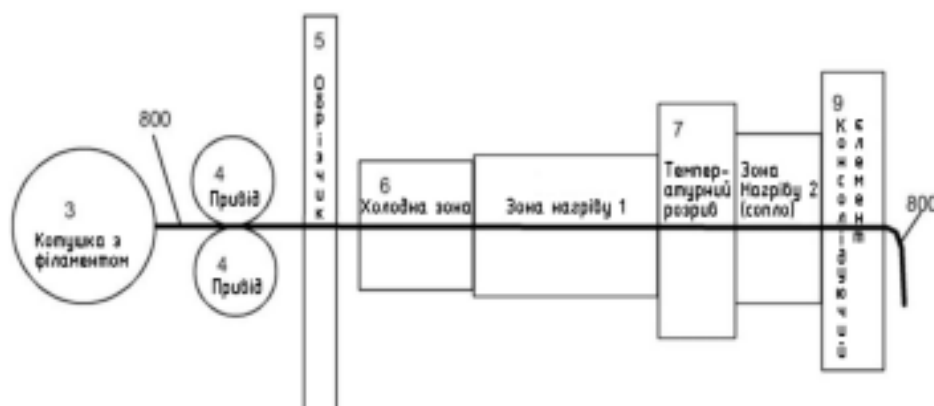


Рисунок 2 – Схема пристрою 3D-друку

Холодна зона 6 потрібна для усунення ненавмисного нагріву філаменту, завдяки чому досягається його правильна подача і обробка. Це особливо важливо для ниток із композитних матеріалів.

Використання запропонованого удосконалення конструкції сопла в модернізації позитивно впливає на багато факторів. Якість друку стає кращою, оскільки армувальні волокна в полімерній матриці розподіляються більш рівномірно. Знижується кількість і швидкість появи засмічень, оскільки матеріал не так активно накопичується в соплі. Підтримується більш ефективна робота зі складними композитними матеріалами, а процес друку стає більш стабільним завдяки рівномірному поданню матеріалу та екструзії. Розширюється кількість матеріалів, з якими можна працювати.

Висновки. Таким чином запропоноване технічне рішення у вигляді модернізованого сопла 3D-принтера розв'язує проблеми з якістю виробленої на 3D-принтері продукції, оптимізує швидкість та ефективність процесу, знижує кількість виробничого браку та розширює друкарські можливості.

Перелік посилань

1. Джабран Саройя, Янен Ван, Цінхуа Вей, Мінджу Лей, Сінпей Лі, Ін Го, Кун Чжан. Огляд 3D-друку матричних полімерних композитів: його потенціал і майбутні проблеми. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Т. 106, с. 1695–1721. (дата звернення: 01.12.24)
2. Ву Хуей-Ян Клариса, Чін Хуа Чіа, Сарані Закарія, Ян Чіа-Ян Ев'ян. Последние достижения в области 3-D друку: нанокompозиты с дополнительной функциональностью. *Manufacturing Progress in Additive*. 2022. Т. 7, с. 325–350. (дата звернення: 02.12.2024).
3. Хайрул Изван Исмаїл, Це Чуен Яп, Рехан Ахмед. 3D-друковані полімерні композити, армовані волокном, за допомогою моделювання методом наплавленого осадження (FDM): Довжина волокна і методи впровадження волокон. *MDPI*. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/21/4659> (дата звернення: 03.12.2024).
4. Всесвітня організація інтелектуальної власності, Патент № WO2019141892A1. WO2019141892A1. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2019141892A1/en?q=WO2019141892A1> (дата звернення: 24.10.2024).