

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Інститут архітектури та будівництва “ІФНТУНГ-ДонНАБА”

Кафедра будівництва

Васьків Володимир Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.22:669.018.25

(індекс)

## **МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

Дослідження процесу зварювання різнорідних полімерних матеріалів

(назва роботи)

Зварювання та споріднені технології

(назва освітньої програми)

G9 Прикладна механіка

(шифр назви спеціальності)

В. А. Васьків

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Панчук Мирослав Васильович, к.т.н. доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

Андрусак А.В

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

Бішак Р.Т.

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2025 р.

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повна найменування закладу вищої освіти)

Інститут Архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДОННАБА"

Кафедра Будівництва

Освітній рівень Магістр

Спеціальність 131 Прикладна механіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри** \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Васьківу Володимирі Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження процесу зварювання різномірних полімерних матеріалів

Керівник роботи Панчук Мирослав Васильович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом закладу вищої освіти від "08" 10 2025 року № 674/7

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи. Матеріали для зварювання - полілактид PLA, полікарбонат PC, акрилонітрилбутадієнстирол ABS.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

2 1. Огляд літературних джерел. 2. Матеріали, обладнання та методики досліджень. 3. Аналітичне та експериментальне дослідження процесу зварювання різномірних полімерних матеріалів. 4. Рекомендації до використання результатів досліджень..

5. Перелік графічного матеріалу 2 – Постановка завдання; 3,4,5 - Технічні характеристики експериментального обладнання та матеріалів; 7 - 18 Результати досліджень; 19 – Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Панчук Мирослав Васильович		
2	Панчук Мирослав Васильович		
3	Панчук Мирослав Васильович		
4	Панчук Мирослав Васильович		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури		
2	Матеріали, обладнання та методики досліджень		
3	Аналітичне та експериментальне дослідження процесу зварювання різнорідних полімерних матеріалів		
4	Рекомендації до використання результатів досліджень		

**Студент** \_\_\_\_\_  
 ( підпис )(прізвище та ініціали)

**Володимир ВАСЬКІВ.**

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_  
 ( підпис )(прізвище та ініціали)

Мирослав ПАНЧУК \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

В процесі виконання роботи підтверджено, що в основі зварювання різномірних матеріалів за допомогою тертя знаходиться процес дифузії, проходження якого лімітується в'язкістю нагрітих матеріалів.

За результатами проведених досліджень встановлено, що для підтримування ефективного процесу зварювання для досліджуваних зразків тривалість циклу зварювання повинна становити 60 с. Цей процес складається з часу тертя, що складає – 30 с, часу проковування – 20 секунд та часу охолодження конструкції – 10 секунд. Припуск на осадження повинен складати – 4,0 мм, а швидкість обертання підтримуватися постійною на рівні 630 об/хв. Під час дослідження теплових процесів, які відбуваються в матеріалі зварного шва отримано залежність його температури від часу зварювання.

Розроблено нову технологічну схему зварювання різномірних полімерних матеріалів.

**Ключові слова:** зварювання різномірних полімерів, технологічні параметри, технологічна схема.



## ABSTRACT

In the course of the work, it was confirmed that the basis of friction welding of dissimilar materials is the diffusion process, the passage of which is limited by the viscosity of heated materials.

The results of the studies showed that in order to maintain an effective welding process for the samples under study, the welding cycle time should be 60 seconds. This process consists of friction time, which is 30 seconds, forging time, which is 20 seconds, and cooling time, which is 10 seconds. The allowance for deposition should be 4,0 mm, and the rotation speed should be maintained at a constant level of 630 rpm. During the study of thermal processes occurring in the welded joint material, the dependence of its temperature on welding time was obtained.

A new technological scheme for welding dissimilar polymer materials has been developed.

**Keywords:** welding of optical fibers, technological parameters, typical technological scheme.

## ЗМІСТ

Зміст .....	5
Вступ .....	7
1 Аналіз літературних джерел .....	11
1.1 Полімерні матеріали в конструкціях.....	11
1.2 Особливості використання різномірних матеріалів.....	15
1.3 Процеси з'єднання.....	18
1.4 Способи зварювання пластмасових деталей.....	20
1.5 Складнощі зварювання різномірних матеріалів .....	26
1.6 Висновки та постановка завдань досліджень .....	29
2 Матеріали, обладнання та методики досліджень .....	30
2.1 Методи проектування деталей.....	30
2.2 Основні витратні матеріали.....	31
2.3 Обладнання та прилади для проведення досліджень.....	32
2.4 Контроль якості зварних швів .....	35
3 Аналітичне та експериментальне дослідження процесу зварювання різномірних полімерних матеріалів.....	38
3.1 Аналіз технічних характеристик досліджуваних матеріалів .....	38
3.2 Теоретичні аспекти зварювання різномірних матеріалів .....	41
3.3 Процес моделювання конструкцій.....	43
3.4 Процес виготовлення конструкцій.....	45
3.5 Дослідження процесу зварювання різномірних полімерних матеріалів.....	49
3.5.1 Особливості способу зварювання тертям .....	49
3.5.2 Встановлення швидкості обертання .....	52

					<b>КРМ. ПМЗ - 18.00.00.000 ПЗ</b>			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Васьків В.А.			<b>Дослідження процесу зварювання різномірних полімерних матеріалів</b>	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Панчук М.В.					5	64
Рецензент		Бішак Р.Т				ІФНТУНГ ПМЗ <sub>м</sub> – 24 -1		
Н.контроль		Матвієнків О.М.						
Затверд.		Андрюсяк А						



3.5.3	Визначення температури нагрівання зварювального шару.....	54
4	Рекомендації для виконання результатів досліджень .....	58
4.1	Розроблення типової технологічної схеми процесу зварювання	
	Різнорідних полімерів.....	58
	Висновки .....	61
	Список використаних джерел.....	72

					КРМ. ПМЗм - 32.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

## ВСТУП

Зварювання є основоположний процес з'єднання матеріалів, який створює міцні, нероз'ємні та довговічні з'єднання. Цей процес передбачає плавлення матеріалів на межі з'єднання їх охолодження та затвердіння, утворюючи за цього зварне з'єднання. Цей процес зазвичай використовується у виробничому секторі, аерокосмічній, автомобільній та енергетичній промисловості.

Процес зварювання створює унікальний набір проблем через відмінності матеріалів у властивостях, теплових характеристиках та металургійній поведінці під час з'єднання різнорідних матеріалів. Вирішення цих проблем вимагає глибокого розуміння властивостей матеріалів, технологічних процесів та металургійних взаємодій. При оцінці можливості зварювання різнорідних металів та створення надійного зварного з'єднання необхідно враховувати різні фактори.

З'єднання різнорідних матеріалів знаходить широкий спектр застосування в галузях промислового будівництва та виробництва, де характерні особливості різних матеріалів оптимізуються для бажаного застосування, що призводить до збільшення економічної ефективності та доданої вартості.

Передові методи зварювання, інноваційні присадні матеріали та стратегії оптимізації мають вирішальне значення для подолання складнощів з'єднання різнорідних матеріалів та забезпечення високоякісних, довговічних зварних швів.

Останні досягнення у модернізації технологій зварювання дали можливість значно просунутись в питаннях виготовлення з'єднань різнорідних матеріалів. До таких технологій відносяться зварювання тертям з перемішуванням, лазерне зварювання, гібридні процеси зварювання, адитивне

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виробництво та обчислювальні інструменти для багат шарового моделювання, оптимізації та прогнозного аналізу.

Для досягнення прогресу в цьому напрямку важливим є провести дослідження процесів, які відбуваються при з'єднанні різнорідних матеріалів за допомогою нових способів їх виготовлення, відповідних способів зварювання та обчислювальних інструментів.

Адитивні технології виводять промислове виробництво на новий якісний рівень розвитку. Ключовими перевагами технологій адитивного виробництва є автоматизація проектних робіт, можливість швидкого створення прототипів, суттєве зменшення відходів, а також виготовлення складних за формою конструкцій.

Стрімкий розвиток промислості, транспортних галузей, медицини, а також інших сфер життя людини вимагають виготовлення нових типів продуктів, що володіють комплексними властивостями.

Для створення таких продуктів необхідним є використання в одній конструкції різних матеріалів, що в свою чергу потребує ефективних технологій їхнього з'єднання. На думку багатьох дослідників найкращим способом з'єднання матеріалів на даний час є процес зварювання. Зварювання можна вважати базовим процесом створення матеріальної основи сучасної цивілізації.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Проведення аналітичних та експериментальних досліджень відбувалось в лабораторіях ІФНТУНГ, а також на підприємствах під час виконання виробничої і переддипломної практик

**Мета і завдання магістерської роботи.** Метою роботи є дослідження процесів, які відбуваються при з'єднанні різнорідних матеріалів та встановлення можливості їх зварювання допомогою відповідних способів.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні завдання: проведено аналіз літературних джерел; спроектовано та виготовлено моделі заготовок для зварювання з використанням програми Solidworks. Для

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підготовки виробництва конструкцій застосовувалась програма PrushaSlicer 2.7. З'єднання заготовок виконували на експериментальній установці за допомогою зварювання тертям.

**Об'єкт дослідження** – процес зварювання різнорідних полімерних матеріалів.

**Предмет дослідження** – способи зварювання різнорідних матеріалів.

**Методи дослідження** – для проведення досліджень процесу зварювання різнорідних матеріалів використовувались 3D принтер Voron 2.4, експериментальна зварювальна установка, безконтактний інфрачервоний термометр GM 900, а також шаблони, штангенциркуль та інших вимірювальні прилади.

**Наукова новизна.** За результатами проведених досліджень встановлено, що для підтримування ефективного процесу зварювання для досліджуваних зразків тривалість циклу зварювання повинна становити 60 с. Цей процес складається з часу тертя, що складає – 30 с, часу проковування – 20 секунд та часу охолодження конструкції – 10 секунд. Припуск на осадження повинен складати – 4,0 мм, а швидкість обертання підтримуватися постійною на рівні 630 об/хв.

Розроблено нову технологічну схему зварювання різнорідних полімерних матеріалів. Технологічний процес передбачає CAD-проектування деталей, їхнє виготовлення за допомогою 3D друку та зварювання шляхом використання способу ротаційного тертя.

**Практичне значення.** Теоретичні та експериментальні результати, отримані під час виконання роботи можуть бути використані для налагоджування процесів зварювання різнорідних полімерних матеріалів у виробничих умовах, а також при виконанні практичних та лабораторних робіт у навчальному процесі.

**Апробація результатів роботи.** Результати магістерської роботи доповідалися під час проведення наукового семінару кафедри будівництва у 2025 році. За матеріалами роботи представлено тези: “Особливості процесу

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зварювання різнорідних полімерних матеріалів” на XVI Міжнародну конференцію – Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2026).

**Структура роботи:** Магістерська робота включає вступ, чотири розділи, висновки та перелік посилань на літературу, який містить 27 найменувань. Основна частина магістерської роботи викладена на 61 сторінці і вміщає 22 рисунки і 3 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 64 сторінок.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

# 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

## 1.1 Полімерні матеріали в конструкціях

Спеціалісти у галузі зварювання пластмас перш за все повинні знати основні аспекти будови та властивостей полімерних матеріалів.

Полімерні матеріали мають тривимірні ковалентні мережі, утворені в процесі полімеризації, які зазвичай демонструють необхідні фізичні властивості, такі як висока механічна надійність, а також висока термо- та хімічна стійкість.

Полімери повсюдно поширені в сучасному суспільстві. Багато різних типів полімерів використовуються у виробництві плівки та пінопласту, а також фарб та покриттів. З полімерів також створюють гуму, композитні матеріали, а також текстиль та волокна.

Однак властивості полімерів повинні бути відповідними для їхнього цільового використання, незалежно від того, чи є вони функціональними, чи косметичними. Їхні процеси дослідження, розробки та контролю якості значною мірою залежать від вимірювання механічних властивостей, щоб бути успішними.

Хоча багато полімерів використовуються як інженерні матеріали, природні полімери, такі як глютен, пектин і желатин, також можна знайти в харчових продуктах, деревині та інших матеріалах, і вони повинні проходити випробування в такому ж обсязі, як і інженерні полімери.

Полімери зазвичай класифікують на одну з трьох широких груп: термопласти, терморективні пластмаси та еластомери.

Зростаюче використання полімерних матеріалів зумовлене тим, що вони мають потенціал для дешевшого виготовлення та створення недорогих пристроїв, а також, що більш важливо, їхні чудові фізичні властивості можуть бути ефективно використані в різноманітних виробках.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Оскільки полімерні матеріали є основою для різних інженерних застосувань, фундаментальне розуміння структури матеріалу та механічних властивостей є важливим для прогнозування довгострокової роботи полімерних інженерних конструкцій та пристроїв, а також для розробки нових технологій.

Разом з кількісною характеристикою властивостей полімерних матеріалів також необхідно визначати механічну надійність під дією навколишнього середовища.

Серед різних факторів навколишнього середовища вологість є одним з найважливіших. Оскільки полімерні матеріали чутливі до вологого середовища, то волога може поглинатися структурою полімерного матеріалу і взаємодіяти з його компонентами [1].

Такий вплив може бути серйозною проблемою для довговічності інженерних застосувань, що включають полімерні матеріали, оскільки це може призвести до їх структурного руйнування ще до закінчення прогнозованого терміну експлуатації.

Після визначення залежності від впливу вологості необхідно з'ясувати взаємозв'язок між механічними властивостями полімеру та наявності в ньому пустот, оскільки пустоти впливають на дифузію води в систему, що може ініціювати тріщини, які призводять до руйнування конструкції. Під час процесу затвердіння мікроскопічні структурні пустоти, такі як вільний об'єм, можуть утворюватися та затримуватися в полімеризованій структурі.

Таким чином, розуміння наявності мікроскопічних структурних пустот можуть забезпечити базове розуміння механічних властивостей полімерних матеріалів і зрештою призвести до більш повного розуміння довговічності всієї системи.

Полімерні матеріали демонструють багатий спектр механічних властивостей, які тісно пов'язані з їхньою мікроструктурою та способом обробки.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

По суті, такі властивості, як еластичність, межа текучості, повзучість та опір руйнуванню, відображають складну взаємодію між кристалічними та аморфними доменами, ланцюговими переплетеннями та властивою полімеру ієрархічною структурою.

Досягнення в експериментальних методах, від синхротронного розсіювання до цифрової кореляції зображень, дозволили дослідникам з'ясувати механізми багатомасштабної деформації, розкриваючи, як такі явища, як реорганізація кристалів, кавітація, викликана деформацією, та в'язкопружні реакції, керують макроскопічними характеристиками.

Ці дані є вирішальними як для адаптації полімерів до високопродуктивних промислових застосувань - від гнучких мембран до несучих компонентів - так і для розуміння довготривалої деградації в циклічних або екстремальних умовах навколишнього середовища.

Нещодавні дослідження надали вагомі докази впливу умов обробки та деформації на механічну поведінку полімерних матеріалів. Наприклад, у всебічних оглядах детально описано структурні еволюції, викликані деформацією, у кристалізованих полімерах та підкреслено зв'язок між багатомасштабною морфологією та механічними характеристиками [2].

Додаткові дослідження гнучких гідроізоляційних мембран показали, як повітряні пори та мінеральні включення змінюють розподіл напружень та уповільнюють поширення тріщин, пропонуючи вдосконалені стратегії підвищення довговічності полімерцементних композитів [3].

Крім того, було показано, що сучасні підходи до «структурування» обробки перетворюють розроблені молекулярні архітектури на спеціалізовані полімерні плівки з налаштованими механічними властивостями, що ілюструє потенціал контрольованих методів обробки для оптимізації характеристик продукту.

Разом ці роботи підкреслюють глобальне значення зв'язку мікроструктурної динаміки з макроскопічними властивостями матеріалів, тим

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

самим сприяючи інноваціям у різноманітних застосуваннях, починаючи від аерокосмічної галузі та будівництва до побутової електроніки.

Практичний вибір полімерних матеріалів, однак, визначається не лише механічними та трибологічними властивостями, але й ціною, простотою виробництва, обробки та практичними обмеженнями в реальному застосуванні.

У таких процесах, як механічна обробка, матеріал є відомою величиною. Деталь починається як блок матеріалу, або, можливо, кування чи виливок. Її форма змінюється в процесі механічної обробки, але її властиві властивості матеріалу вже встановлені.

Однак в адитивному виробництві властивості матеріалу встановлюються разом з геометрією деталі. Такі ефекти створюють нові виклики, унікальні для адитивного виробництва, а також нові можливості.

Коли властивості матеріалу визначаються разом з геометрією, стає можливим цілеспрямовано та точно контролювати ці властивості в певних областях деталі — вводити такі властивості, як пористість, жорсткість або гнучкість.

Матеріали для 3D-друку є основою сучасного адитивного виробництва. Для інженерів, дизайнерів продукції та виробників вибір правильного матеріалу є важливим для розкриття повного потенціалу 3D-друку. Правильний матеріал визначає, чи підходить деталь лише для прототипування, чи вона є міцною, довговічною та хімічно стійкою для кінцевого виробництва.

Процес друку методом плавлення нитки вважають адаптивним, проте він підходить не для кожного полімерного матеріалу. Через жорсткі обмеження, необхідні для точного видавлювання полімеру з сопла, традиційні матеріали, спочатку оптимізовані для лиття під тиском, не піддаються друку.

Практичний вибір полімерних матеріалів, однак, визначається не лише механічними та трибологічними властивостями, але й ціною, простотою

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

виробництва, обробки та практичними обмеженнями в реальному застосуванні.

Варто відзначити, що на даний час ринок матеріалів для 3D-друку стрімко зростає. Попит є локомотивом зростання. Все більше компаній купують обладнання для адитивного виробництва та масштабують використання АМ. Ще недавно ринок матеріалів для адитивного виробництва оцінювався в 1,5 мільярда доларів. А найближчим часом очікується, що протягом наступних п'яти років він зросте до колосальних 4,5 мільярда доларів.

Високий попит на полімери є закономірним. Полімерні 3D-принтери мають найбільшу встановлену базу, оскільки їх легше та дешевше впроваджувати та експлуатувати.

На даний час чільні місця на ринку полімерів для 3D-принту домінують такі матеріали як полілактид PLA, полікарбонат PC та акрилонітрилбутадієнстирол ABS. Тому дослідження їхнього використання в інженерних конструкціях та питання з'єднання є актуальним на даний час.

## 1.2 Особливості використання різнорідних матеріалів

Наявні на даний момент монолітні матеріали більше не є достатніми для забезпечення необхідних потреб сучасних складних технологій та вимог споживачів [4].

Багато матеріальні з'єднання дозволяють ефективніше використовувати переваги, характерні для кожного матеріалу окремо, шляхом поєднання їх властивостей в одній конструкції [5]. Це дозволяє досягати локальних властивостей компонентів (наприклад, механічної, термічної або хімічної стійкості, оптичних характеристик тощо), які адаптовані до індивідуального застосування.

Прагнення до оптимальніших, легких та високопродуктивних структур, а також тенденція до інтеграції та більшої кількості функцій у кожній деталі

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

можуть бути задоволені шляхом поєднання різних матеріалів у багато матеріальну гібридну структуру [5].

Властивості різних матеріалів спільно використовуються для досягнення необхідних характеристик продукту. Ця тенденція спостерігається для кількох галузей промисловості, а саме:

- автомобільна;
- аеронавтика;
- швейне виробництво;
- інструментальне виробництво;
- імплантати;
- виробництво електроенергії;
- морське застосування.

Поєднання нових матеріалів в одній конструкції вимагає систематичного підходу до вибору компонентів. Оскільки ці матеріали взаємодіятимуть один з одним новими способами, то для цього можуть знадобитися нові виробничі системи. Такий підхід вимагає здатності одночасно оптимізувати вибір матеріалів та їхні геометричні розміри.

Нещодавні проведені дослідження [6] включають пропозиції щодо процедур проектування з використанням багатьох матеріалів та оптимальний вибір матеріалів з урахуванням їхньої легкої ваги та придатності для переробки.

Загальновідомим прикладом є компанія Boeing, яка використовує композитні складові, як основний матеріал у конструкції планера у співвідношеннях - 20% алюмінію, 15% титану, 10% сталі та 5% інші складники.

У сучасних конструкціях кузовів автомобілів високоміцні сталі можуть використовуватися в поздовжніх балках для міцності, алюмінієві сплави в балках бампера для легкості та ударостійкості, а також композитні листи в панелях для легкої ваги та високої жорсткості.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Реалізація проекту Євросоюзу Superlight Car продемонструвала, як можна зменшити масу шляхом поєднання алюмінію, сталі, магнію та термопластів, армованих скловолокном.

Різнорідними можна вважати такі матеріали: «матеріали або комбінації матеріалів, які важко з'єднати, або через їх індивідуальний хімічний склад, або через великі відмінності у фізичних властивостях між двома матеріалами, що з'єднуються».

Гібридні структури можна визначити як: «комбінація двох або більше матеріалів у заздалегідь визначеній конфігурації та масштабі, оптимально призначеній для конкретної інженерної мети».

У більшості випадків до гібридних структур відносять конструкції, що складаються з двох або більше компонентів з різних матеріалів, з'єднаних разом для досягнення певних фізичних характеристик.

Побутові полімерні вироби, такі як ті, що призначені для упаковки продуктів, хоча й здаються на перший погляд простими, є високотехнологічними багатоконпонентними матеріалами.

Зокрема, коли полімерний виріб повинен володіти певними властивостями, яких неможливо досягти одним компонентом, поширеною стратегією розробки продукту є використання різних складників або того самого полімеру, модифікованого шляхом ко полімеризації чи функціоналізації, додавання інших добавок для досягнення бажаних властивостей, або для цей виріб отримують шляхом зварювання матеріалів, які є необхідними для можливості його функціонально використання.

Хоча такий підхід забезпечує бажаний термін служби, він також суттєво ускладнює отримання виробу. Використовуючи упаковку як приклад, для збереження свіжості продуктів, захисту продуктів та брендування товарів зазвичай потрібна комбінація від 3 до 12 полімерів та інших добавок для формування багатошарових або багатоконпонентних продуктів.

Наприклад, багатошарові пакувальні вироби, такі як пакетик-саше для приправ, можуть складатися з внутрішнього шару з поліетилену низької

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

щільності (LDPE) для герметичності, функціонального шару кисневого бар'єру з поліетилен-ко-вінілового спирту, сполучного шару з поліетилен-ко-вінілацетату та зовнішнього міцного шару з поліетилену високої щільності або поліетилентерефталату.

Туким чином можна зробити висновок, що різномірні матеріали на даний час вже широко використовуються в різних галузях народного господарства і на нашу думку цей процес в початковій стадії.

### 1.3 Процеси з'єднання

Серед багатьох виробничих технологій з'єднання було визначено як ключову технологію, що сприяє інноваційному та сталому виробництву. Через функціональні потреби та технологічні обмеження зазвичай неможливо виготовити продукт без певного виду з'єднання.

Вироби зазвичай збираються з використанням кількох компонентів [7], а процеси з'єднання є важливими у виробництві для забезпечення функціональності виробу та підвищення ефективності виробничого процесу.

Покращення властивостей матеріалів та традиційних процесів для монолітних конструкцій, а також розширене використання адитивних виробничих процесів можуть зменшити потребу в з'єднанні та кількість з'єднань у виробі. Тим не менш, виробничі процеси та необхідні функції виробів роблять концепцію «без з'єднань» нереалістичною в більшості випадків.

Більше того, пошук покращених характеристик та продуктивності виробу з гібридних структур з різними класами матеріалів вимагає наявності з'єднань. Тому розуміння технологій з'єднання є ключовим питанням у виробництві. За цього важливим є те, що для покращення ефективності промислового виробництва постійно розробляються нові процеси з'єднання, а також удосконалюються існуючі.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Процеси з'єднання зазвичай є складними і охоплюють широкий спектр підходів, матеріалів і технік. Меслер [8] визначає з'єднання як: «процес, що використовується для об'єднання окремих частин компонентів разом для створення єдиного цілого вузла або структурної одиниці».

Кемпбелл [9] розглядає з'єднання як: «велику кількість процесів, що використовуються для складання окремих деталей у більший, складніший компонент або вузол», а платформа EU Manufature Technology визначає з'єднання як: «Створення зв'язку певного опису між матеріалами або компонентами для досягнення певної фізичної продуктивності».

Цей зв'язок може мати різні форми та може бути описаний як такий, що генерується одним або комбінацією кількох із наступних процесів: механічний - з'єднання, утворене за допомогою механічної дії; хімічний - зв'язок, утворений внаслідок хімічної реакції; термічний - зв'язок, утворений шляхом застосування теплової енергії.

Прагнення до оптимальніших, легких та високопродуктивних конструкцій, а також тенденція до інтеграції більшої кількості функцій у кожній деталі можуть бути задоволені шляхом поєднання різних матеріалів у єдину гібридну структуру.

Характерні властивості різних матеріалів спільно використовуються для досягнення необхідної продуктивності нового продукту. Ця тенденція спостерігається в основних галузях промисловості, медицині, сільському господарстві та у сфері оборони.

Виробництво сучасних конструкцій вимагає систематичного підходу до вибору матеріалів які взаємодітимуть один з одним по-новому в умовах передових виробничих систем. Для цього потрібно синхронно оптимізувати вибір матеріалів та геометрію виробів. Нещодавні розробки включають пропозиції щодо процедур проектування з використанням кількох матеріалів та оптимальний вибір матеріалів з урахуванням їхньої легкої ваги та придатності для переробки. Даний напрямок, хоча і започаткований досить недавно має досить великий потенціал для розвитку.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

## 1.4 Способи зварювання пластмасових деталей

Зварювання пластмас – це термічний або механічний процес, який використовується для з'єднання полімерних деталей шляхом контрольованого впливу тепла, тиску або вібрації.

На відміну від зварювання металів, цей процес враховує оборотну теплову поведінку термопластів, дозволяючи контактним поверхням плавитися, а молекулярним ланцюгам зчіплюватися при охолодженні. Це призводить до міцного, однорідного з'єднання, придатного для застосувань, що вимагають високої механічної та хімічної стійкості.

Розвиток цього типу зварювання розпочався в середині 20-го століття як альтернатива хімічним клеям та механічному з'єднанню. Ранні методи, такі як термічне контактне зварювання, використовувалися для базових застосувань у таких галузях, як будівництво. У 1960-х роках ультразвукове зварювання зробило революцію в автомобільній та медичній промисловості завдяки своїй точності та швидкості. Зовсім недавно лазерне зварювання розширило можливості з'єднання у складних застосуваннях, таких як електронні корпуси. Впровадження промислової автоматизації оптимізувало повторюваність, якість з'єднання та експлуатаційну ефективність зварних виробів.

Лазерне зварювання використовує спрямований лазерний промінь для точного плавлення термопластів. Цей спосіб зварювання підходить для виготовлення складних геометрій та автоматизованих виробничих ліній, вимагає матеріалів, що поглинають лазерне випромінювання, або спеціальних добавок. Такі варіанти, як контурне зварювання та квазіодночасне зварювання, оптимізують розподіл тепла. Вони використовуються у високоестетичних галузях у медичному та споживчому секторах.

Перевага лазерного зварювання пластмас над іншими методами з'єднання особливо помітна, у випадку, коли до якості зварного шва та надійності процесу висуваються високі вимоги.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Лазерний промінь не торкається поверхні деталі, подає саме ту кількість енергії та забезпечує абсолютно герметичні і візуально ідеальні зварні шви. За допомогою лазерного процесу можна реалізувати навіть складні тривимірні конструкції. Широкий спектр застосування процесу, який включає обробку інноваційних матеріалів, підтверджується безліччю комбінацій матеріалів, які можна зварювати.

Під час лазерного зварювання пластмас з'єднуються полімери, прозорий для лазера, та такий, що поглинає лазер. Лазерний процес використовується замість класичних технологій з'єднання, таких як клейове з'єднання або ультразвукове зварювання, і якість результатів у даному випадку є кращою.

Більшість термопластів є повністю прозорими для типових довжин хвиль лазера. Для можливості поглинання лазерних променів до пластмас додаються добавки, які не погіршують інші властивості матеріалу. Коли лазерний промінь потрапляє на поглинаючу поверхню, його енергія перетворюється на тепло точно і лише в потрібному місці.

Характерним для лазерного зварювання є можливість управління якістю зварного шва під час виробництва конструкції. В цьому випадку засоби для забезпечення якості, інтегруються у технологічний процес. Вони формують основу для постійного стеження за станом зварного шва. В даному випадку зменшується час і зусилля, необхідні для контролю, і забезпечується швидка індикація дефектів.

Ультразвукове зварювання (рис.1.1) використовує високочастотні механічні коливання (15-40 кГц) для створення тепла тертя на межі розділу деталей, що призводить до плавлення матеріалу та утворення молекулярних зв'язків за 0,1-2 секунди. Цей вид зварювання ідеально підходить для з'єднання тонких ПВХ-плівок, вирізняючись своєю швидкістю та точністю. Він також використовується в електроніці та автомобілебудуванні.

Зварювальні апарати для ультразвукового зварювання схожі на установки для точкового або контактного зварювання. Рупор тисне на деталі, що з'єднуються, застосовуючи тиск та енергію, доки вони не утвориться зварний

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

шов. Завдяки використанню сучасних промисловим систем керування ультразвукове зварювання є швидким та повторюваним процесом.

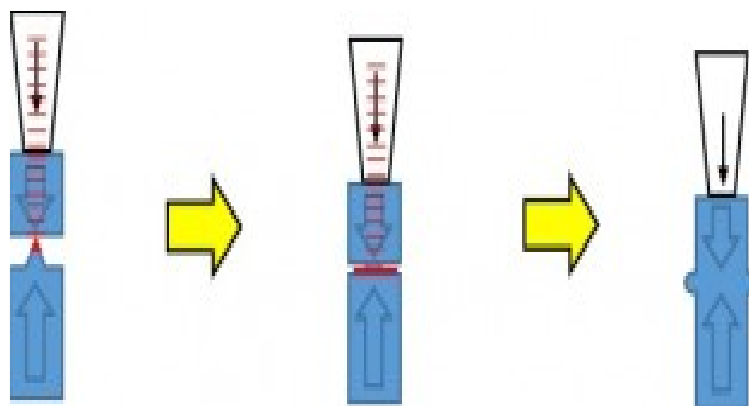


Рисунок 1.1 – Ультразвукове зварювання

Важливим є той факт, що ультразвукове зварювання можна використовувати не тільки для однорідних полімерів, але і до різнорідних. Ефективність зварювання різнорідних термопластичних матеріалів передбачає врахування температури зварювання, хімічної сумісності та індексу плинності розплаву.

Зазвичай температура плавлення двох різних полімерів для їхнього задовільного зварювання повинна відрізнятись не більше ніж  $4^{\circ}\text{C}$ .

Хімічна сумісність – це складне поняття, яке зводиться до пропорцій радикалів у полімерах. Сумісність існує, коли ці значення в двох матеріалах подібні.

Індекс плинності розплаву – це міра того, наскільки легко пластик тече, коли він переходить у рідкий стан. Для будь-якого матеріалу індекс плинності розплаву можна знайти в літературних джерелах. Для найкращих результатів пластмаси, що з'єднуються, повинні мати подібні індекси плинності розплаву.

Високочастотний спосіб зварювання використовує високочастотні електромагнітні поля для генерації тепла та з'єднання матеріалів, що мають в своїй будові хімічні диполі, такі як ПВХ та поліаміди. Він ідеально підходить

для надувних виробів та промислового текстилю завдяки своїй здатності створювати герметичні з'єднання.

Вібраційне зварювання генерує тепло тертя шляхом лінійного або орбітального руху між деталями під тиском, плавлячи матеріал і утворюючи міцний зв'язок. Воно є ефективним для напівкристалічних та аморфних пластмас, включаючи армовані матеріали; його використовують у великих деталях або деталях зі складною геометрією.

Інфрачервоне зварювання (рис. 1.2) це безконтактний метод, який використовує інфрачервоне випромінювання для плавлення термопластичних поверхонь.

Інфрачервоне випромінювання – це форма електромагнітного випромінювання, яке передається у вигляді чорного або червоного світла, залежно від довжини хвилі. Воно ефективно для естетичних застосувань, а також у автомобільній та медичній промисловості, завдяки чистим з'єднанням.



Рисунок 1.2 – Інфрачервоне зварювання

Зварювання тертям (рис.1.3) виконує з'єднання деталей з круговою геометрією за допомогою обертального тертя. Одна деталь обертається з

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

високою швидкістю, а інша залишається нерухомою під осьовим тиском. Цей вид зварювання є ефективним для армованих матеріалів та специфічних застосувань, таких як приварювання деталей до резервуарів та труб до конструкцій.

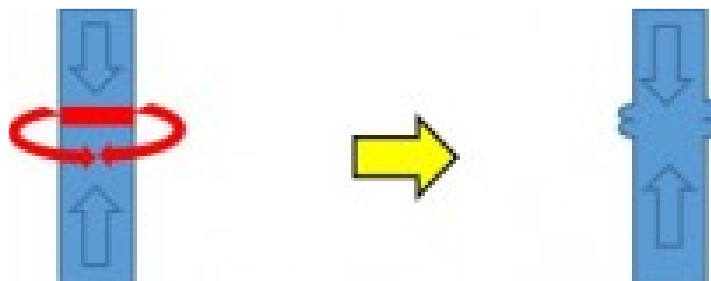


Рисунок 1.3 - Зварювання полімерів гарячим газом

Спосіб зварювання полімерів гарячим газом (рис. 1.4) використовує потік гарячого повітря для розплавлення контактних поверхонь, створюючи міцне з'єднання. Ця техніка добре працює для масового виробництва, ремонту та невеликих проектів.

Ключові переваги зварювання гарячим повітрям включають простоту використання, універсальність та мінімальну підготовку, що робить його надійним вибором для всіх видів застосувань.



Рисунок 1.4 - Зварювання полімерів гарячим газом

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Досить поширеним є метод стикового зварювання оплавленням (рис. 1.5) Нагріта пластина розплавлює поверхні двох полімерних деталей, які потім пресуються разом.

Метод стикового зварювання оплавленням є ефективним для товстих компонентів, які потребують міцного з'єднання. Переваги цього способу зварювання включають стабільні, надійні зварні шви та можливість роботи з різними пластиковими матеріалами, що робить його найкращим вибором для складних застосувань.

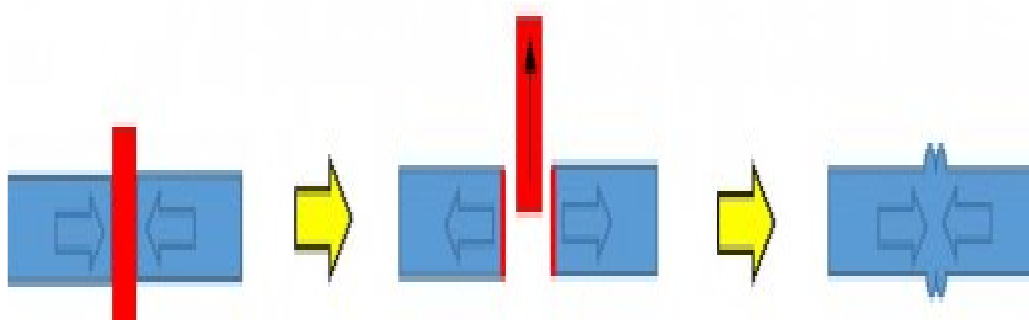


Рисунок 1.5 – Стикове зварювання оплавленням

Зварювання пластмас на даний час значно просунулося завдяки потребі в більшій ефективності, точності та екологічності. Автоматизація та роботизація оптимізували процеси, покращивши повторюваність та зменшивши кількість людських помилок. Ці технології застосовуються в таких галузях, як автомобілебудування та електроніка, де потрібна висока якість, гнучкість дизайну та зниження експлуатаційних витрат.

Досягнення в лазерному зварюванні розширили його застосування до різних матеріалів, пропонуючи точний контроль над параметрами, такими як потужність та швидкість. Це дозволяє створювати міцні з'єднання та естетичну обробку, що особливо корисно в медичному та споживчому секторах, які вимагають високої точності та візуальної якості.

Екологічне зварювання набуло популярності завдяки розробці методів, сумісних з перероблюваними та біорозкладними пластмасами. Такі методи, як

інфрачервоні та ультразвукові, виключають використання розчинників та хімічних клеїв, сприяючи більш екологічно чистим процесам. Ці тенденції підкреслюють прагнення галузі до інновацій та екологічності у виробництві пластмас.

Зварювання пластмас – це технологія, яка постійно розвивається, щоб відповідати вимогам сучасної промисловості. Сучасні тенденції, такі як автоматизація, використання перероблених пластмас та досягнення в лазерному зварюванні, відображають зосередженість на сталому розвитку та точності процесів. Ці інновації трансформують такі сектори, як автомобілебудування, електроніка та медицина, дозволяючи створювати легші, міцніші та екологічніші продукти.

Оскільки галузі промисловості шукають рішення, які б поєднували вартість, ефективність та екологічну відповідальність, зварювання пластмас позиціонує себе як незамінний інструмент для цього. Його здатність адаптуватися до передових матеріалів та складних застосувань забезпечує його актуальність у майбутньому, лідируючи в інноваціях у виробництві та дизайні.

### **1.5 Складнощі зварювання різнорідних матеріалів**

З'єднання різнорідних полімерних матеріалів стає все більше актуальнішим питанням. На даний з'єднання різнорідних полімерів традиційно здійснюється за допомогою клеїв або механічних методів, таких як кріплення, застібки тощо. Такі підходи не завжди мають достатню ефективність. Для випадків, коли клеї та механічне склеювання не можуть бути використані альтернативою є зварювання.

Багато пластмасових виробів доводиться використовувати в середовищах, де клей складно наносити, наприклад, у медицині. Пошук клеїв, які відповідають вимогам медичних використань, займає багато часу і не є простим питанням. Крім того, клеї не змочуються на поверхнях пластмас з

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

низькою поверхневою енергією, таких як поліолени, які зазвичай використовуються в медичних виробках.

Для малої електроніки необхідність робити вузли коактнішими обмежує простір, що доступний для розміщення додаткового матеріалу для з'єднання. Навіть тонкий шар клею може бути суттєвою перешкодою для продуктивності деяких виробів.

Виготовлення медичних виробів великих розмірів часто вимагає їх розділення на кілька компонентів для можливості друку, з врахуванням обмежень, що виникають через розміри платформи, що згодом вимагає повторного їх з'єднання. Як правило, в таких випадках вдаються до використання роз'ємних з'єднань для складання виготовлених компонентів у великі медичні пристрої. Тим не менш, такий традиційний підхід до з'єднання має певні ризики ослаблення або зміщення болтів та гайок під час зворотно-поступальних рухів, властивих великому медичному апарату [11].

Отже, дослідження методів з'єднання для об'єднання друкованих компонентів у великі пристрої стає критичним напрямком у сфері виготовлення високотехнологічних інженерних конструкцій.

Автори [12] повідомляють, що зварювання різнорідних полімерів є необхідною та ефективною технологією з'єднання матеріалів, які ефективно демонструють свої функції у певній композиції, або у випадках, коли один вид продукту потрібно використовувати в різних середовищах.

Зазвичай зварювання різнорідних матеріалів виконується в галузях зварювання, пов'язаних з медициною, зокрема створення штучних органів, нано-біомедициною, електронною технікою, енергетичними технологіями для виробництва та зберігання електроенергії, автомобільною галуззю де необхідним є з'єднання між м'якими та твердими матеріалами (органічними речовинами та металами, ізоляторами), аерокосмічною галуззю для з'єднання функціональних матеріалів (напівпровідників та металів з ізоляторами) тощо. Тобто, техніка зварювання різнорідних матеріалів буде дуже важливою та необхідною в багатьох галузях промисловості сьогодні..

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Полімери, полімерні композити та полімерно-металеві структури все частіше використовуються в різних продуктах, головним чином завдяки пов'язаній з цим економії ваги. Зазвичай ідеальний компонент не повинен мати жодних недоліків, які могли б погіршити механічну міцність після зварювання. Тим не менш, розміри робочих поверхонь зазвичай обмежені їх виробничим процесом. Тому розуміння та розробка доступних і нових методів з'єднання є ключовим питанням у промисловості.

Таким чином можна вважати, що з'єднання між різнорідними полімерами на даний час фактично обмежені механічним кріпленням та способами клейового з'єднання, що створює проблеми через їхні недоліки. Тому необхідно розробити новий метод зварювання.

Про зварювання різнорідних матеріалів в науковій літературі повідомляється про небагатовисокі публікації. Особливістю проблеми є те, що класичні методи зварювання пластмас при безпосередньому використанні не є ефективними.

Особливістю наведених вище конструкцій є те, що їхнє виготовляються потребує з'єднання різних матеріалів. Однак існують суттєві труднощі для з'єднання матеріалів з різними хімічними, механічними, тепловими та електричними властивостями.

Несумісність на хімічному, тепловому та фізичному рівнях (теплове розширення, пластичність, механіка втоми/руйнування, модуль пружності тощо) може створювати проблеми як для самого процесу з'єднання, так і для структурної цілісності з'єднань під час фази використання виробу. Необхідно враховувати гальванічну корозію, різне теплове розширення та інші наслідки близького зближення двох різних матеріалів.

Щоб мати можливість з'єднувати різнорідні матеріали, конструкція виробу та конструкція процесу з'єднання повинні враховувати ці труднощі. Тобто відмінності повинні бути мінімізовані, завдяки вибору матеріалу або за допомогою інших засобів. Це стає дедалі складнішим, оскільки основна

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

природа – структура на атомному рівні, мікроструктура та (макроструктура) – різних матеріалів, що використовуються, стає все більш відмінною.

### 1.6 Висновки та постановка завдань досліджень

1. Проведено аналіз фізичних та хімічних властивостей полімерних матеріалів.
2. Досліджено основні сфери використання полімерних матеріалів.
3. Проаналізовано основні способи зварювання пластмасових виробів
4. Розглянуто питання особливостей зварювання різнорідних полімерів.
5. На основі проведеного огляду літературних джерел провести дослідження процесів, які відбуваються при з'єднанні різнорідних матеріалів та встановлення можливості їх зварювання допомогою відповідних способів.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

## 2. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Методи проектування деталей

Методика проведення експериментів в магістерській роботі включає проектування деталей для зварювання, встановлення оптимальних параметрів процесу 3D-друку та дослідження технологічних параметрів процесу зварювання.

Останніми роками відбувається значний прогрес у виготовленні виробів з полімерних матеріалів та складових частин до них. Створення сучасних конструкцій потребує отримання складових елементів, які володіють підвищеною точністю, довговічністю та універсальністю.

Представники промисловості вкладають інвестиції у проведення досліджень та нові проекти для покращення експлуатаційних характеристик виробів, включаючи високі механічні властивості матеріалів їх підвищену стійкість до хімічної корозії та більшу гнучкість у дизайні.

На рисунку 2.1 представлено зовнішній вигляд досліджуваних зразків. Досліджуваний зразок являє собою стрижень діаметром 10 мм та довжиною 60 мм.

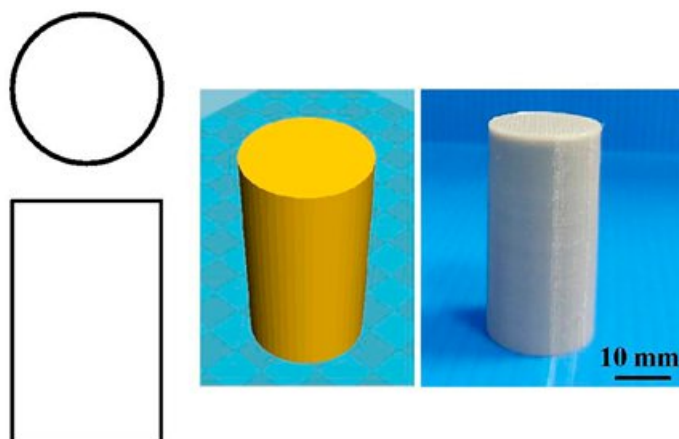


Рисунок 2.1 - Зовнішній вигляд зразків

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

При проведенні досліджень для створення програми 3D-друку було використано програмне забезпечення Solidworks. Процес підготовки виробництва конструкції виконується за допомогою програми Cura 4.3.1.

## 2.2 Основні та витратні матеріали

Для виготовлення деталей використовували такі матеріали: полілактид PLA, полікарбонат PC та акрилонітрилбутадієнстирол ABS.

Полілактид є біологічним розкладним матеріалом. Його виготовляють з відновлюваних ресурсів, таких як цукрова тростина, картопля, рис і пшениця. Цей матеріал є досить популярним для 3D друку завдяки простоті використання, екологічності, великому вибору кольорів та низькій вартості. Полілактид це один із найбільше технологічних компонентів у використанні матеріалів. Він плавиться при відносно невисокій температурі і легко піддається обробленню.

Перевагами PLA, крім технологічності процесу друку – відмінна якість поверхонь виготовлених деталей та мінімальне їхнє деформування. Технічні характеристики матеріалу представлені в таблиці 2.1

Полікарбонат PC це лінійний полієфір вугільної кислоти  $H_2CO_3$  і ароматичного спирту. Він відноситься до аморфних термопластів, характерною ознакою яких є висока прозорість. Технічні характеристики полікарбонату представлено в таблиці 2.1

АБС-полімер (акрилонітрилбутадієнстирол) — це трійний сополімер, який отримує полімеризацію стиролу і акрилонітрилу в присутності полібутадієну.

Пропорції можуть змінюватися від 15 до 35% акрилонітрилу, від 5 до 30% бутадієну та від 40 до 60% стиролу. Завдяки тому, що він є сополімером стиролу (полистирол), бутадієну (каучук) і акрилонітрилу (SAN-пластики) акрилонітрилбутадієнстирол зібрав у собі всі властивості цих полімерів.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Технічні характеристики акрилонітрилбутадієнстиролу представлено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 Технічні характеристики матеріалів

№	Матеріал	PC полікарбонат	PLA полілактид	ABS акрилонітрил бутадієнстирол
2	Максимальна температура використання, °C	82	80	90
3	Температура плинину, °C	280...300	180 ...220	220...260
4	Температура плавлення, °C	140...150	150..170	150
4	Міцність на розрив, МПа	61...66	53	40...50
	Модуль пружності, МПа	3300	3500	2000
5	Твердість R	118	70...90	100...110
6	Густина, г/см <sup>3</sup>	1,19	1,23	1.03...1,07
7	Модуль згину, МПа	2210...2410	2300...2800	1540 ...2880
8	Поглинання води, %	0.15... 0.2	0.3...4	0,16...1,0
10	Температура склування	145	65	105

### 2.3 Обладнання та прилади для проведення досліджень

Для друку зразків використовувався принтер Voron 2.4 (рис.2.2). 3D-принтер Voron 2.4 - це високотехнологічний пристрій для виконання професійних робіт у галузі 3D-друку.

Достатня робоча зона 350x350x350 мм відкриває великі можливості для реалізації проєктів, починаючи з мініатюрних деталей.

При високій швидкості друку та швидкості переміщення до 500 мм/с, апарат забезпечує високу продуктивність процесу, надійну та тиху роботу і чудову якість друку.

Повністю закритий корпус пристрою та магнітна друкувальна платформа PEI забезпечують стабільне середовище для друку широкого спектру матеріалів в тому числі полімолочної кислоти та полікарбонату.



Рисунок 2.2. Принтер Voron 2.4

Можливість нагрівання сопла до 300°C, а столу до 120°C дозволяє працювати в широких межах технологічних параметрів. Чотирьох точкова система калібрування забезпечує ідеальні базові шари при виконанні кожної деталі. Технічні параметри принтера представлені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 Технічні параметри принтера

№	Технічні параметри	Одиниці	Значення
1	Робоча зона	мм	350x350x350
2	Швидкість руху	мм/сек	500
3	Швидкість друку	мм	300
4	Температура нагрівання сопла	°C	до 300
6	Потужність	Вт	250

Для проведення досліджень процесу зварювання різнорідних полімерних матеріалів використовувалась експериментальна установка, виготовлена на базі токарно-гвинтового верстата ТВ-16. Експериментальна установка представлена на рисунку 2.3, а технічні її характеристики наведені в таблиці 2.3.

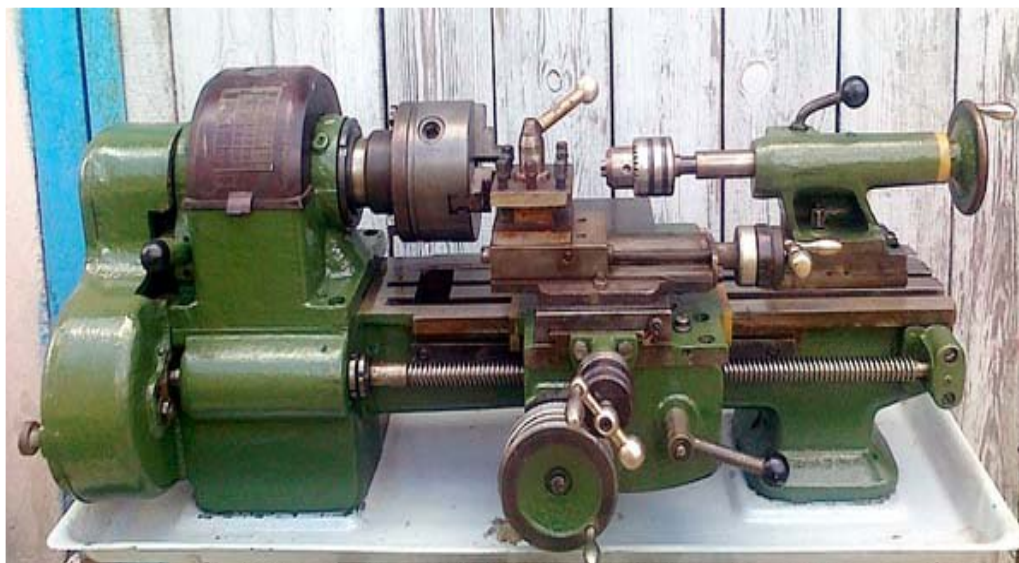


Рисунок 2.3 Експериментальна установка для зварювання тертям

При виконанні досліджень конструкція у становки дозволяє встановлювати шість ступенів оборотів шпинделя – 160, 250, 400, 630, 1000 і 1600 об/хв.

Таблиця 2.3 Технічні характеристики експериментальної установки

№	Технічні параметри	Одиниці	Значення
1	Діаметр оброблення	мм	до 160
2	Відстань між центрами	мм	250
3	Ширина отвору у шпинделі	мм	18
4	Швидкість обертання	об/хв	160 ...1600
6	Потужність	КВт	0,5

Під час проведення досліджень зварювання температура процесу визначається за допомогою безконтактного інфрачервоного термометра GM 900. Відомо, що під час зварювання тертям зварний шов випромінює інфрачервону енергію.

Безконтактний інфрачервоний термометр GM 900 (рис.2.3) вимірює температуру поверхні будь-яких речовин. Діапазон вимірювальних температур складає:  $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а коефіцієнт випромінювання, що налаштовується, дозволяє з мінімальною похибкою виміряти температуру будь-якого матеріалу. На відміну від контактних приладів термометр-пірометр вимірює температуру миттєво. Йому потрібно всього пів секунди для відображення актуального значення, а якщо затиснути кнопку-курок, то безконтактний пірометр відобразить температуру в режимі реального часу.



Рисунок 2.3 - Безконтактний інфрачервоний термометр GM 900

## 2.4 Контроль якості зварних швів

Для визначення якості зварних швів використовувались декілька методів – візуально-вимірювальний контроль, дослідження на міцність та статичний вигин.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Міцність на статичний вигин - це здатність матеріалу витримувати зусилля на згин, що діють перпендикулярно до його поздовжньої осі. Міцність на вигин є важливою характеристикою для багатьох виробів, особливо конструкційних композитів, які використовуються у складних цілях.

Під час випробувань на вигин визначається здатність матеріалу чинити опір вигину та розриву під час навантаження. Ці результати випробувань допомагають визначити придатність продукту для застосування, довговічність і безпеку користувача.

Випробування на статичний вигин рекомендується проводити за схемою, показаної на рисунку 2.4.

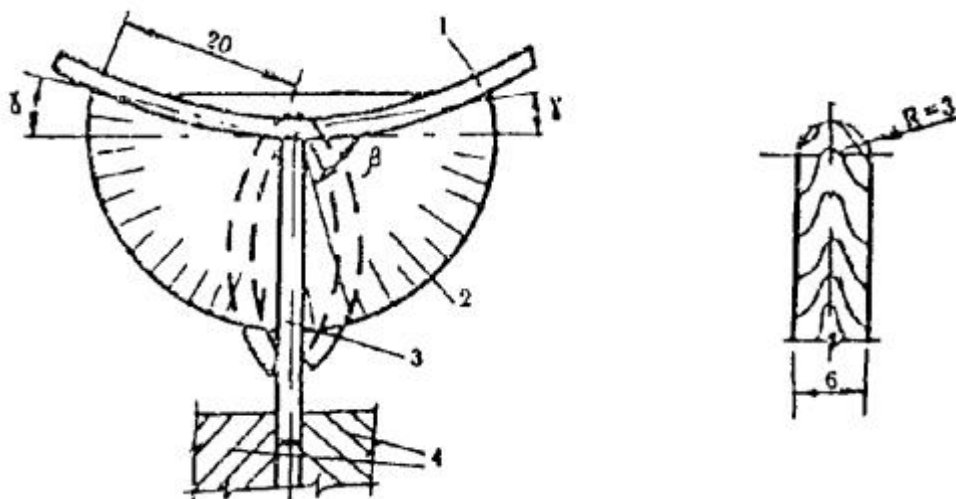


Рисунок 2.4 - Схема дослідження зварних зразків на згин

Випробування слід здійснювати за допомогою плавної деформації зразка протягом 2-5 с.

Задовільними вважаються результати випробування, якщо не менше 80% витримало загин на кут  $\alpha = (2\beta + 2\gamma) = 180^\circ$  при відсутності руйнувань, які виявляються без збільшувальних приладів.

Дослідження на міцність виконували на розривній машині шляхом проведення осьового розтягу. З дослідних зварних з'єднань вирізали зразки – лопатки, заданих розмірів, відповідно до ДБН В.2.5-41:2009.

Розрізняють три типи руйнування. Перший тип руйнування - спостерігається після утворення "шийки" - звуження площі поперечного перерізу зразка під час його розтягу. Руйнування зазвичай настає, не раніше ніж при досягненні подовження зразка більше ніж 50 % і є ознакою високої пластичності. За цього лінія розриву проходить по основному матеріалу і не перетинає площину зварювання

Другий тип руйнування відзначається при досягненні границі текучості в момент початку формування "шийки". Руйнування відбувається при незначних величинах подовження не менше 20 % і не більше 50 % та характеризує низьку пластичність. Лінія розриву в даному випадку перетинає площину зварювання, але разом з тим має ознаки пластичного характеру.

Третій тип відбувається до моменту досягнення границі текучості і до початку формування "шийки". Руйнування відбувається при подовженні зразка не більше 20% і характеризує крихке руйнування. Лінія розриву проходить точно по площині зварювання.

Результати випробування вважають позитивними, коли під час випробування на осьовий розтяг не менше 80 % зразків мають пластичний характер руйнування I-го типу, а інші 20 % зразків характер руйнування II-го типу. За цього руйнування III-го типу не допускається.

Випробування на розтяг можна проводити на будь-якій розривній машині, яка забезпечує точність виміру навантаження з похибкою не більше 1 % вимірюваного значення, а потужність машини дозволяє розірвати зразки (зусилля від 5000 до 10000 Н) і яка має регульовану швидкість

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

### 3. АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ РІЗНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 3.1 Аналіз технічних характеристик досліджуваних матеріалів

Адитивне виробництво – це технологія, яка швидко розвивається та охоплює велику кількість промислових застосувань. В її основу закладено процес наплавлення за допомогою спеціальних ниток - дротів для виготовлення тривимірних об'єктів.

Для функціонування адитивного виробництва використовуються велика кількість різноманітних матеріалів. Особливістю цих матеріалів є те, що вони повинні забезпечувати задані властивості форми, текстури, механічні, теплові, а також реологічні характеристики для виготовленої деталі.

Інженерні полімери для 3D-друку суттєво відрізняються між собою за властивостями, такими як міцність (на розтяг, ударостійкість), жорсткість, термостійкість/хімічна стійкість, гнучкість а також поглинання вологи.

Досить поширеними матеріалами для 3D-друку є - полілактид PLA, полікарбонат PC та акрилонітрилбутадієнстирол ABS. Для розуміння можливості застосування різноманітних матеріалів об'єднаних у одній конструкції необхідно провести аналіз їхніх властивостей.

Ключові властивості, які слід враховувати є наступними

- механічні (міцність, модуль, видовження);
- теплові (HDT, температура друку);
- хімічна стійкість;
- чутливість до вологи, оскільки вони визначають придатність для конкретних застосувань, від концептуальних моделей до деталей кінцевого використання.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Технологія адитивного виробництва демонструє надзвичайно привабливі характеристики, а саме здатність створювати складні та довільні структури на основі цифрових проектів.

Таким чином можна виготовляти різноманітні біомедичні пристрої, такі як протези, тканинно-інженерні каркаси, анатомічні моделі для хірургічної підготовки, індивідуальні імплантати та системи доставки ліків на замовлення тощо [22].

Ось чому в останні роки медична спільнота більше цікавиться тканинно-інженерною технікою (AM), особливо у зв'язку з регенерацією кісток [23]. На основі методів AM вчені вже почали досліджувати виготовлення структур каркасів з характеристиками, подібними до реальної кісткової тканини [24].

Такі каркаси зазвичай виготовляються з натуральних та синтетичних полімерів за допомогою 3D-біодруку. Каркаси з кісткової тканини, надруковані за допомогою 3D-друку, можуть повністю реконструювати структуру рани пацієнта [25].

Каркаси повинні бути виготовлені з біосумісних матеріалів для покращення клітинного прикріплення та проліферації, запобігаючи імунним та цитотоксичним реакціям. Крім того, матеріали повинні бути біорозкладними, щоб забезпечити заміну каркаса регенованою тканиною в потрібний час.

Для отримання таких інженерних конструкцій необхідно використання різних матеріалів, для надання каркасам необхідних властивостей. Особливо складним завданням є з'єднання компонентів з різних матеріалів в одну конструкцію. Іншими словами для створення таких високотехнологічних конструкцій необхідним є зварювання різнорідних матеріалів.

Для наведеного прикладу та інших використань потенційно можливими є вже перераховані вище - полілактид PLA, полікарбонат PC та акрилонітрилбутадієнстирол ABS. Розглянемо детальніше особливості цих матеріалів

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Полілактид – це біологічний полімер, що виготовляється з відновлювальних природних ресурсів, а саме кукурудзяного крохмалю, цукрової тростина тощо. Він є біологічно розкладним і має високу технологічність друку.

Однією з важливих характеристик полімолочної кислоти є її низька температура плавлення – 180 ... 220°C, тому даний матеріал можна використовувати практично на кожному 3D принтері.

За цього його склування відбувається при 60°C. Міцність і гнучкість PLA є помірними, що дозволяє виготовляти міцні та і гнучкі об'єкти. Крім того, він має мінімальне осадження, що робить цей матеріал ідеальним для виготовлення точних моделей.

Перевагами PLA, крім легкості процесу друку – відмінна якість поверхонь виготовлених деталей та мінімальне їхнє деформування.

Основними обмежувальними чинниками полілактиду у функціональних застосуваннях є низька термостійкість (деформується вище 60°C), крихкість та обмежена механічна міцність. .

ABS – це інженерний кополімер на основі нафти, що складається з трьох мономерів: акрилонітрилу, бутадієну та стиролу. Ця комбінація забезпечує чудовий баланс жорсткості, міцності та ударостійкості.

Процес друку акрилонітрилбутадієнстиролу відбувається за температури 230...260 °C, з підігрітим платформою (90...110 °C) в закритій камері для зменшення термічної деформації. Варто відзначити, що температура плавлення акрилонітрилбутадієнстиролу знаходиться в певних межах, оскільки цей полімер є аморфною речовиною. Його розм'якшення відбувається починаючи з 105 °C і в процесі нагрівання збільшується до температури в'язкого плинну до 260°C.

При температурах в'язкого плинну розплавлений матеріал характеризується відмінною адгезією шарів, а отримані деталі - міцною механічною цілісністю та високою стабільністю.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Перевагами полімеру ABS є висока механічна та термічна стійкість, а також стабільність розмірів. Акрилонітрилбутадієнстирол використовується у функціональних компонентах та деталях, що несуть навантаження.

Основні недоліки акрилонітрилбутадієнстиролу наступні: чутливість до ультрафіолету – при тривалому впливі сонячного світла матеріал може жовтіти та ставати крихким; висока горючість – ABS легко загоряється без спеціальних добавок, хоча є модифікації з підвищеною вогнестійкістю; слабка стійкість до розчинників – деякі розчинники, зокрема ацетон, можуть пошкодити структуру матеріалу.

Полікарбонат є лінійним поліефіром вугільної кислоти і ароматичного спирту. Він відноситься до групи аморфних полімерів. Його зовнішньою ознакою є висока прозорість. Завдяки своїй високій міцності і ударній в'язкості, що складає 250...500 кдж/м<sup>2</sup> широко застосовуються як конструкційний матеріал для різних галузей промисловості. Так само використовуються для виготовлення захисних шоломів у велосипедному та мотоциклетному спорті.

Полікарбонат має досить високу температуру плавлення. Номінальна температура плавлення складає 140°C, а температура в'язкого плинуну полімеру знаходиться в межах 280...300. Технічні характеристики полікарбонату представлено в таблиці 2.1.

Аналіз властивостей досліджуваних матеріалів показує, що досліджувані матеріали мають різні технічні характеристики, зокрема температуру плавлення, що є суттєвими чинниками для їхнього надійного зварювання.

### 3.2 Теоретичні аспекти зварювання різнорідних полімерних матеріалів

Зварювання різнорідних полімерів є досить складним процесом тому його реалізація вимагає розуміння теоретичних основ утворення такого з'єднання. Потрібно враховувати не лише хімічну сумісність або

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

змішуваність двох полімерів, але й їх відносну в'язкість, яка впливає на те, чи може відбуватися міжмолекулярна дифузія полімерів через межу розплаву.

Зварювання полімерів вимагає створення умов для дифузії полімерних ланцюгів через межу розплаву. Без проходження процесу дифузії досягається лише поверхневий, адгезійний зв'язок.

Для того, щоб відбулася дифузія полімерних ланцюгів, два розплави повинні мати подібну в'язкість. Якщо ця умова не витримується, то час контакту поверхонь буде досить коротким, оскільки один з розплавів просто переміщається по поверхні іншого під тиском, і дифузія в даному випадку не відбувається. За інших умов, коли матеріали мають близьку в'язкість під дією зусилля вони будуть переміщатися з подібною швидкістю, збільшуючи час контакту.

Таким чином можна зробити висновок, що в'язкість є критичним чинником проходження процесу дифузії. В'язкість матеріалу за цього є мірою товщини розплаву.

Під час зварювання різнорідних полімерів необхідним є підібрати матеріали та створити умови для того, щоб в'язкість в зоні контакту цих матеріалів була якомога ближчою.

Виходячи з аналізу літературних джерел нами було зроблено вибір способу з'єднання різнорідних матеріалів за допомогою зварювання тертям.

Особливістю проходження процесу зварювання ротаційним способом тертям різнорідних полімерних матеріалів може бути наявність асиметрії температурного та деформаційного полів. Наявність такої асиметрії призводить до переміщення поверхні тертя до заготовки з меншим значенням опору зсуву за температури зварювання. Це говорить про те, що, схоплення поверхонь відбувається вже з самого початку процесу зварювання. І хоча такі з'єднання зазвичай можуть є недосконалими, вони можуть впливати на подальший хід процесу.

Переміщення поверхні тертя під час початкової стадії нагрівання можна пояснити зміцнюючою дією міцного матеріалу після схопленням

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

поверхонь та деформаційним зміцненням в певному напрямку і зменшенням міцності матеріалу із збільшенням температури у протилежному напрямку.

На початку процесу тертя домінує процес зміцнення і поверхня тертя з меншим опором зсуву переміщується в полімер з нижчими механічними характеристиками. Руйнування може проходити із вириванням глибинних шарів матеріалу. При зростанні часу нагрівання, завдяки збільшенні температури, домінує процес зниження міцності матеріалу, і поверхня тертя переміщається в сторону поверхні первинного контакту. Про ці ефекти потрібно знати, розуміти їхню суть та вживати заходів для попередження ймовірних явищ асиметрії.

### 3.2 Процес моделювання конструкцій

Стрімкий розвиток сучасного виробництва у всіх галузях промисловості, транспорту а також медицини ставить перед інженерами виготовлення конструкцій з новітніх матеріалів, які відрізняються високою якістю, надійністю та високою точністю.

3D-моделювання це процес створення моделей тривимірних конструкцій за допомогою відповідних програм. CAD моделі зазвичай представляються як двохвимірні зображення.

Моделювання полімерних виробів є складним багатоетапним процесом, який починається із створення 3D моделі за допомогою відповідного програмного забезпечення. Розроблення точної цифрової моделі деталей відбувається на основі опису або креслень у CAD програмах.

Точна візуалізація деталі значно покращує якість практично всіх характеристик проектування, які відтворюються на подальших стадіях процесу виробництва. Досить часто елементи проектування, які створені на ранніх етапах, не задовільняють конструкторів, тому ці елементи потрібно створювати потрібно з нуля. Таким чином висока якість і реалізація

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

первинного конструкторського бачення виробу у виграші від високої точності цифрової візуалізації.

Крім цього, 3D орієнтований виробничий процес, побудований на основі 3D моделювання може суттєво зменшити витрати, які пов'язані з використанням ітераційного проєктування. Завдяки реальним матеріалам і високотехнологічному процесу комп'ютерної обробки, конструктори можуть досить точно проводити візуалізацію вигляду продукту і визначати його в контексті значно раніше, що дає можливість виконувати гнучкіші ітерації.

Висока швидкість та економічність 3D виробничого процесу виходить далеко за межі дизайнерських рішень. Цей процес добре підходить для виготовлення ультрареалістичних візуальних об'єктів з моменту затвердження остаточного варіанту дизайну виробу паралельно з запуском його виробництва. Немає потреби чекати на виготовлення фізичних прототипів, що дозволяє суттєво скоротити час промислового виробництва та виходу виробу на ринок.

Для виготовлення стержнів та труб можна використати тривісний метод пошарового наплавлення матеріалу за горизонтального або вертикального розміщення труби. Такий підхід передбачає застосування опорних конструкцій для встановлення плавного процесу друку.

Використання опорних конструкцій має як переваги так і недоліки. До переваг можна віднести надійну фіксацію конструкції та просту траєкторію наплавлення шару полімеру. Недоліком методу є додаткові витрати матеріалу на виготовлення таких споруд, можливі пошкодження виготовлених деталей під час їхнього усунення, а також зачищення площі контактів.

Під час виготовлення полімерних виробів, спочатку деталі проєктуються у відповідних САД програмах (у нашому випадку Solidworks), після чого проводиться аналіз за допомогою САМ програм (у нашому випадку Cura 4.3.1) стосовно можливості їхнього виготовлення, з подальшим створенням G-коду. За допомогою G-коду відбувається виготовлення потрібних деталей в 3D принтері. Результати проєктування представлені на рисунках 3.1 і 3.2

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

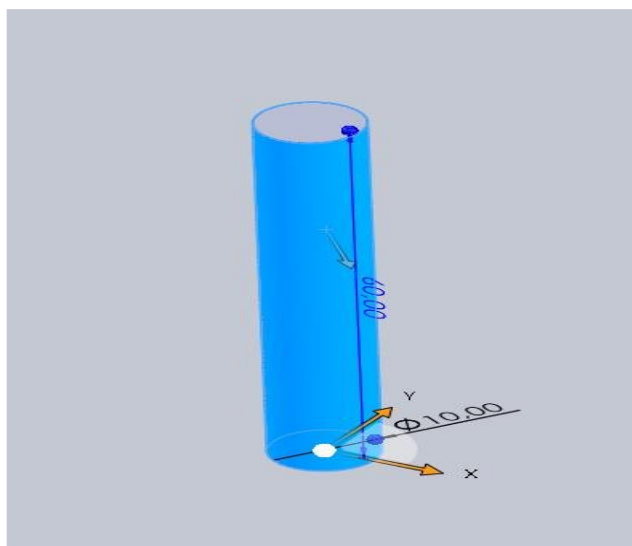


Рисунок 3.1 – Моделювання стрижнів

Спочатку за допомогою програмного забезпечення створюємо машинний код. Пізніше цей код подається на контролер установки і використовується для виконання операцій. Установки, що застосовуються для виготовлення виробів можуть бути представлені як у вигляді порталних систем так і у вигляді різних конструкцій роботів.

Для моделювання необхідних конструкцій – стержнів та пластин застосовували програму Solidworks.

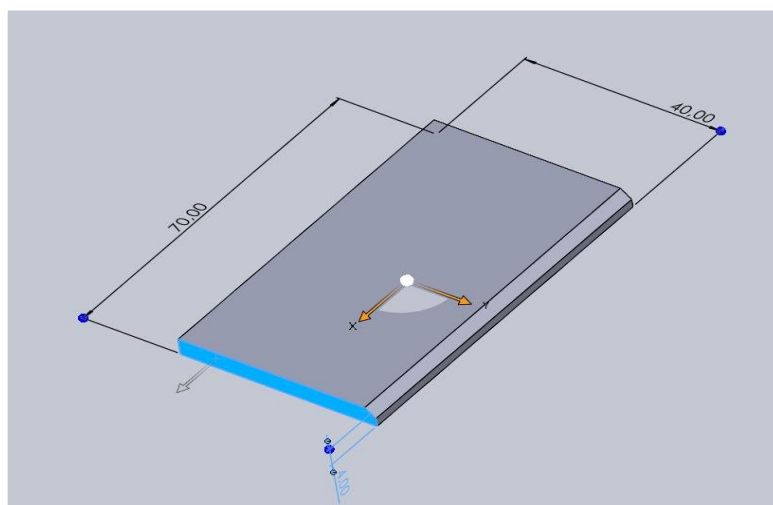


Рисунок 3.2 – Моделювання пластин

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

### 3.4 Процес виготовлення конструкції

Особливості виготовлення зварних деталей були наступними. Для налагоджування роботи 3Д принтера необхідно було створити G-код. Створення G-коду для друку спроектованих деталей здійснювалось в слайсери Cura 4.3.1. Демонстрацію процесу підготовки підготовки виробництва деталей показано на рисунку 3.3.

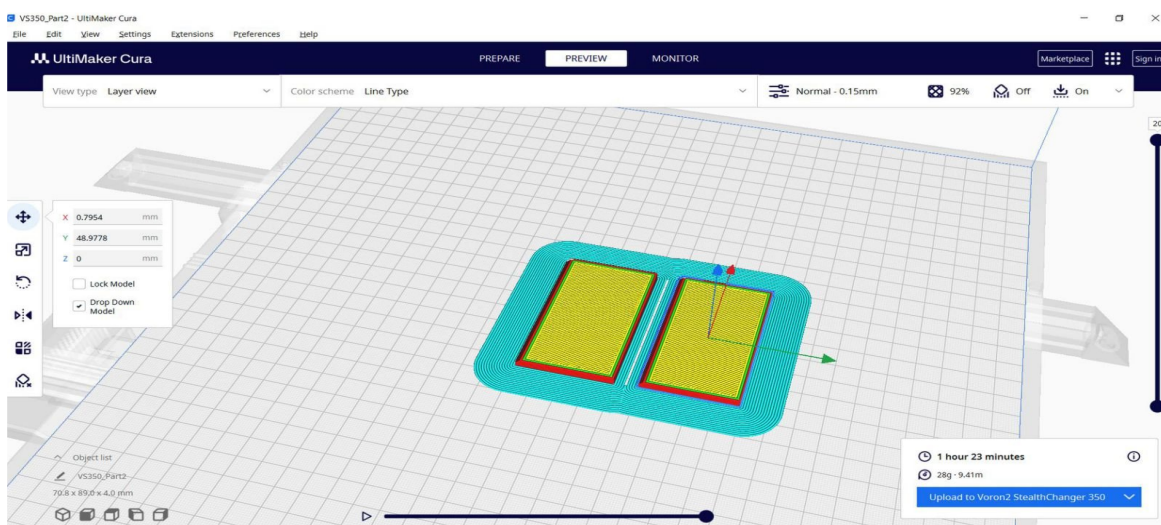


Рисунок 3.3 – Процес підготовки деталей до друку

Параметри процесу друку зразків з ниток полілактиду були наступними – температура друку 200 °С, температур друкованого столу 60 °С, швидкість друку 40 мм/с, а товщину шару 0,1 мм. Щільність заповнення була зафіксована на рівні 100%.

Для виготовлення зразків з полікарбонату використовувались наступні технологічні параметри - температура друку 245 °С, швидкість друку 40 мм/с, товщину шару 0,1 мм та температуру робочого столу 95 °С.

Зварні деталі з акрилонітрилбутадієнстиролу отримували при – температурі друку 240 °С. Швидкість друку, як і в попередніх випадках складала 40 мм/с, а температура робочого столу – 90°С. Процес друку стрижнів показано на рисунку 3.4, а пластин на рисунку 3.5

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

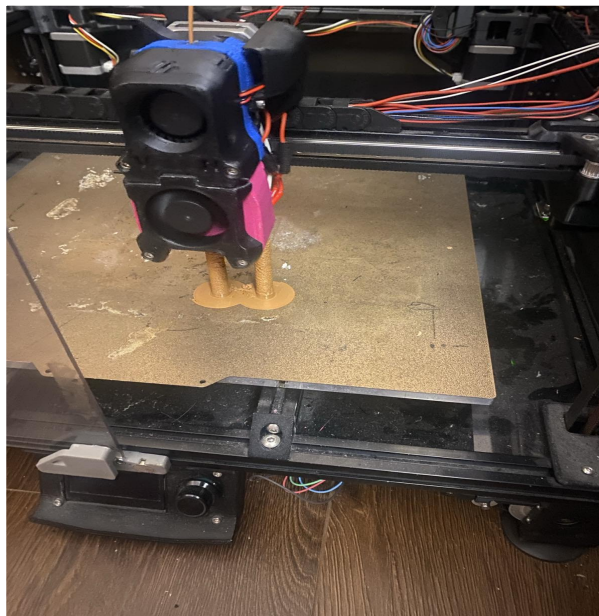


Рисунок 3.4 – Процес виготовлення стрижнів

Для отримання високої якості деталей, на час друкування робоча камера установки була закрита. Такий підхід уповільнював процес охолодження конструкцій, зменшував деформації та викривлення.

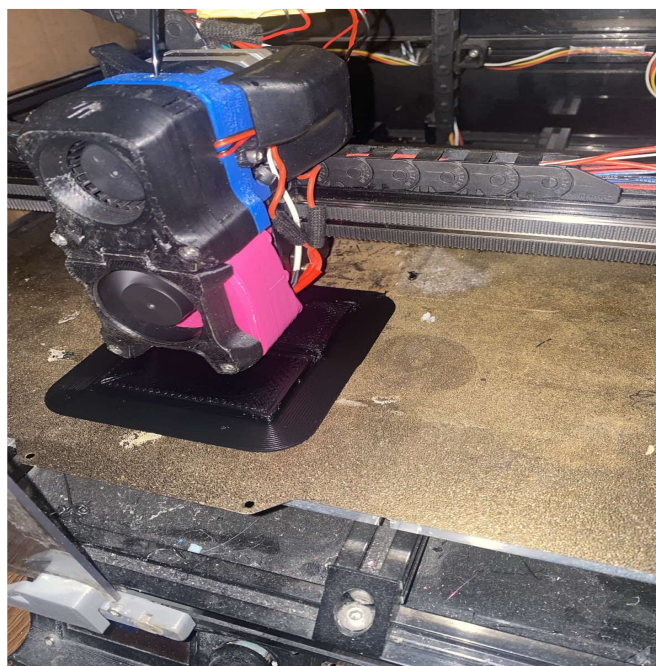


Рисунок 3.5 - Процес виготовлення пластин

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Готові деталі для зварювання показані на рисунку 3.6

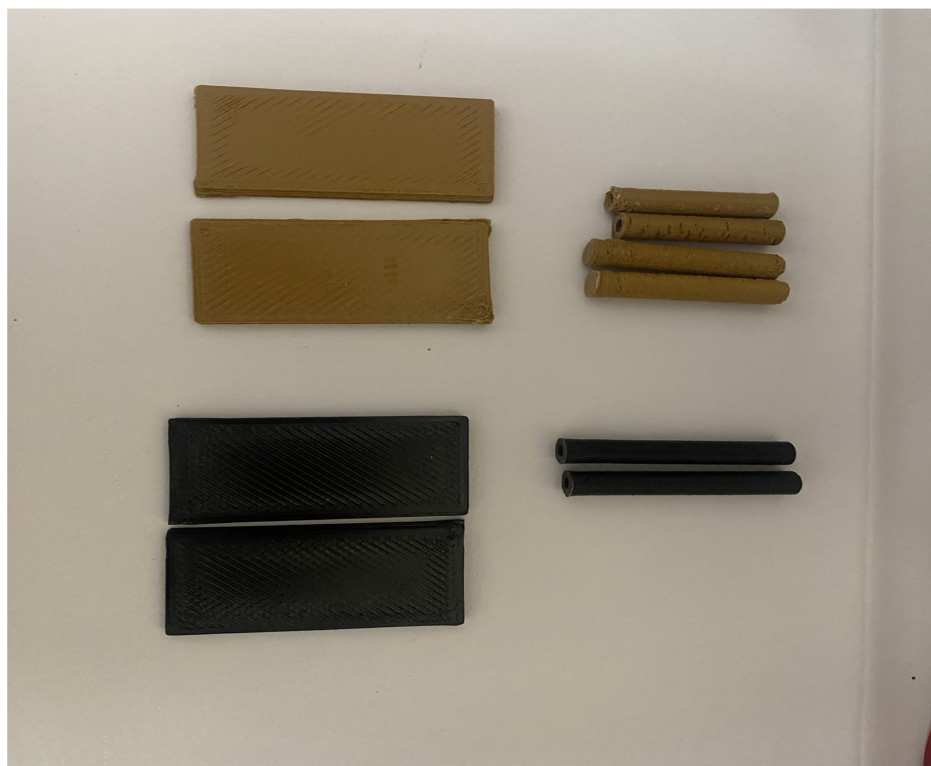


Рисунок 3.6 – Зразки заготовок для зварювання

Технологічні параметри виготовлення зразків представлені в таблиці 4.1.

**Таблиця 3.1 Технологічні параметри виготовлення зразків**

Параметри	Одиниці	PLA	ABS	PC
швидкість друку	мм/с	40	40	40
температура стола	°C	40	90	95
температура нагрітої присадки	°C	220	240	245
діаметр присадки	мм	1,75	1,75	1,75
Діаметр сопла	мм	1,0	1,0	1,0

## 3.5 Дослідження процесу зварювання різнорідних матеріалів

### 3.5.1 Особливості способу зварювання тертям

Під час проведення літературного огляду проведено аналіз способів зварювання полімерних матеріалів в тому числі різнорідних. Виходячи з складності процесів з'єднання різнорідних матеріалів ми зупинились на способі ротаційного зварювання тертям.

Зварювання тертям (наплавленим швом) – це процес з'єднання в твердому стані, який використовує обертальний рух та осьовий тиск для активації матеріалів на межі з'єднань.

В ході процесу зварювання теплова енергія спочатку генерується на поверхнях, які контактують між собою, за допомогою сили тертя. За цього тиск тертя забезпечує осьовий рух заготовок для досягнення необхідної міцності зварного шва. Після завершення процесу нагрівання відбувається процес проковування. На зварювальні деталі подається тиск проковування, який служить для консолідації зварного шва. Під час цього процесу теплова дія на матеріал зварного шва продовжується.

Для виконання зварювання тертям присадкові матеріали не використовуються. Тому цей спосіб є гігієнічним, чистим та таким, що не забруднює навколишнє середовище.

Особливістю процесу зварювання тертям є те, що під час контакту поверхонь між собою в процесі обертання виділяється тепло не тільки від дії сил тертя, а й від дії пластичної деформації заготовок. Внаслідок цього відбувається підвищення температури матеріалу ближче до поверхні розділу.

Зростання температури відбувається до рівня дещо нижчого за температуру плавлення. За рахунок теплового ефекту і протікання пластичної деформації заготовки під осьовим тиском відбуваються процеси дифузії та

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

рекристалізації молекул розділу. При повному охолодженні системи відбувається утворення зварного шва.

Зона термічного впливу способу є досить малою, а температура процесу нижча температури плавлення процесу, що суттєво зменшує потенційну можливість утворення дефектів затвердіння.

Проведення досліджень з використанням експериментальної установки показано на рисунку 3.7.



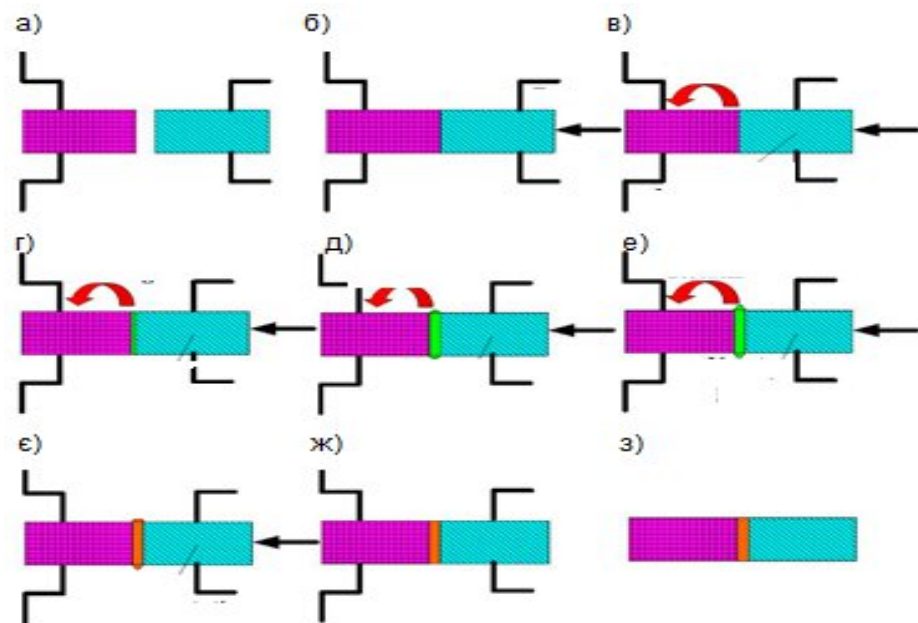
Рисунок 3. 7 – Процес зварювання на експериментальній установці

Процес зварювання тертям можна розділити на чотири основних стадії: перетворення прикладеної механічної енергії в теплову; пластичну деформацію зварювальних поверхонь; процес проковування (осадження); проходження міжмолекулярних дифузійних та рекристалізаційних процесів.

На рисунку 3.8 показано схематичне зображення процесу зварювання тертям. Один стрижень утримується нерухомо, а інший обертається з постійною швидкістю.

Система працює наступним чином. Два стрижні зводяться разом під осьовим тиском протягом певного періоду часу. Весь процес зварювання тертям має дев'ять основних етапів, які включають:

- підготовку зразків;
- прикладання зусилля для примусового з'єднання зразків;
- обертання одного зі зразків;
- початковий етап процесу зварювання;
- середній етап;
- завершальний етап процесу зварювання;
- зупинення дії на зварну конструкцію;
- обробка зварного шва;
- готовий зварний шов.



*А – підготовка двох зразків, б – застосування тиску для примусового зіткнення зразків, в – обертання одного зі зразків, г – початкова стадія процесу зварювання, д – середня стадія, е – завершальна стадія, зупинення дії на зварну конструкцію, ж – обробка зварного шва, з – готовий зварний шов.*

Рисунок 3.8 – Схематичне зображення процесу зварювання тертям.

Основними технологічними параметрами процесу зварювання тертя є швидкість обертання, тривалість тертя, тиск тертя, тиск проковування та довжина припуску на осадження.

Під час виконання експериментальних робіт нами досліджувались наступні технологічні параметри процесу зварювання – швидкість обертання, залежність зміни температури поверхні розділу від тривалості процесу, встановлення пікових значень температури та допуски на проковування (довжина вигорання).

Для визначення якості зварних швів використовувалися випробування на статичний вигин, на осьовий розрив та візуально-вимірвальний контроль.

### 3.5.2 Встановлення швидкості обертання

Перед зварюванням проводили підготовку торцевих поверхонь. Торці поверхонь протирали від різноманітних забруднень та пилу. Основним критерієм підготовки поверхонь є забезпечення їхньої перпендикулярності відносно осі обертання. За цього коливання торця заготовок не повинно бути більшим за 0,2 мм.

Такі вимоги забезпечуються завдяки використанню процес виготовлення деталей, побудований на основі 3Д моделювання.

Спочатку для реалізації досліджень ми була підібрана швидкість обертання шпинделя. Максимальна температура матеріалу зварного шва складала близько 170 °С. Після цього навантаження знімали. Пристрій експериментальної машини дозволяє використовувати шість скоростей. Дані досліджень наведено в таблиці 3.2.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Таблиця 3.2 Вплив швидкості оборотів шпинделя на якість зварювання

Параметри	160	250	400	630	1000	1600
Довжина заготовок до зварювання	120	120	120	120	120	120
Довжина заготовок після зварювання	119	118	119	116	113	
Контроль якості	-	-	+	+	-	-

Різниця довжини заготовок до зварювання і після зварювання – становила допуск на осадження, або довжину вигорання. Довжина вигорання є одним із важливих параметрів процесу, що регулюють тепловиділення та коефіцієнт тертя під час зварювання зварювальним плавленням.

У цьому дослідженні для вивчення впливу на механічні властивості та характеристики зварного інтерфейсу використовувалася довжина вигорання 4,0 мм. Зварювальний шар після зварювання видалявся шляхом точіння.

Під час виконання контролю якості зварних швів (рис. 3.8) було встановлено, що нормативним показникам відповідають зразки виконані при швидкості 630 об/хв

Під час проведення досліджень встановлено що тривалість циклу зварювання тертям повинна становить 60 с. Цей процес складається з часу проходження тертя, що складає – 30 с, час проковування або осадження – 20 секунд та часу охолодження конструкції – 10 секунд. Припуск на осадження, або довжина осадження за цього становить – 4,0 мм. Швидкість обертання підтримується постійною на рівні 630 об/хв.

Для запобігання обертання одного стрижня під тиском одночасно з обертовим стрижнем, розроблено пристосування для затискання одного стрижня.

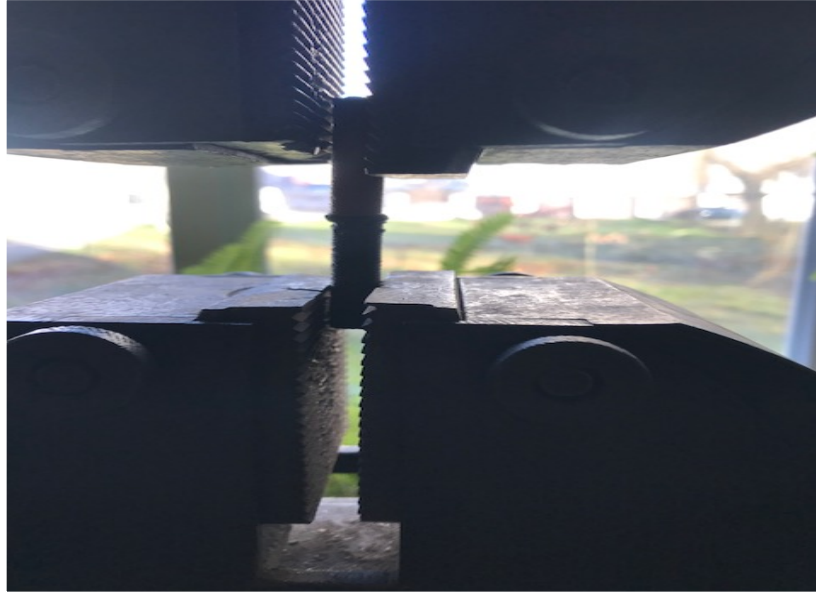


Рисунок 3.9 – Контроль якості зварних швів

### 3.5.3 Визначення температури зварювального шару

Як вже повідомлялось вище в'язкість є критичним чинником проходження процесу дифузії. А також в'язкість матеріалу за цього є мірою товщини утворення об'єму зварного шва. В свою чергу величина в'язкості в основному залежить від температури. Тому температура матеріалу зварного шва є ключовим чинником проходження процесу зварювання тертям

Під час проведення досліджень температуру матеріалу зварного шва ми фіксували за допомогою безконтактного інфрачервоного термометра GM 900 (рис.2,3).

На рисунку 3.10 показано зміну температури зварного шва як функцію часу для трьох важливих стадій зварювання плавленням. Як і очікувалося, температура зварного шва збільшується від стадії тертя до стадії проковування, а потім знижується на стадії охолодження

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

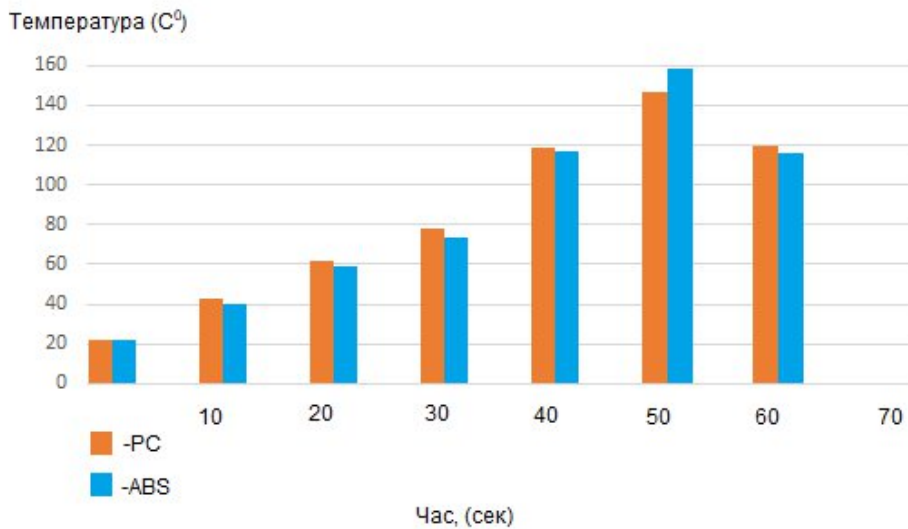
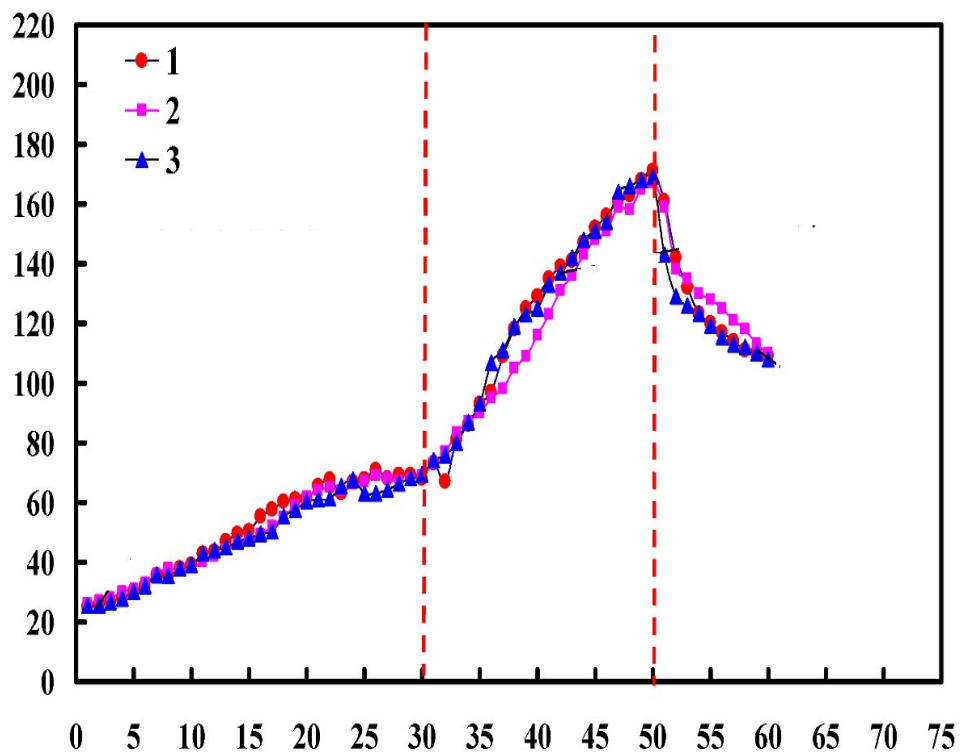


Рисунок 3.10 – Температура процесу, як функція часу

Щоб зменшити вплив людського чинника під час вимірювання температури, експеримент повторювали тричі на стрижнях PLA-ABS. Результати вимірів представлені на рисунку - 3.11.



1 – перше вимірювання; 2 – друге вимірювання; 3 – вимірювання.

Рисунок 3.11 - Значення температури для трьох незалежних повторень

Під час проведення досліджень вимірювання температури в зоні зварного шва нами встановлено наступні ефекти:

- зв'язок між температурою матеріалу зони зварного шва та часом зварювання є повторюваним;
- пікова температура валика знаходилась в межах 167–174 °С.

Проаналізувавши результати проведених досліджень нами були запропоновані технологічні параметри зварювання дослідних зразків. Значення технологічних параметрів наведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.3 Технологічні параметри зварювання.

№	Показники	Одиниці	Значення
1	Тривалість циклу зварювання	с	60
2	Час тертя	с	30
3	Час оброблення	с	20
4	Час охолодження	с	10
5	Величина осадження	мм	2,4
6	Швидкість обертання	об/хв	650

На рисунку 3.12 представлено зразки готових зварних конструкцій різнорідних матеріалів за допомогою ротаційного тертя. Зовнішній вигляд зразкув показує, що процес зварювання пройшов успішно.

Підбиваючи підсумки можна констатувати, що спосіб тертя є досить надійним для зварювання різнорідних матеріалів, зокрема полілактиду, полікарбонату та акрилонітрилбутадієнстирол.

Разом з тим встановлено, що при низьких та високих рівнях підведення тепла неможливо досягти надійних з'єднань. При низьких рівнях підведення тепла локальна температура є недостатньо високою, щоб зменшити в'язкість полімеру для заповнення межі розділу, і таким чином у корені з'єднання та зоні перемішування утворюються пустоти та великі плоскі тріщини. Надто

високі швидкості не забезпечують повне проходження процесів дифузії та контроль якості зразків отриманих за їхньою допомогою показав негативні результати.

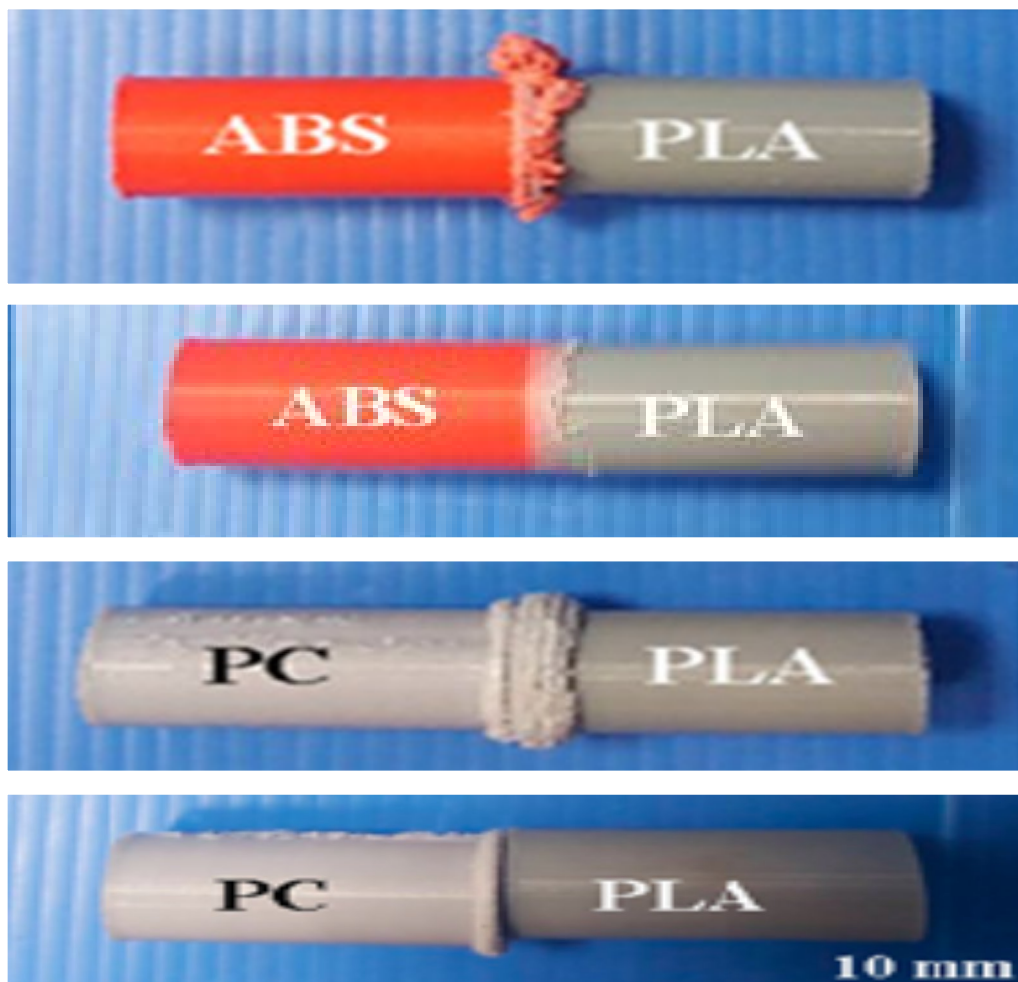


Рисунок 3.12 - Зразки отриманих зварних з'єднань

## 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Розроблення типової технологічної схеми процесу зварювання різнорідних полімерів

Як вже зазначалося зварювання різнорідних полімерних матеріалів є досить складним завданням. Зазвичай зварюються тільки полімерні вироби одного виду із однаковою або подібною молекулярною масою та густиною, адже взаємодіючі молекули повинні створити однорідний шов.

Під час проведення досліджень було вирішено дану проблему та розроблено нову технологічну схему. Основою технології є отримання якісного зварного шва за допомогою зварювання ротаційним тертям.

Особливості цього способу зварювання є те, що він має високу технологічність та теплову ефективність. Під час ротаційного обертання різноманітні плівки, що знаходяться на контактних поверхнях, руйнуються за допомогою сил тертя та видаляються назовні внаслідок дії пластичної деформації. Для досягнення необхідного рівня деформації полімери нагріваються під впливом теплоти, що виділяється під час тертя та зсуву спричиненого осьовим навантаженням.

За цього механічна енергія процесу безпосередньо перетворюється в теплову безпосередньо в тонких шарах близько до поверхні заготовок. Робота, яка витрачається на переборення сил тертя зразу ж перетворюється в теплову енергію, яка нагріває полімерні матеріали до необхідної температури.

Матеріали можуть нагріватися за допомогою тертя і до вищих температур, але вони витісняються ізі стика наявним аксіальним тиском. Важливим є те, що після досягнення необхідної температури відносно переміщення зварних поверхонь потрібно якомога швидше зупинити. Після цього нагріті поверхні стискають зусиллям осадження. Цей процес ще називають проковуванням.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Об'єм тонкого шару матеріалу, який нагрівається є досить малий і таким чином весь цикл зварювання може тривати до 60 секунд. Весь процес зварювання відбувається під дією локалізованого джерела тепла, пластичної деформації, а також надійному захисті контактних поверхонь від атмосфери, що призводить до термомеханічного оброблення матеріалу.

При зварюванні виробів з різномірних матеріалів на підготовку поверхні твердішого з них потрібно звертати більше уваги. При необхідності можна застосовувати попереднє нагрівання торців твердішого матеріалу, застосовувати оправки для виробу з пластичнішого матеріалу, або збільшити його діаметр на 15...20 %. За цього довжина деталі, що виходить із затискачів повинна складати 0,5...1,5 від її діаметру.

Разом з тим технологічний процес виготовлення зварної конструкції складається не тільки з самого процесу зварювання, але й інших технологічних операцій, а саме заготівельних, складальних, підготовчих, облицювальних та контролю якості готової продукції.

Запропонована нами технологічна схема (рис.4.1) включає названі операції і разом з тим вдосконалює їх проведення. За цього на виконання заготівельних припадає близько 18% від повної трудомісткості виробництва, а на виконання складальних операцій 21%. Тобто трудомісткість робіт які передують зварювання складає близько 39% трудомісткості всього технологічного процесу. Багато питань виникає так само і до якості проведення робіт. Для виконання складально-монтажних робіт необхідним є залучення до їх виконання висококваліфікованих працівників.

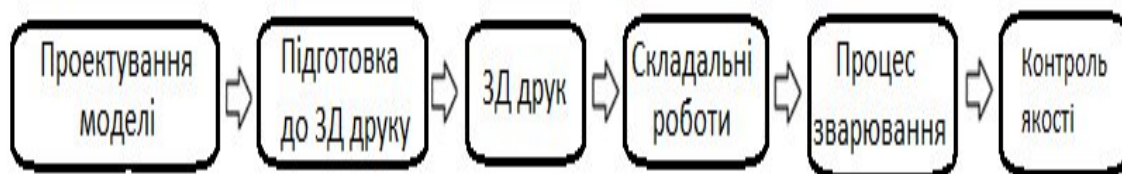


Рисунок 4.1 - Схема технологічного процесу зварювання

Тому у для вдосконалення підготовчих процесів нами запропоновано запровадити 3D-моделювання конструкцій та їхнє виробництво за рахунок 3D друку. Таке рішення змінює технологію концептуального підходу, проектування і виробництва конструкцій.

Сумісне використання технологій 3D-друку і зварювання дає можливість для використання переваг кожної з представлених технологій, а їхнє об'єднання у спільний технологічний процес відкриває нові можливості для інноваційних рішень.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

## ВИСНОВКИ

В процесі виконання роботи підтверджено, що в основі зварювання різнорідних матеріалів за допомогою тертя знаходиться процес дифузії, проходження якого лімітується в'язкістю нагрітих матеріалів.

За результатами проведених досліджень встановлено, що для підтримування ефективного процесу зварювання для досліджуваних зразків тривалість циклу зварювання повинна становити 60 с. Цей процес складається з часу тертя, що складає – 30 с, часу проковування – 20 секунд та часу охолодження конструкції – 10 секунд. Припуск на осадження повинен складати – 4,0 мм, а швидкість обертання підтримуватися постійною на рівні 630 об/хв.

Під час дослідження теплових процесів, які відбуваються в матеріалі зварного шва отримано залежність його температури від часу зварювання. Спочатку температура матеріалу зварного шва збільшується від стадії тертя до стадії проковування, а потім знижується на стадії охолодження. За цього пікова температура валика для досліджуваних зразків була в межах 167–174 °С.

Розроблено нову технологічну схему зварювання різнорідних полімерних матеріалів. Технологічний процес передбачає САД-проекування деталей, їхнє виготовлення за допомогою 3D друку та зварювання шляхом використання способу ротаційного тертя.

Подальші дослідження повинні бути направлені на вивчення процесів, що відбуваються на межі з'єднань під час утворення зварного шва.

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhou J, Lucas JP. Hygrothermal effects of epoxy resin. Part I: the nature of water in epoxy. *Polymer*. 1999; 40: 5505.
2. Strain-induced multiscale structural evolutions of crystallized polymers: From fundamental studies to recent progresses. *Progress in Polymer Science* (2023).
3. Distribution and evolution of (micro)strain and stresses in flexible, waterproofing membranes using digital image correlation and finite element modelling. *Cement and Concrete Composites* (2023).
4. Панчук М.В. Технологія зварювання конструкцій нафтогазового обладнання: конспект лекцій / М. В. Панчук, Л. С. Шлапак – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. –117 с.
5. Oladele, I.O., Adelani, S.O., Ganiu Agbabiaka, O., Hope Adegun, M.: Applications and disposal of polymers and polymer composites: a review. *Eur. J.Adv. Eng. Technol.* **9**, 65–89 (2022)
6. Панчук М.В. Зварювання пластмас: конспект лекцій/ М.В. Панчук, Л.С. Шлапак, - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – 128с.
7. Al-Tamimi, A.A.; Tlija, M.; Abidi, M.H.; Anis, A.; Abd Elgawad, A.E.E. Material Extrusion of Multi-Polymer Structures Utilizing Design and Shrinkage Behaviors: A Design of Experiment Study. *Polymers* **2023**, *15*, 2683. <https://doi.org/10.3390/polym15122683>
8. Balasubramanian, K.; Sultan, M.T.H.; Rajeswari, N. 4-Manufacturing techniques of composites for aerospace applications. In *Sustainable Composites for Aerospace Applications*; Jawaid, M., Thariq, M., Eds.; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2018; pp. 55–67.
9. Parveez, B.; Kittur, M.I.; Badruddin, I.A.; Kamangar, S.; Hussien, M.; Umarfarooq, M.A. Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review. *Polymers* **2022**, *14*, 5007. <https://doi.org/10.3390/polym14225007>

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

10. Marcus, M., Nitsch, M., Cronley, L. *et al.* Welding of selected dissimilar polymers via matching viscosity through dual temperature infrared and hot plate heating. *Weld World* **68**, 3215–3225 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01799-1>
11. K. Martinses, S. Hu, B. Karlson Joining dissimilar materials. *CIRP Annals*. Volume 64, Issue 2, 2015, Pages 679-699
12. Messler R. *Joining materials and structures* Amsterdam. 2004.
13. Capbell F.K. (2011) *Joining: Understanding the Basics*. ASM International, 2011. — 260 p
14. ISO 472. Trilingual version EN ISO 472:2013/A1:2018
15. Grewell, D. Benatar, A. Semi-Empirical, Squeeze flow, and Intermolecular Diffusion Model. II. Model Verification Using Laser Microwelding. *Polymer Engineering and Science*. 2008 1543-1549.
16. Kuo, C.-C.; Liang, H.-X.; Huang, S.-H.; Tseng, S.-F. Enhancing the Weld Quality of Polylactic Acid Biomedical Materials Using Rotary Friction Welding. *Polymers* **2024**, *16*, 991. <https://doi.org/10.3390/polym16070991>
17. Hamed Aghajani Derazkola, Abdolreza Simchi, Francesco Lambiase Friction stir welding of polycarbonate lap joints: Relationship between processing parameters and mechanical properties July 2019 [Polymer Testing](https://doi.org/10.1016/j.polyt.2019.07.001) 79:105999
18. Miranda Marcus *Welding of Dissimilar Polymers*
19. Qiu, J.; Zhang, G.; Sakai, E.; Liu, W.; Zang, L. Thermal Welding by the Third Phase Between Polymers: A Review for Ultrasonic Weld Technology Developments. *Polymers* 2020, *12*, 759. <https://doi.org/10.3390/polym12040759>
20. Зварювання високотехнологічних пластмас М.В. Юрженко, М.Г.Кораб. – Суми: Університетська книга, 2016.- 319.С. [file:///C:/Users/Myroslaw/Downloads/Welding\\_of\\_high-tech\\_plastics.pdf](file:///C:/Users/Myroslaw/Downloads/Welding_of_high-tech_plastics.pdf)
21. Довідник [https://leister.com.ua/pdf/Sprvothnic\\_po\\_svarke.pdf](https://leister.com.ua/pdf/Sprvothnic_po_svarke.pdf)
22. Monkova, K.; Monka, P.P.; Vanca, J.; Zaludek, M.; Suba, O. Tensile Behaviour of a 3D printed lattice structure. In *Proceedings of the 11th IEEE International*

					КРМ. ПМЗм - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, Athens, Greece, 14–17 July 2020; pp. 22–26.

23. Bhagia, S.; Lowden, R.R.; Erdman, D., III; Rodriguez, M., Jr.; Haga, B.A.; Solano, I.R.M.; Gallego, N.; Pu, Y.; Muchero, W.; Kunc, V.; et al. Tensile properties of 3D-printed wood-filled PLA materials using poplar trees. *Appl. Mater. Today*. 2020, 21, 100832.
24. Md Rahatuzzaman, Minar Mahmud, Sazedur Rahman, Md Enamul Hoque. Design, fabrication, and characterization of 3D-printed ABS and PLA scaffolds potentially for tissue engineering. *Results in Engineering*. Volume 21, March 2024, 101685
25. M.-M. Germaini, S. Belhabib, S. Guessasma, R. Deterre, P. Corre, P. Weiss Additive manufacturing of biomaterials for bone tissue engineering – a critical review of the state of the art and new concepts *Prog. Mater. Sci.*, 130 (Oct. 2022), Article 100963, 10.1016/j.pmatsci.2022.100963
26. Z. Zhao, J. Li, Y. Wei, T. Yu Design and properties of graded polyamide12/hydroxyapatite scaffolds based on primitive lattices using selective laser sintering. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 126 (Feb. 2022), Article 105052, 10.1016/j.jmbbm.2021.105052
27. S. Yousefiasl, E. Sharifi, E. Salahinejad, P. Makvandi, S. Irani Bioactive 3D-printed chitosan-based scaffolds for personalized craniofacial bone tissue engineering. *Engineered Regeneration*, 4 (1) (Mar. 2023), pp. 1-11, [10.1016/j.engreg.2022.09.005](https://doi.org/10.1016/j.engreg.2022.09.005)

					КРМ. ПМЗМ - 18. 00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64