

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Технологічний процес ультразвукового зварювання вставки панелі приладів легкового автомобіля

Рівень вищої освіти: перший бакалаврський
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Відновлення і технічний сервіс автомобілів

Шифр: КРБМТВА 26. 23117. 000 ПЗ

Виконав: студент 4 курсу,
група МТВАс-23-1



Богдан ТУРКЕВИЧ

Керівник, д.т.н., професор



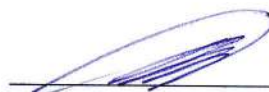
Олександр ДИХА

Нормоконтролер, к.т.н., доцент



Олег БАБАК

До захисту допускаю:
завідувач кафедри ТАМ



Олександр ДИХА

15 06 2026 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра: трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти: перший бакалаврський
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ
Олександр ДИХА

" 15" квітня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Туркевич Богдан Романович

1. Тема роботи: **Технологічний процес ультразвукового зварювання вставки панелі приладів легкового автомобіля**

Керівник роботи: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи:

- 1) Дані про конструкцію панелі приладів автомобіля
- 2) Технічні умови ремонту пластмасових виробів
- 3) Матеріали переддипломної практики.
- 4) Нормативно – технологічна документація
- 5) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

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

1. Аналіз застосування ультразвукового зварювання у виробництві пластикових елементів автомобілів
2. Розробка обладнання для ручного ультразвукового зварювання вставки панелі приладів
3. Розробка технологічного процесу збирання вставки панелі приладів легкового автомобіля
4. Безпека та екологічність ультразвукового зварювання вставки панелі приладів

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання: 20 квітня 2026р.

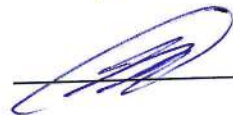
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз застосування ультразвукового зварювання у виробництві пластикових елементів автомобілів	1.05.2026	
2	Розробка обладнання для ручного ультразвукового зварювання вставки панелі приладів	15.05.2026	
3	Розробка технологічного процесу збирання вставки панелі приладів легкового автомобіля	30.05.2026	
4	Безпека та екологічність ультразвукового зварювання вставки панелі приладів	10.06.2026	

Студент

 Богдан ТУРКЕВИЧ

Керівник кваліфікаційної роботи

 Олександр ДИХА

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 63 сторінок, кількість рисунків - 31, таблиць - 3, додатків - 1, кількість джерел згідно із переліком посилань - 15.
Студент гр. МТВАс-23-1 Туркевич Б. Р.





Тема «Технологічний процес ультразвукового зварювання вставки панелі приладів легкового автомобіля»

У роботі розглянуто технологічні та фізичні основи ультразвукового зварювання полімерних матеріалів на прикладі виготовлення вставки панелі приладів легкового автомобіля. Проведено аналіз сучасних методів з'єднання полімерів та обґрунтовано доцільність застосування ультразвукового зварювання як високоефективного, швидкого та екологічно безпечного способу формування нероз'ємних з'єднань. У роботі визначено основні параметри процесу ультразвукового зварювання, виконано розрахунок енергетичних характеристик та встановлено оптимальні режими зварювання для поліпропіленового матеріалу. Розроблено технологічний процес складання вставки панелі приладів, що включає підготовку деталей, їх позиціонування, зварювання та контроль якості готового виробу. Запропоновано конструктивні рішення елементів ультразвукового обладнання, зокрема хвилеводу та зварювального інструменту.

Ключові слова: ультразвукове зварювання, полімерні матеріали, поліпропілен, панель приладів, технологічний процес, зварний шов, хвилевід, енергетичні параметри

Зміст

ВСТУП	6
1.Аналіз застосування ультразвукового зварювання у виробництві пластикових елементів автомобілів.....	8
1.1.Аналіз і перспективи використання полімерних матеріалів в автомобілебудування	8
1.2 Аналіз способів збирання виробів із полімерних матеріалів.....	15
1.3. Опис фізичних основ ультразвукового зварювання.....	18
1.4 Огляд технічних рішень у галузі ультразвукового зварювання.....	24
1.5. Аналіз досліджень у галузі ультразвукового зварювання поліпропілену та його кополімерів.....	32
2. Розробка обладнання для ручного ультразвукового зварювання вставки панелі приладів.....	38
2.1 Розрахунок пакета для магнітостриктора.....	38
2.2 Розробка хвилеводу для зварювання.....	41
2.3.Розробка ручного пристрою для ультразвукового зварювання.....	44
2.4. Розробка ультразвукового генератора.....	46

					КРБМТВА 26. 23117. 000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Технологічний процес ультразвукового зварювання вставки панелі приладів легкового автомобіля			Літ.	Аркуш	Аркушів		
Розроб.	Туркевич									4	70	
Перевір.	Диха											
Н.контр.	Бабак							ХНУ, гр. МТВАс-23-1				
Затвер	Диха											

3. Розробка технологічного процесу збирання вставки панелі приладів легкового автомобіля.....	48
3.1 Розрахунок параметрів режиму ультразвукового зварювання.....	48
3.2 Опис технологічного процесу збирання вставки панелі приладів легкового автомобіля.....	49
4. Безпека та екологічність ультразвукового зварювання вставки панелі приладів.....	53
Висновки.....	61
Література.....	62
Додатки.....	64

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

Вступ

У наш час різні полімерні починають все активніше застосовуватись для виготовлення різних виробів у багатьох галузях, витісняючи загальноприйняті стандартні конструкційні матеріали, до яких належать метали та сплави, скло, кераміка та інші. За даними консалтингової компанії Інтернешнл Пластик Гайд обсяг світового виробництва полімерних матеріалів з 2000 року зріс практично в 3 рази і наприкінці 2022 року становив понад 300 мільйонів тонн. Такий попит на полімерні матеріали пояснюється їхньою дешевизною, простотою виготовлення з них виробів, високою корозійною стійкістю та малою вагою.

Серед полімерних матеріалів поліолефіни займають лідируючу позицію за масштабами виробництва. До цієї групи пластиків відносяться: поліпропілен, поліізобутилен, поліетилен та інші. На сьогоднішній день поліетилен, що застосовується в основному для виготовлення упаковки, знаходиться на першому місці за обсягом виробництва, а поліпропілен, що застосовується для створення різних виробів, четвертому.

Близько 40 відсотків поліпропілену та кополімерів на його основі використовується в автомобілебудуванні для виготовлення різних деталей екстер'єру та інтер'єру сучасних транспортних засобів. Таке масове використання поліпропілену у виробництві передбачає пошук та покращення технологій збирання виробів з даного матеріалу.

Одним з методів, що найбільш розвиваються, отримання монолітного з'єднання з полімерних матеріалів є ультразвукове зварювання. Однак через складність ультразвукового обладнання та малої кількості фахівців у даній галузі науки та техніки, виробники пластикових виробів з поліпропілену для автомобілебудування стикаються з проблемами налаштування, розробки, ремонту ультразвукового обладнання для зварювання та пошуку оптимальних режимів ультразвукового зварювання, що забезпечують необхідну міцність з'єднання.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою даної роботи є розробка та обґрунтування технологічного процесу ультразвукового зварювання вставки панелі приладів легкового автомобіля з поліпропіленового композиту, а також проєктування відповідного обладнання та визначення оптимальних режимів зварювання, що забезпечують високу міцність і надійність з'єднання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **основні завдання**:

1.Провести аналіз застосування полімерних матеріалів у автомобілебудуванні та існуючих методів їх з'єднання з обґрунтуванням доцільності використання ультразвукового зварювання.

2.Дослідити фізичні основи ультразвукового зварювання та визначити основні параметри процесу, що впливають на якість з'єднання поліпропіленових деталей.

3.Розробити конструкцію основних елементів ультразвукового обладнання, зокрема магніострикційного перетворювача, хвилеводу та ручного зварювального пристрою.

4.Розробити технологічний процес складання вставки панелі приладів із визначенням оптимальних режимів зварювання та заходів забезпечення безпеки й екологічності виробництва.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.Аналіз застосування ультразвукового зварювання у виробництві пластикових елементів автомобілів

1.1.Аналіз і перспективи використання полімерних матеріалів в автомобілебудування

Сьогодні вже неможливо уявити звичайне життя без пластиків, які дедалі інтенсивніше вливаються у різні галузі виробництва, зокрема й у автомобілебудування. Щорічно з'являються десятки видів нових конструкційних полімерних матеріалів, які за своїми механічними та експлуатаційними властивостями не поступаються металам, а іноді і перевершують їх у кілька разів. Використання подібних матеріалів у конструкції нових автомобілів, безсумнівно, дає стрибок виробництва.

Починаючи з сімдесятих років минулого століття, експертами простежується тенденція щодо зменшення частки металевих виробів, що входять до конструкції автомобіля. Наприклад, за останні п'ятдесят років частка сталі в автомобілі знизилася з 79 до 55%. Частка полімерних матеріалів навпаки зросла втричі із 6 до 18 відсотків. За прогнозами експертів, активна поява нових видів полімерів сприятиме збільшенню їх частки в конструкції автомобілів приблизно на 7 % на рік [6]. Таке активне зростання застосування полімерних матеріалів замість металів, безсумнівно, зумовлене деякими їх технічними та економічними перевагами, а саме:

- мала маса;
- корозійна стійкість перед водою;
- легкий технологічний процес виробництва;
- низька вартість;
- можливість виготовлення виробів складної форми.

Більше того, інженери автомобілебудівної промисловості щорічно стикаються з жорсткими нормами за гранично допустимими викидами

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

шкідливих речовин транспортних засобів. Так, наприклад, у Європі, згідно з Законом про середню допустиму витрату палива автомобілем до 2025 року витрата палива автомобілем не повинна перевищувати 4.32 л. на 100 км. А середній викид вуглекислого газу на нових автомобілях не повинен бути більшим за 95 г. на 1 км. Для відповідності цим нормам автомобілебудівники замінюють матеріал деяких деталей автомобіля більш легший, такий як пластик.

Одними з найбільш затребуваних пластиків є сополімер акрилонітрилу з бутадієном і стиролом (АБС), поліпропілен та кополімери на їх основі. На Рисунку 1 представлено схему різних елементів сучасного легкового автомобіля, виконаних з полімерів.



Рисунок 1 – Пластикові елементи легкового автомобіля

Деякі полімери, такі як полівінілхлорид (ПВХ), використовуються для створення шлангів, ізоляції проводки, ручок, кнопок тощо. Плівки на основі ПВХ також йдуть для обробки внутрішньої обшивки автомобіля.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Для підвищення безпеки часто пружинні сидіння забезпечують подушками з еластичного пінополіуретану, що підвищує комфорт і надійність опори і за рахунок цього сприяє зменшенню втоми водія. Також монолітний пінополіуретан застосовується для підшипників кермового керування, підвіски, ременів приводів.

Поліамід та його кополімери йдуть на виготовлення вентиляторів, паливопроводів, напрямних, корпусів датчиків.

Не рідкість стало застосування поліетилену виготовлення паливних баків до ста літрів.

Більше того, вже сьогодні на ринку існують автомобілі в яких значна частина елементів виконана з полімерних матеріалів. На Рисунку 2 зображено BMW і3, серійний пластиковий електромобіль.



Рисунок 2 – BMW і3

Компанія Alfa Romeo випустили перший в історії спортивний автомобіль з вуглепластиковим кузовом, зображеним на Рисунку 3. Маса кузова складає 63 кілограми, а маса всього автомобіля 895 кілограм [1].

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3 – Спорткар Alfa Romeo C4

1.2. Опис вставки панелі приладів легкового автомобіля

Вставка панелі приладів (рисунок 4) є одним із важливих та невід'ємних елементів будь-якого легкового автомобіля.



Рисунок 4 – Вставка панелі приладів у зборі

Від її ергономіки залежить зовнішній вигляд практично всього інтер'єру будь-якого транспортного засобу, тому що саме вставка панелі приладів постійно знаходиться на очах у водія та пасажирів. Крім цього саме на ній

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

розташовується більшість елементів контролю та відстеження стану транспортного засобу.

У цій роботі розглядається вставка панелі приладів, модель якої представлена Рисунку 5, товщиною 2.7 міліметра, виготовлена з модифікованого поліпропілену типу Армлен.

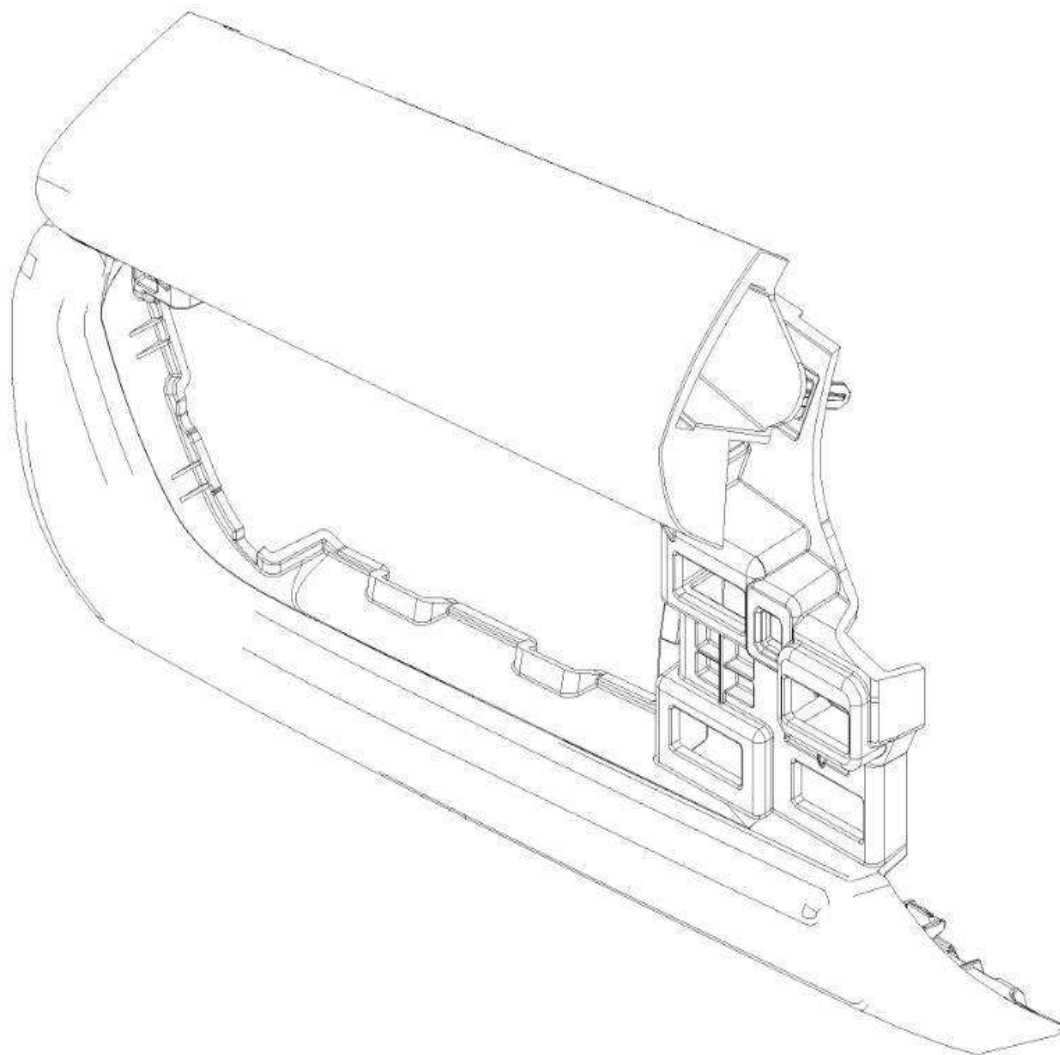
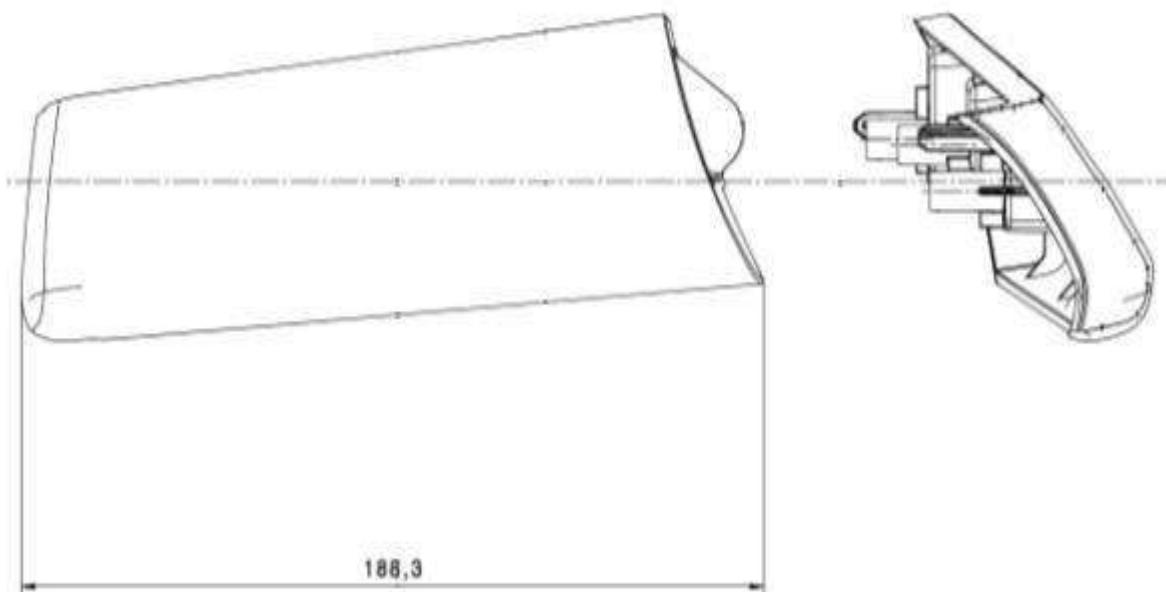


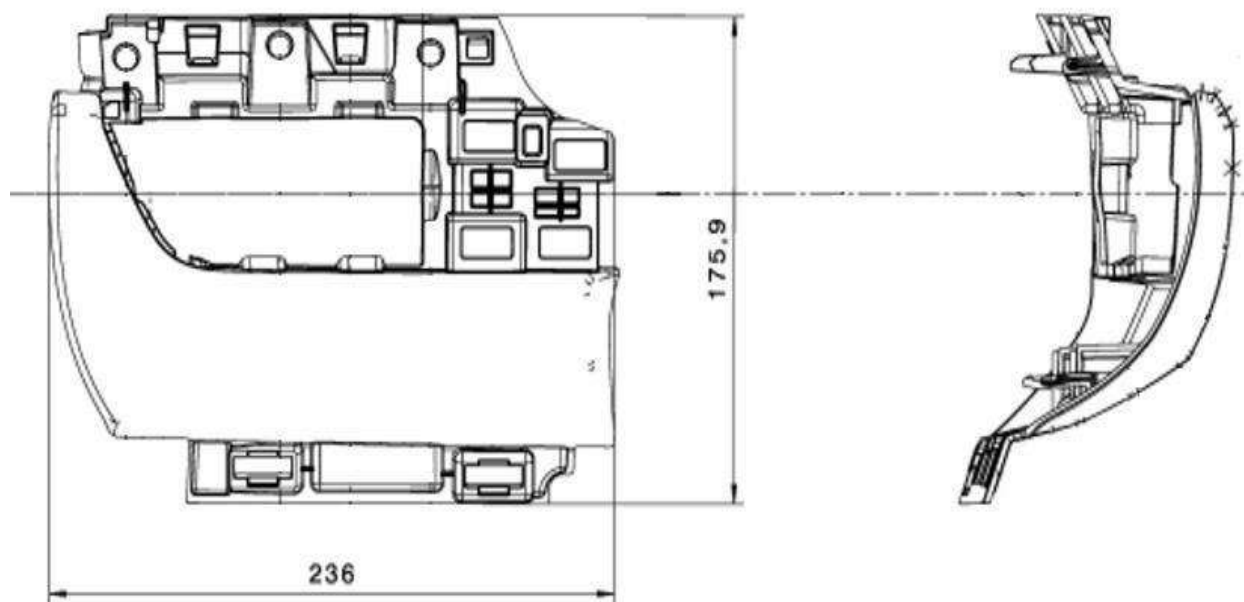
Рисунок 5 – Вставка панелі приладів легкового автомобіля

Дана вставка складається з верхньої (рисунок 6 а) та нижньої (рисунок 6 б) накладок:

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12



а



б

а – верхня накладка, б – нижня накладка

Рисунок 6 – Елементи вставки панелі приладів

Накладки з'єднуються шляхом оплавлення трьох пінів, що розташовані на верхній частині вставки панелі приладів. Креслення пінів у розрізі представлено на Рисунку 7:

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

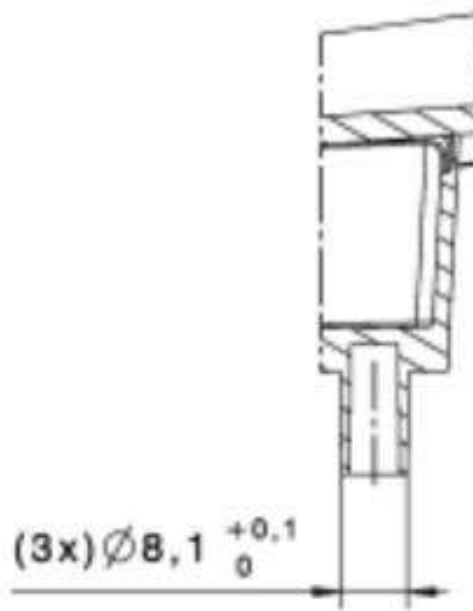


Рисунок 7 – Пін кріплення накладок

Опис матеріалу вставки панелі приладів

Накладки вставки панелі приладів виконані із наповненого та модифікованого композиту на основі поліпропілену марки Armlen PP MF20-15IM. Як наповнювач в обсязі 20% виступають мінеральні структуровані волокна, крім цього матеріал модифікований 15% добавками, що підвищують ударостійкість.

До основних особливостей Armlen PP MF20-15IM відносять: стійкістю до термокороблення, здатність роботи від мінус 60 до плюс 150 0С, низький коефіцієнт тертя, зносостійкість при механічних навантаженнях і підвищених температурах в агресивних середовищах [21]. Фізичні та механічні властивості Armlen PP MF20-15IM наведені в таблиці 1 [14].

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1 – Фізичні та механічні властивості Armlen PP MF20-15IM

Параметри	Показник
Щільність	2,43 г/см ³
Температура вигину під навантаженням	74-108 оС
Коефіцієнт розширення	0.6·10 ⁻⁴ 1/оС
Коефіцієнт теплопровідності	0,4 Вт/(м·оС)
Питома теплоємність	1.5-2.5 кДж/(кг·оС)
Температура плавлення	240 оС
Модуль пружності	10.2 МПа

1.2 Аналіз способів збирання виробів із полімерних матеріалів

У сучасної промисловості для з'єднання деталей виконаних із пластику використовують три основні різновиди складання, які продемонстровані на Рисунку 8.



Рисунок 8 – Методи збирання виробів із полімерів

Розглянемо переваги та недоліки кожного з представлених способів.

Механічна збірка є методами для отримання роз'ємних сполук полімерних деталей за рахунок використання різного роду кріплень у вигляді металовиробів або елементів конструкції. До переваг даного способу можна віднести:

- простота;
- не потребує підготовки поверхонь;
- найнижча вартість додаткових матеріалів.

До явного і значущого недоліку механічного складання можна віднести - втрату якості з'єднання в процесі роботи, особливо якщо виріб працює під впливом навантаження або коливань. Також для отримання герметичного механічного з'єднання потрібне застосування різного роду герметиків і кілець ущільнювачів, що в свою чергу ліквідує практично всі переваги даного методу [11].

Агдезійна збірка включає в себе методи отримання нероз'ємних сполук шляхом активації поверхонь, що з'єднуються різними розчинами або розплавами, з подальшим їх щільним притисканням один до одного для встановлення міжмолекулярних зв'язків. До переваг даних методів можна віднести:

- поєднання різноманітних матеріалів;
- простота;
- поєднання виробів складної форми.

Істотним недоліком цих методів є – підготовка поверхні перед збиранням. Так як для отримання міцного з'єднання потрібно ретельне зачищення поверхні та її знежирення, на що витрачається час та додаткові матеріали. Що, своєю чергою, може значно підвищити вартість виготовлення виробу, оскільки деякі промислові хімічні клейові склади мають чималу вартість [2].

Окрему увагу хочеться приділити останньому способу збирання виробів з полімерних матеріалів - збирання зварюванням. Класифікація різновидів цього представлена Рисунок 9.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

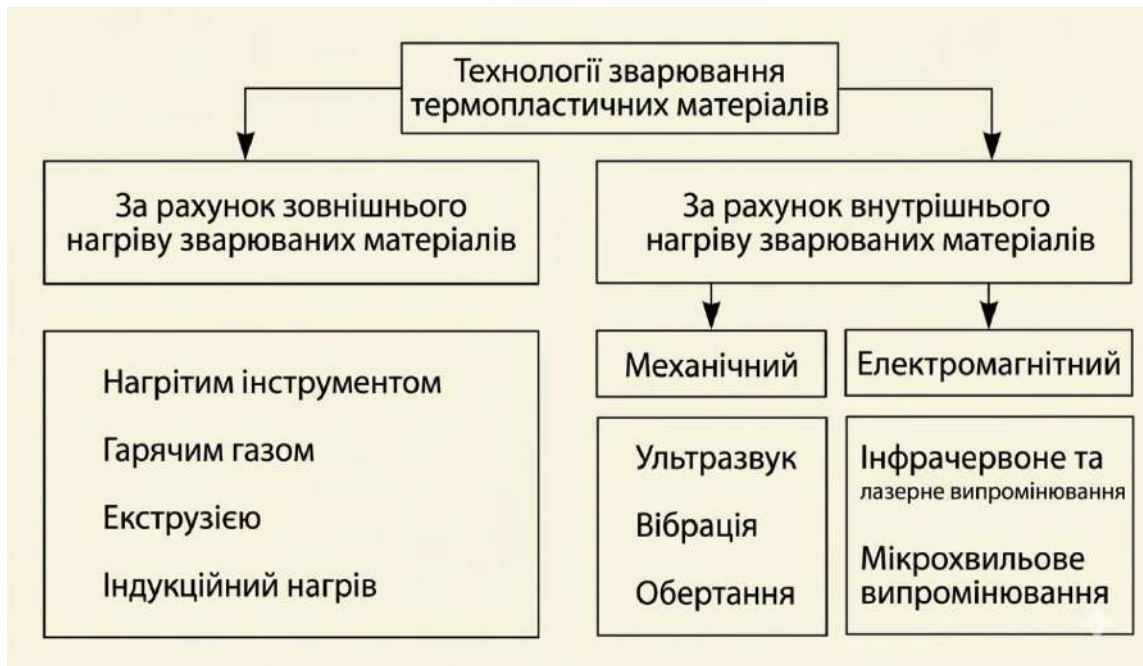


Рисунок 9 – Класифікація видів зварювання полімерів

Як видно зі схеми всі види зварювання поділяються на дві великі групи за способами нагрівання поверхонь, що зварюються. І багато з них мають однакові мінуси, а саме:

- практично всі вимагають обов'язкової підготовки поверхні;
- необхідне повне знежирення перед збиранням;
- потрібен високий рівень майстерності робітника;
- Витрачаються витратні матеріали.

Але з усіх технологій зварювання термопластичних полімерних матеріалів можна виділити ультразвукове зварювання. Оскільки вона перевершує інші методи і способи отримання нераз'ємного з'єднання виробів із полімерних матеріалів [18].

По-перше, перед ультразвуковим зварюванням не потрібне зачищення або знежирення поверхонь, що з'єднуються, так як високочастотні коливання руйнують всі масляні плівки і виводять забруднення на поверхню зварювальної ванни [18].

По-друге, вона не вимагає використання різних додаткових матеріалів, таких як клей або присадковий дріт. Тому що нагрівання відбувається за рахунок активації внутрішніх джерел енергії [18].

В – третіх, після ультразвукового зварювання виходитьнероз'ємне монолітне з'єднання, властивості якого нічим не відрізняються від основного матеріалу.

В – четвертих, за допомогою ультразвукового зварювання можна поєднувати деякі термопластичні матеріали, нероз'ємне складання яких іншими методами утруднене або зовсім неможливе. Саме до таких пластиків відносяться багато модифікованих інженерних полімерів, наприклад, склонаповнений поліамід.

До мінусам ультразвуковий зварювання часто фахівці наказують складність обладнання і зхйбність з'єднання довгомірних конструкцій.

1.3. Опис фізичних основ ультразвукового зварювання

Фізична сутність ультразвукового зварювання полягає у підведенні до з'єднуваних деталей механічних коливань високої частоти, яка перевищує межу чутності людини (понад 16 кГц). У промислових умовах найчастіше застосовуються частоти 16, 20, 36 та 40 кГц, що забезпечують ефективну передачу енергії в зону контакту матеріалів.

Під дією ультразвукових коливань у зоні стику деталей виникають циклічні пружні деформації, які супроводжуються внутрішнім тертям у матеріалі. Це призводить до локального підвищення температури, внаслідок чого полімер переходить у в'язкотекучий стан. Після припинення ультразвукового впливу розплавлений матеріал охолоджується під дією прикладеного тиску, що забезпечує формування міцного нероз'ємного з'єднання.

З фізичної точки зору ультразвукові коливання є різновидом пружних хвиль, які поширюються у матеріалі у вигляді періодичних змін деформацій та напружень. Такі коливання описуються гармонійними залежностями і можуть мати різні

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

форми, які визначаються як гармоніки. Для процесів ультразвукового зварювання найбільш ефективною є поздовжня форма коливань, при якій деформації відбуваються вздовж напрямку поширення хвилі. У цьому випадку вся коливальна система працює узгоджено, забезпечуючи рівномірний розподіл енергії по перерізу.

Гармонійні коливання можна описати загальним рівнянням:

$$A = A_m \sin(\omega t + \varphi),$$

де A — миттєве значення деформації; A_m — амплітуда коливань; ω — кругова частота; φ — початкова фаза.

Важливою характеристикою процесу є швидкість поширення ультразвукової хвилі в матеріалі, яка залежить від його пружних властивостей, густини та температурного стану. Для полімерів ця швидкість, як правило, знаходиться в межах 2000–6000 м/с. Саме через поширення хвилі здійснюється передача енергії, яка забезпечує нагрівання та плавлення матеріалу у зоні зварювання.

Потужність ультразвукової хвилі визначається потоком акустичної енергії, що проходить через одиницю площі за одиницю часу. Вона залежить від інтенсивності хвилі, яка, у свою чергу, визначається амплітудою коливань, частотою, щільністю матеріалу та швидкістю поширення звуку. Зі збільшенням амплітуди та частоти коливань інтенсивність процесу зростає, що сприяє більш швидкому нагріванню матеріалу.

Для реалізації процесу ультразвукового зварювання використовуються спеціалізовані технічні комплекси, до складу яких входять три основні елементи: ультразвуковий генератор, з'єднувальні елементи (кабель) та коливальна система. Кожен із цих компонентів виконує визначену функцію у процесі формування зварного з'єднання.

Ультразвуковий генератор є джерелом енергії та забезпечує перетворення електричного струму промислової частоти (50 Гц) у високочастотні електричні коливання. Окрім цього, генератор виконує функції керування процесом,

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зокрема регулювання параметрів зварювання та контроль стабільності роботи системи. Важливою особливістю сучасних генераторів є здатність автоматично підтримувати резонансний режим роботи коливальної системи. Це необхідно, оскільки резонансна частота може змінюватися внаслідок нагрівання елементів системи, зміни навантаження або умов контакту деталей.

Згенеровані електричні коливання передаються через кабель до коливальної системи, де відбувається їх перетворення у механічні коливання за допомогою спеціальних перетворювачів. Надалі ці коливання підсилюються та передаються у зону контакту деталей, забезпечуючи протікання процесу зварювання.

Таким чином, фізичні основи ультразвукового зварювання базуються на перетворенні електричної енергії у механічні високочастотні коливання, які викликають локальне нагрівання матеріалу за рахунок внутрішнього тертя, що в кінцевому підсумку забезпечує утворення міцного з'єднання без застосування додаткових матеріалів.

Схема ультразвукових комплексів представлена Рисунок 10:

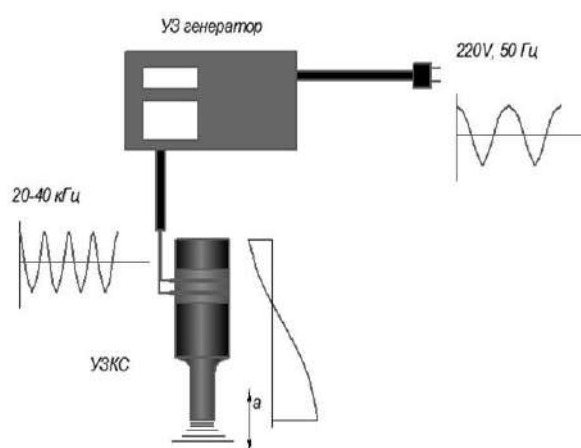


Рисунок 10 - Структурна схема комплексів для ультразвукового зварювання

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Залежно від типу перетворювача ультразвуку коливальні системи поділяються на:

- п'єзокерамічні;
- магнітострикційні.

Струм ультразвукової частоти, який сформував генератор, надходить саме на перетворювач ультразвуку, який трансформує електричні коливання струму у власні механічні коливання за рахунок [18] магнітострикції або п'єзоефекту.

Перетворювачі мають незначну власну амплітуду коливань, яка, у свою чергу, має важливий вплив на формування зварного шва. Тому значення амплітуди потрібно збільшити за рахунок підсилювача або форми хвилеводу, які щільно стягуються із перетворювачем.

Збільшення амплітуди коливань відбувається за рахунок різниці контактних площ перерізів. Підсилювач або хвилевід як рупор фокусують ультразвукові хвилі з великого до малого перерізу, тим самим підвищуючи їхню амплітуду. Залежно від форми та площ перерізів обчислюється коефіцієнт посилення амплітуди.

Потім коливання передаються або від підсилювача на хвилевід і до деталей, що зварюються, або відразу в зону зварювання, в залежності від типу ультразвукової коливальної системи.

На Рисунку 11 ви можете побачити схематичний ескіз коливальної системи з магнітостриктором:

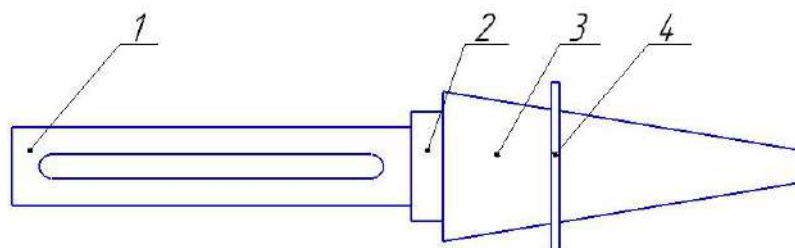


Рисунок 11 – Магнітострикційна коливальна система

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

До складу даної коливальної системи входить: безпосередньо сам магніостриктор 1, перехідник 2 і хвилевід 3. Вся коливальна система кріпиться за нульовий борт 4 в корпусі ручного пристрою або гільзі автоматизованої машини.

У свою чергу магніостриктор, який є перетворювачем ультразвуку, це пакет пластин завтовшки 0.2 міліметра із сплаву заліза та кобальту з додаванням ванадію – К49Ф2. У загальному користуванні цей метал відомий як пермендюр. При проходженні через пакет змінних електромагнітних хвиль пермендюр починає змінювати свої геометричні розміри, що відображається у появі поздовжньої деформації пакета та народженню ультразвукових механічних коливань на певній частоті, яка залежить від геометрії самого перетворювача.

Пластини припаюються до перехідника зі сталі 45 за допомогою срібного припою ПОС 40 і скріплюються один з одним емаллю гарячої сушіння. Змінне електромагнітне поле створюється з допомогою проходження високочастотного струму через котушки на стрижнях магніостриктора [18].

На Рисунку 12 представлено фото магніостриктора та хвилеводу у зборі.



Рисунок 12 – Ультразвукова коливальна система у зборі

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Магнітострикційні коливальні системи можуть довго працювати в безперервному режимі та при високих навантаженнях за потужністю та струмом, однак мають низький коефіцієнт корисної дії, близько 50 відсотків. Більш високим ККД мають п'єзокерамічні коливальні системи, але вони не здатні працювати тривалий час при високих навантаженнях. На Рисунку 13 ми можемо побачити схематичний ескіз п'єзокерамічної коливальної системи:

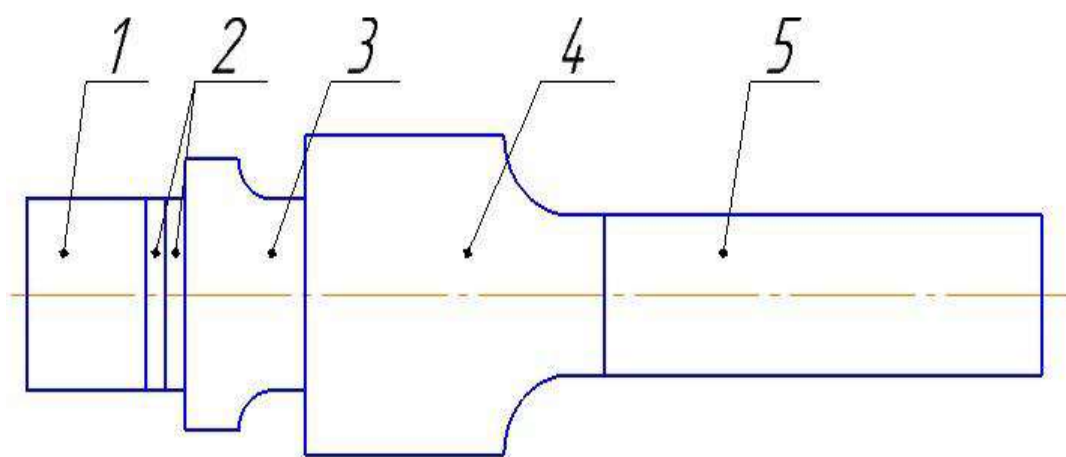


Рисунок 13 – П'єзокерамічна коливальна система

Всі п'єзокерамічні коливальні системи складаються з відбивача 1, який фіксує п'єзокерамічну шайбу 2 (перетворювач ультразвуку) і відображає від себе ультразвукові коливання у напрямку до зони зварювання.

П'єзокерамічні шайби являють собою диски зі спресованого порошку в срібній захисній плівці, між якими знаходяться мідні електроди. Саме на них і надходить високочастотний сигнал від генератора. Сьогодні на ринку існує понад 250 видів п'єзошайб різного складу та розмірів.

П'єзокерамічні шайби стягуються болтом через відбивач з перехідником 3, який прикручується до підсилювача 4, на якому закріплений за допомогою різьблення хвилевід 5.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

1.4 Огляд технічних рішень у галузі ультразвукового зварювання

Сучасний розвиток машинобудування, зокрема автомобільної промисловості, характеризується активним впровадженням полімерних матеріалів та композитів, що обумовлює необхідність застосування високоефективних технологій їх з'єднання. Однією з таких технологій є ультразвукове зварювання, яке забезпечує формування нероз'ємних з'єднань за рахунок локального нагрівання матеріалу під дією високочастотних механічних коливань. Вібрації з частотою зазвичай 15–70 кГц викликають внутрішнє тертя в зоні контакту, що призводить до плавлення полімеру і формування міцного з'єднання. З технічної точки зору ультразвукове зварювання є однією з найшвидших технологій з'єднання, оскільки тривалість циклу часто становить менше однієї секунди, а сам процес не потребує використання додаткових матеріалів (клеїв, присадок), що значно підвищує його економічну та екологічну ефективність.

Схема процесу ультразвукового зварювання пластмас

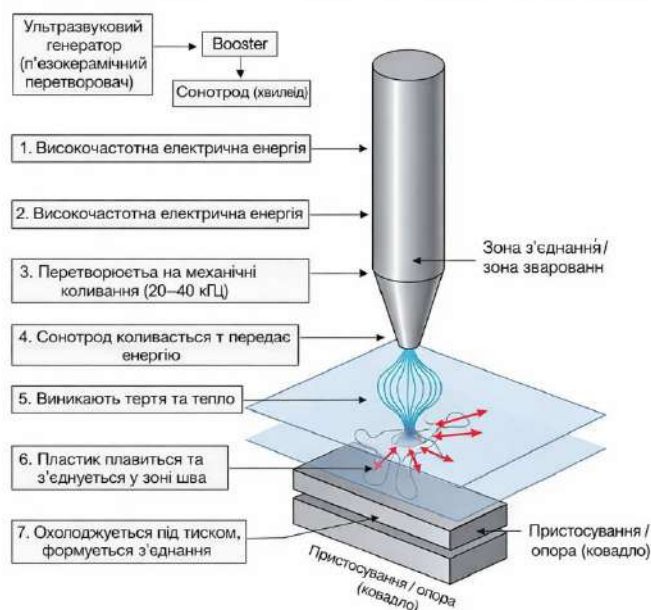


Рисунок 14 Загальна схема ультразвукового зварювання пластмас

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Будь-яке ультразвукове зварювальне обладнання складається з кількох ключових функціональних вузлів:

- ультразвуковий генератор;
- перетворювач (п'єзоелектричний або магнітострикційний);
- підсилювач (booster);
- хвилевід (сонотрод);
- опорний пристрій (анвіл або ложемент).

Генератор перетворює електричну енергію мережі у високочастотні коливання, які передаються через перетворювач у механічні. Далі коливання підсилюються та концентруються у хвилеводі, який передає енергію безпосередньо у зону контакту деталей. Саме конструкція хвилеводу визначає ефективність передачі енергії та якість зварного з'єднання. Важливою особливістю сучасних технічних рішень є використання систем автоматичного підтримання резонансу, що забезпечує стабільність процесу навіть при зміні температури або навантаження.

Типи ультразвукових зварювальних установок



Рисунок 15. Ручна ультразвукова установка

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25



Рисунок 16. Прилад ручного ультразвукового зварювання

Ручні ультразвукові установки широко застосовуються у дрібносерійному виробництві та ремонтних роботах. Основною перевагою таких систем є мобільність, простота використання та можливість роботи з великогабаритними деталями.

Сучасні ручні системи мають ергономічну конструкцію, малу масу та можливість регулювання параметрів процесу. Вони забезпечують достатню точність і широко використовуються для зварювання елементів інтер'єру

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

автомобілів, зокрема панелей приладів, декоративних накладок і корпусних деталей.

Недоліком є залежність якості з'єднання від кваліфікації оператора та обмежена продуктивність.

Напівавтоматичні стенди



Рисунок 17. Напівавтоматичні ультразвукові стенди

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Напівавтоматичні установки є найбільш поширеним рішенням у промисловості. Вони поєднують стабільність процесу з відносною простотою конструкції.

У таких системах:

- зварювальна головка переміщується за допомогою пневмо- або сервоприводу;
- параметри процесу контролюються електронними системами;
- забезпечується повторюваність результатів.

Сучасні установки дозволяють точно контролювати:

- силу притискання,
- час зварювання,
- амплітуду коливань,
- енергію процесу.

Це дозволяє досягати високої якості з'єднань, що особливо важливо для автомобільної промисловості.

Автоматизовані багатоточкові комплекси



					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 18. Автоматизовані комплекси ультразвукового зварювання

Найбільш технологічно розвиненими є автоматизовані комплекси ультразвукового зварювання. Вони використовуються у масовому виробництві та можуть містити десятки ультразвукових головок, які працюють синхронно.

Основні характеристики:

- висока продуктивність;
- автоматичне позиціонування деталей;
- інтеграція з роботизованими системами;
- контроль якості в режимі реального часу.

Такі системи широко застосовуються у виробництві:

- автомобільних панелей,
- корпусів електроніки,
- медичних виробів.

Завдяки автоматизації досягається висока точність та мінімізація людського фактору.

Технічні рішення провідних виробників

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 19. Установка MS Ultraschall Technologie

На сучасному ринку представлені численні виробники ультразвукового обладнання, серед яких провідні позиції займають:

- Herrmann Ultrasonics
- Dukane Corporation
- Branson Ultrasonics
- MS Ultraschall Technologie

Ці компанії розробляють як стандартні, так і індивідуалізовані рішення для різних галузей.

Сучасні технічні рішення включають:

- цифрові генератори з адаптивним керуванням;
- системи контролю якості зварювання;
- автоматичне налаштування резонансної частоти;
- інтеграцію з промисловими роботами.

Зокрема, обладнання провідних виробників забезпечує високу точність зварювання, стабільність параметрів процесу та можливість роботи з широким спектром матеріалів .

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструктивні особливості хвилеводів і енергетичних концентраторів



Рисунок 20. Сучасні конструкції хвилеводів

Важливим напрямом розвитку технічних рішень є оптимізація конструкції хвилеводів і зварних з'єднань. Для ефективного зварювання необхідно забезпечити концентрацію енергії у зоні контакту, що досягається за рахунок спеціальних геометричних елементів — енергетичних концентраторів.

Найбільш поширені типи з'єднань:

- ступінчасті;
- шип-паз;
- з енергетичним ребром (energy director).

Енергетичні концентратори дозволяють локалізувати процес плавлення і підвищити якість зварного шва. Геометрія хвилеводу підбирається з урахуванням матеріалу, частоти та потужності системи.

Інноваційні напрями розвитку ультразвукового зварювання

Сучасні дослідження спрямовані на інтеграцію ультразвукового зварювання з цифровими технологіями та системами штучного інтелекту.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розробляються системи моніторингу, які дозволяють у режимі реального часу оцінювати якість зварного з'єднання та виявляти дефекти.

Також активно розвивається технологія ультразвукового адитивного виробництва, яка дозволяє створювати багат шарові металеві конструкції шляхом послідовного зварювання тонких шарів матеріалу.

Основні тенденції:

- підвищення енергоефективності;
- автоматизація та роботизація;
- цифровий контроль процесу;
- використання композитних матеріалів.

Аналіз сучасних технічних рішень у галузі ультразвукового зварювання показує, що ця технологія є однією з найбільш перспективних для з'єднання полімерних матеріалів. Вона забезпечує високу якість з'єднань, малий час циклу та екологічну безпеку. Розвиток технології пов'язаний із впровадженням автоматизованих систем, удосконаленням конструкції обладнання та інтеграцією інтелектуальних систем керування.

1.5. Аналіз досліджень у галузі ультразвукового зварювання поліпропілену та його кополімерів

Було проведено літературний пошук наукових праць на тему ультразвукового зварювання чистого поліпропілену та його модифікованих кополімерів.

На малюнках 21 та 22 представлені залежності міцності та відносного подовження зразків з поліетилену від способу зварювання та тривалості старіння. Кожна точка на кривих є середньоарифметичним значенням чотирьох вимірів [9].

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

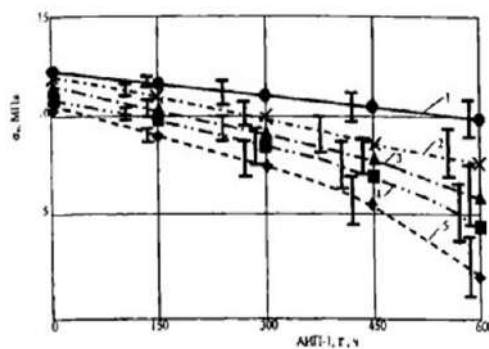


Рисунок 21 – Залежності міцності зразків від способу зварювання та часу старіння: 1 – вихідний поліетилен, 2 – ультразвукове зварювання, 3 – екструзонне зварювання, 4 – зварювання нагрітим елементом, 5 – зварювання газом

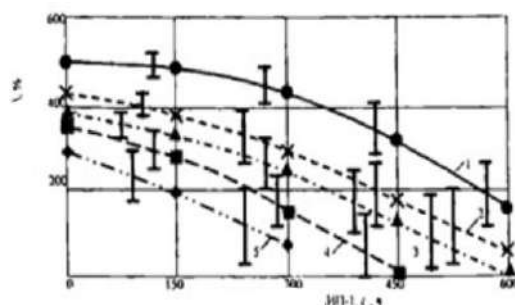


Рисунок 22 – Залежності відносного подовження зразків від способу зварювання та часу старіння: 1 – вихідний поліетилен, 2 – ультразвукове зварювання, 3 – екструзонне зварювання, 4 – зварювання нагрітим елементом, 5 – зварювання газом

Встановлено, що початковий матеріал, який не зазнавав термічних впливів, після 600 годин старіння демонструє незначне зниження міцності — на рівні приблизно 16–17%. У той же час для зварних з'єднань спостерігається більш суттєве погіршення механічних характеристик. Так, для ультразвукового зварювання зменшення міцності становить 28–33%, для екструзійного — 40–

50%, при зварюванні нагрітим інструментом — 40–67%, а для газового зварювання — до 60–84%.

Разом із тим ультразвукове зварювання забезпечує формування з'єднань, міцність яких у ряді випадків досягає 90–100% від міцності основного матеріалу. Проте характерною особливістю цього методу є нерівномірність міцнісних показників у межах одного шва. Навіть на одному виробі, при випробуванні зразків однакової ширини, можливі значні коливання міцності — від 50 до 100% від базового матеріалу. Така нестабільність пояснюється складною картиною поширення ультразвукових хвиль у полімері, що призводить до неоднорідного розподілу енергії в зоні зварювання.

Для оптимізації параметрів процесу ультразвукового зварювання широко застосовується метод Тагучі, в якому використовується показник «сигнал/шум» (S/N). Даний показник характеризує співвідношення корисного ефекту до варіацій, спричинених випадковими чинниками. Він формується на основі функції втрат і може набувати різних математичних форм залежно від поставленої задачі оптимізації. У випадку, коли необхідно досягти максимальної міцності з'єднання, застосовується критерій типу «чим більше — тим краще», що дозволяє мінімізувати вплив зовнішніх збурень на результат.

На основі проведеного аналізу було визначено оптимальні комбінації параметрів процесу для зварювання поліпропілену. Найкращі результати забезпечуються при поєднанні параметрів, умовно позначених як D1/, що відповідають часу зварювання близько 0,33 с, тиску 3,5 бар, часу витримки 0,15 с, тиску витримки 2,5 бар, застосуванню трикутного енергетичного концентратора та амплітуди коливань 40 мкм.

Для композиційних матеріалів на основі поліпропілену, армованого скловолокном, оптимальні параметри дещо відрізняються. Для матеріалу з вмістом 10% наповнювача ефективною є комбінація F3, тоді як для 30%

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наповнення —E2/F3. Відповідні результати експериментальних досліджень підтверджують, що правильний підбір параметрів дозволяє суттєво підвищити міцність зварного з'єднання та забезпечити його стабільність.

Material	Optimum Levels						Joint Strength (Mpa)	Mean Estimation (dB)	Confirmation Experiment (dB)
	A	B	C	D	E	F			
PP	3	3	1	1	1	3	13.77	25.01	22.78
PP+ 10% G.F.	3	1	1	2	1	3	13.29	23.66	22.47
PP+ 30% G.F.	3	1	2	1	2	3	12.78	22.89	22.13

Рисунок 23 – Табулювання середньої оцінки та підтверджуючий експеримент

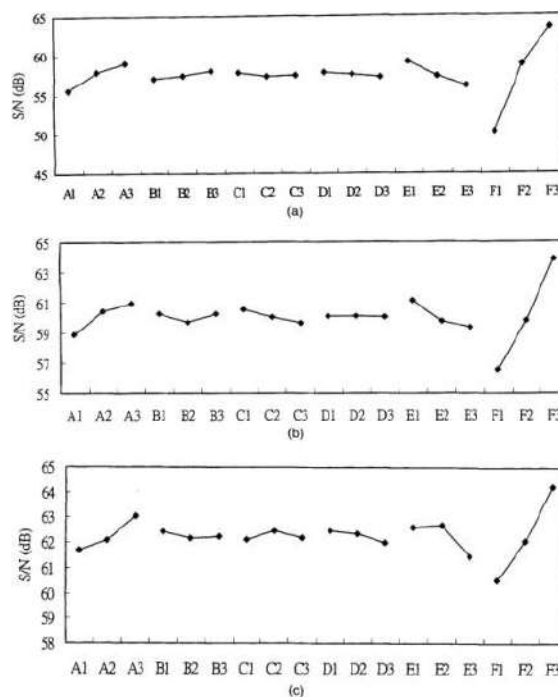


Рисунок 24 – Зміна коефіцієнта S/N

Схема експерименту, заснована на методі Тагучі, може бути успішно використана для пошуку оптимальних умов підвищення міцності з'єднання термопластичних композитів, зварених ультразвуком.

Експериментальні результати показують, що найважливішими чинниками є час зварювання, геометрія енергетичного концентратора та амплітуда коливань.

Істотно покращено міцність з'єднання поліпропіленових композитів за оптимальних умов обробки. Результати підтверджуючого експерименту за оптимальних умов обробки показали, що зварний композит дійсно демонструє найвищу міцність з'єднання.

Полімери, наповнені скловолокном, вимагають менше енергії для успішного зварювання ніж ненаповнені полімери.

Встановлено, що міцність з'єднань зварних деталей збільшується зі збільшенням вмісту волокон у композитах.

Після процесу зварювання поліпропілену пікові температури зміщуються від 167 до 162°C через зміну розміру та форми частинок. Температура T_g знижується приблизно на 2–3 % на поверхні, що зварюється, що призводить до зміни кристалічної природи матеріалу та переорієнтації волокон мономерів.

Експериментальні дані термічного аналізу поліпропіленових зразків після ультразвукового зварювання за наслідками зведеного аналізу підсумків досліджень представлені у вигляді графічних залежностей на Рисунок 25.

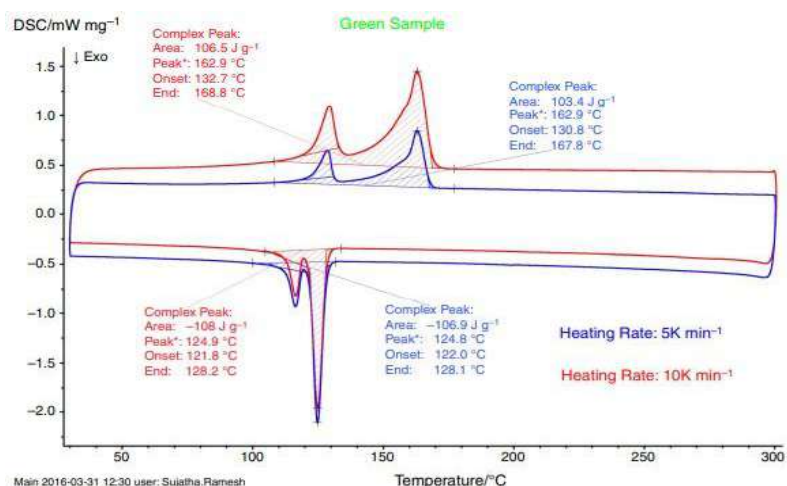


Рисунок 25 – Термічний аналіз поліпропілену після ультразвукового зварювання

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Тут температура склування вказує точну температуру, за якої рухи ланцюгів значно збільшуються; ці зміни можуть бути пов'язані з різними факторами, такими як довжина шва, ступінь сплавлення та наявність інших полімерів. Кристалічна природа поліпропілену збільшує час вібрації, що потребує великих витрат енергії для розплавлення кристалічної фази.

Довжина полімерного ланцюга описує товщину кристала, яка надалі залежить умов кристалізації. Цей процес істотно впливає на аморфну фазу. Структура з більш високим ступенем кристалізації потребує більшого часу зварювання, а також потребує більш високої енергії для плавлення кристалічної фази. Аналіз зони зварювання показує, що відмінності між значеннями температури нагрівання та охолодження 5 та 10 К хв⁻¹ однакові [24].

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Розробка обладнання для ручного ультразвукового зварювання вставки панелі приладів

2.1 Розрахунок пакета для магніостриктора

Як було сказано вище магніостриктор являє собою пакет із пластин товщиною 0.2 міліметра, виготовлених з пермендіюру, якою у своєму складі має до 50 відсотків заліза та кобальту та до 2 відсотків ванадію.

Власна резонансна частота магніострикційного пакета і його номінальна потужність залежать від геометричних параметрів пакета, що збирається. На Рисунку 26 показана розрахункова схема магніостриктора.

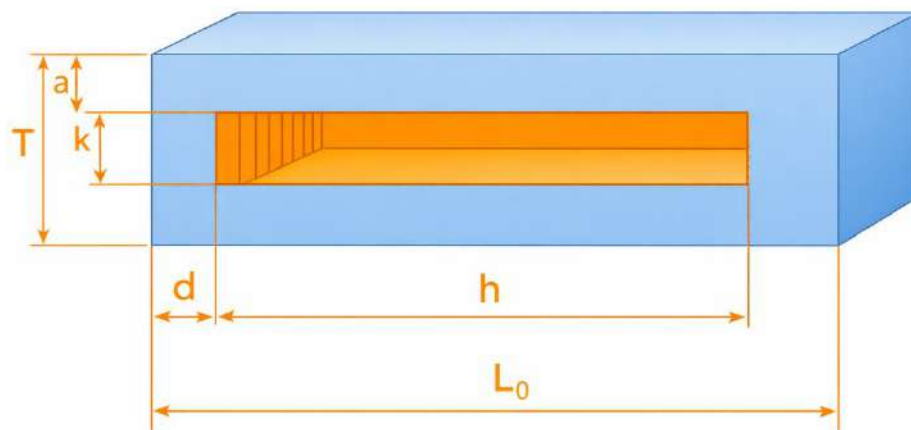


Рисунок 26 – Розрахункова схема магніостриктора

Також для проведення розрахунку необхідно знати деякі основні параметри теплофізики та акустики, необхідні для розігріву полімерного матеріалу, що зварюється.

Для зниження трудовитрат на розрахунки магніострикційного пакета їх виконують у різних САП програмах, таких як Mathcad.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

У таблиці 2 представлені параметри для проведення розрахунку магнітострикційного пакета, здатного ввести поліпропілен марки Armlen PP в рідкий стан.

Таблиця 2 - Вихідні дані для розрахунку

Параметри магнітостриктера	Значення
Потужність, P	800 Вт
Питома потужність, P ₀	40 Вт/см ²
Швидкість звуку в поліпропілені, C _c	4 623 м/с
Резонансна частота f	20 000 Гц
Напруженість збудження, НВЗ	2800 А/м

Почне розрахунок з визначення ширини та висоти пакета [18]:

$$T = \sqrt{\frac{P}{P_0}} = \sqrt{\frac{800}{40}} = 2 \text{ см} = 20 \text{ мм}$$

Знайдемо ширину стрижня [18]:

$$a = \frac{T}{3} = \frac{20}{3} = 6.67 \text{ мм} = 7 \text{ мм}$$

Приймемо висоту накладки рівної [18]:

$$d = a + 0.5 = 7 + 0.5 = 7.5 \text{ мм}$$

Далі визначимо висоту вікна [18]:

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$h = \frac{c}{\pi f} \operatorname{arctg} \left(\frac{2a}{T \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi f d}{cc} \right)} \right) = \frac{4623}{3,14 \cdot 20000} \operatorname{arctg} \left(\frac{2 \cdot 7}{20 \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 20000 \cdot 7,5}{4623} \right)} \right) = 87,693 = 88 \text{ мм}$$

Розрахуємо ширину вікна [18]:

$$k = T - 2a = 20 - 2 \cdot 7 = 6 \text{ мм}$$

Залишилося визначити довжину пакета [18]:

$$L_0 = h + 2d = 88 + 2 \cdot 7,5 = 103 \text{ мм}$$

Для створення навколо магнітострикційного пакету змінного електромагнітного поля на його стрижні необхідно нанести обмотки з МГТФ дроту перерізом 0.75 міліметрів.

Після розрахунку геометричних параметрів пакета можна розпочати пошук необхідної кількості витків за формулою 4:

$$n = \frac{A_3}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_3}, \quad (4)$$

де A_3 - кількість ампер-витків збудження,

I_3 - Змінний струм збудження, приймаємо $I_3 = 6A$

А кількість ампер витків обчислюється за формулою 5 [18]:

$$A_3 = \frac{H_3 \cdot L_{cp}}{0,4 \cdot \pi}, \quad (5)$$

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де L_{cp} - Середня довжина магнітного потоку поля, що визначається за формулою 6.

$$L_{cp} = 2 \cdot h - k + \pi \cdot \frac{k}{2} + \frac{d}{2}$$

Використовуючи всі дані, розраховуємо кількість витків:

$$L_{cp} = 2 \left(88 - 6 + 3.14 \left(\frac{6}{2} + \frac{7.5}{2} \right) \right) = 103.2 \text{ мм}$$

$$A_3 = \frac{2800 \cdot 103.2}{0.4 \cdot 3.14} = 730 \text{ А}$$

$$n = \frac{730}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 6} = 40.02 = 40$$

Отже, на кожен стрижень потрібно буде нанести по 40 витків дроту.

2.2 Розробка хвилеводу для зварювання

Елементи вставки панелі приладів з'єднуються шляхом оплавлення трьох пін діаметром 8.1 міліметра і висотою 15 міліметрів. Товщина стінки одного піна дорівнює 2 міліметри.

Розрахунок ультразвукових хвилеводів можна розбити на три основні етапи.

Перший – розрахунок майбутньої геометрії хвилеводу з урахуванням обраного типу перетворювача ультразвуку та форми зварної точки. До геометричних параметрів хвилеводу відносяться довжина, а також вхідна і вихідна контактні площі перерізів, які визначаються потужністю, що передається.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після цього створюється перший ескіз хвилеводу і починається його доопрацювання з погляду технологічності, тобто опрацьовуються радіуси округлення, жолобники, припуски та інші елементи.

На Рисунку 27 показаний перший ескіз хвилеводу для оплавлення пінів кріплення вставки панелі приладів:

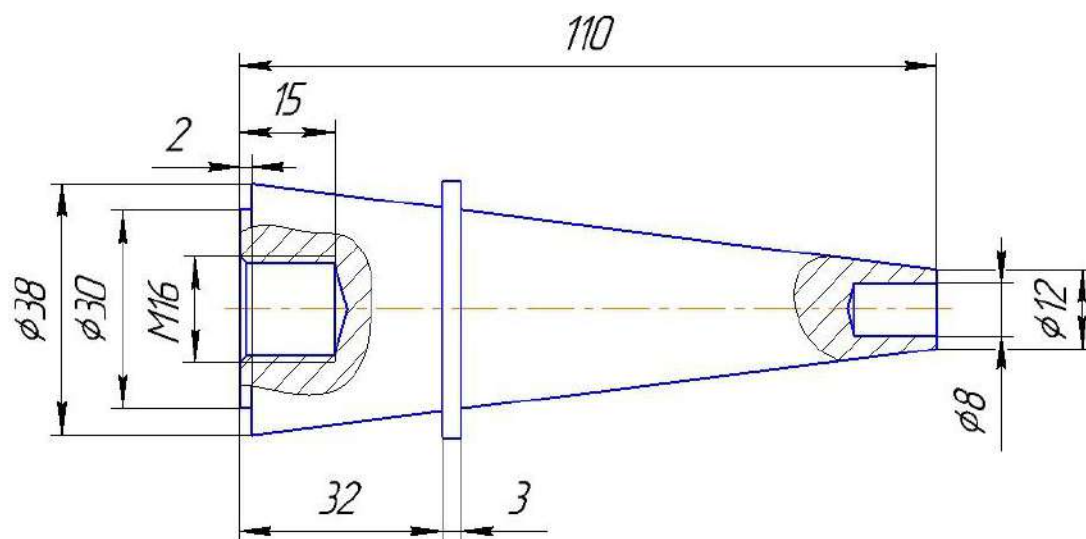


Рисунок 27 – Перший ескіз хвилеводу

Після промальовування геометрії хвилеводу з урахуванням усіх технологічних елементів починається етап перевірки. На підставі креслень створюється модель хвилеводу та методом кінцевих елементів проводиться її аналіз, з метою визначення гармонік та мод коливань. Потрібно забезпечити поздовжні гармонійні моди коливань на частоті приблизно 20 кілогерців. Якщо це не виконується, то вносяться зміни до розрахунків і геометрії хвилеводу і модальний аналіз проводиться повторно, доки не будуть забезпечені поздовжні моди коливань.

Для спрощення пояснювальної записки представлений останній варіант розрахунку ультразвукового хвилеводу для зварювання вставки панелі приладів легкового автомобіля.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Для початку визначимо площі вихідного перерізу магніостриктора та вхідного перерізу хвилеводу.

Магніостриктор з'єднується з хвилеводом за допомогою сталевого перехідника, контактна площа якого дорівнює 505.9 мм².

Прийmemo більший діаметр хвилеводу рівний 38 мм. Перехідник та хвилевід з'єднується за допомогою різьблення М16. З огляду на ці фактори контактна вхідна площа хвилеводу дорівнюватиме 933.1 мм².

Питомий хвильовий опір стали 45 = 3.9.107 кг/м²· с.

Питомий хвильовий опір ВТЗ-1 = 2.2.107 кг/м²· с[18].

Використовуючи формулу, знайдемо вихідну площу хвилеводу S₂:

$$S_2 = \frac{S_1 w_1}{w_2} = \frac{505.9 \cdot 3.9}{2.2} = 896.8 \text{ мм}^2$$

Далі потрібно перевести площу в діаметр, для цього скористаємося формулою 8:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (8)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 896.8}{3.14}} = 11.8 \text{ мм} = 12 \text{ мм}$$

Тепер визначимо довжину ультразвукового хвилеводу та розташування нульового перерізу, для промальовування бурта кріплення

Довжина хвилеводу визначається за формулою 9:

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$l = \frac{nc}{2f} \sqrt{\left(1 + \left(\frac{\ln k}{\pi n}\right)^2\right)}, \quad (9)$$

де n – ціле число напівхвиль, припадаючих на довжину,

обчислюваного елемента (прийmemo $n=1$); c –

швидкість звуку, м/с (ВТЗ-1 – 5044.96 м/с);

k - Коефіцієнт посилення концентратора ($k = \frac{D_{\text{вхід}}}{D_{\text{вихід}}}$).

$$k = \frac{38}{12} = 3.17$$

$$l = \frac{5044960}{2 \cdot 20000} \sqrt{\left(1 + \left(\frac{\ln 3.17}{3.14}\right)^2\right)} = 134.36 \text{ мм}$$

Розташування нульового перерізу визначається за формулою 10:

$$x_0 = \frac{l}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\pi} \ln k\right) \quad (10)$$

$$x_0 = \frac{134.36}{3.14} \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{3.14} \ln 3.17\right) = 35.69 \text{ мм}$$

2.3. Розробка ручного пристрою для ультразвукового зварювання

На підставі фінальних розрахунків та з урахуванням технологічних вимог було спроектовано ультразвукову коливальну систему, представлену на Рисунку 28:

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

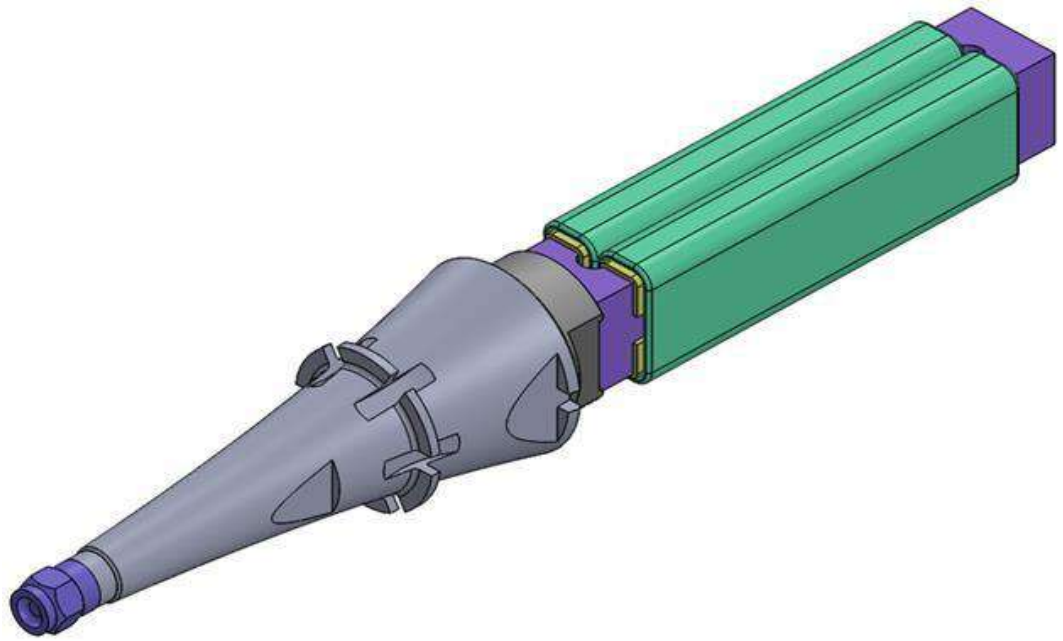


Рисунок 28 – Модель ультразвукової коливальної системи

У проектованому технологічному процесі передбачається використовувати ручне ультразвукове зварювання для складання верхньої та нижньої накладок вставки панелі приладів.

Для цього потрібно розробити конструкцію даного ручного пристрою.

Виходячи з великих габаритів деталей, що зварюються, доцільно використовувати ручний пристрій пістолетного типу.

Також необхідно забезпечити у корпусі гільзи кріплення ультразвукової коливальної системи за нульовий борт, повітряне охолодження та скобу для балансиру.

Враховуючи всі ці факти, було розроблено ручний пристрій для ультразвукового складання елементів вставки панелі приладів, представлений на Рисунку 29:

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

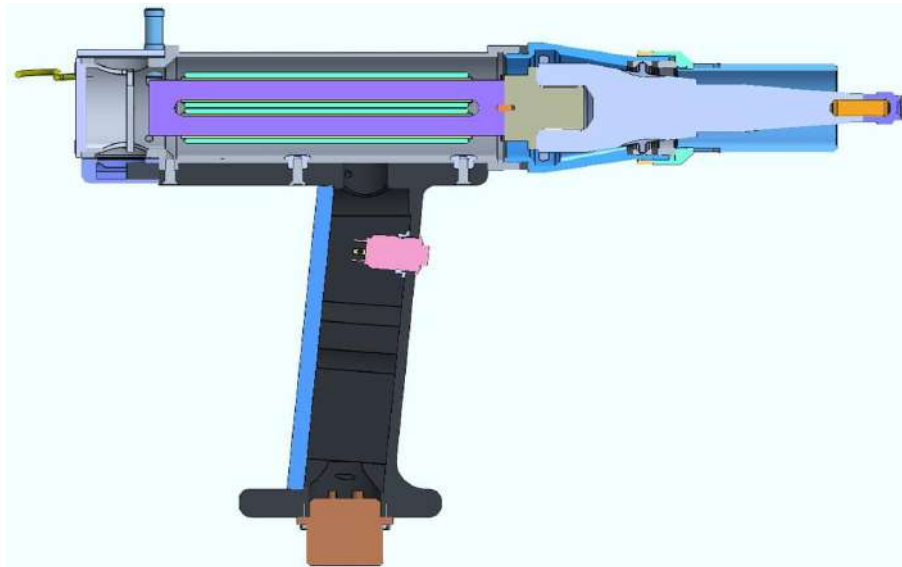


Рисунок 29 – Ручний ультразвуковий пристрій у зборі

2.4. Розробка ультразвукового генератора

Групі електротехніків та програмістів на базі ТГУ, було надано місію з розробки генератора для ультразвукового зварювання елементів вставки панелі приладів легкового автомобіля.

Потрібно забезпечити такі технічні характеристики:

- вхідна напруга – 220В;
- вхідна частота струму – 50 Гц;
- струм підмагнічування – 6 А;
- струм збудження – 12 А;
- вихідна потужність – 600 Вт.

За результатами їх роботи було створено ультразвуковий генератор, представлений на Рисунку 30:

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



Рисунок 30 – Ультразвуковий генератор

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

3. Розробка технологічного процесу збирання вставки панелі приладів легкового автомобіля

3.1 Розрахунок параметрів режиму ультразвукового зварювання

До ключових параметрів режиму ручного ультразвукового зварювання належать потужність випромінювання, тривалість впливу ультразвукових коливань, час кристалізації (полімеризації) розплавленого матеріалу, а також величина зварювального зусилля. Сукупність цих параметрів визначає ефективність процесу формування з'єднання та його механічні характеристики.

Для визначення необхідної тривалості ультразвукового впливу використовується залежність, яка пов'язує витрачену енергію з об'ємом матеріалу, що переходить у розплавлений стан. У даному випадку враховуються питома енергія матеріалу, акустична потужність та об'єм зони плавлення.

Питома енергія, необхідна для нагрівання та плавлення полімеру, визначається з урахуванням теплофізичних характеристик матеріалу, а саме його теплоємності, густини та температури плавлення. Для досліджуваного матеріалу Armlen PP MF20-15IM ці параметри становлять відповідно: теплоємність близько 2 кДж/(кг·°C), температура плавлення — 240 °C, густина — 2,43 г/см³. На основі цих даних розраховано, що питома енергія, необхідна для переведення матеріалу у розплавлений стан, становить приблизно 1049,76 Дж/см³.

Наступним етапом є визначення об'єму матеріалу, який підлягає розплавленню. Оскільки конструктивний елемент (пін) має форму порожнистого циліндра, його об'єм обчислюється як різниця між зовнішнім і внутрішнім об'ємами. Для заданих геометричних параметрів (висота 15 мм, зовнішній діаметр 8 мм, внутрішній — 4 мм) отримано значення об'єму розплавленої зони, що дорівнює приблизно 0,5655 см³.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Акустична потужність, яка забезпечує нагрівання матеріалу в зоні контакту, залежить від частоти коливань, модуля пружності матеріалу та амплітуди деформації. Для умов процесу (частота 20 кГц, модуль пружності 10,2 МПа, амплітуда 10 мкм) визначено, що інтенсивність енергетичного впливу становить близько 64,056 Дж/(см³·с).

На основі співвідношення між необхідною питомою енергією та підведеною акустичною потужністю визначається тривалість ультразвукового імпульсу, достатня для формування розплаву в зоні зварювання. Після припинення дії ультразвуку відбувається стадія охолодження та полімеризації матеріалу, тривалість якої для заданого об'єму становить орієнтовно 2 секунди.

Оскільки в роботі розглядається ручний спосіб ультразвукового зварювання, величина прикладеного зусилля визначається фізичними можливостями оператора і зазвичай знаходиться в межах 4–6 Н. Це забезпечує необхідний контакт між деталями та сприяє формуванню якісного зварного з'єднання.

3.2 Опис технологічного процесу збирання вставки панелі приладів легкового автомобіля

Виготовлені накладки вставки панелі приладів надходять на складально-зварювальну дільницю у захисній упаковці, як правило, в поліетиленових пакетах, що запобігає їх механічному пошкодженню та забрудненню під час транспортування і зберігання. Перед початком зварювальних операцій виконується комплекс підготовчих заходів, спрямованих на забезпечення стабільної якості майбутнього з'єднання.

Першим етапом технологічного процесу є вхідний контроль деталей. На цьому етапі здійснюється ретельний огляд зовнішніх поверхонь накладок з метою виявлення дефектів лиття, таких як тріщини, раковини, деформації або

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пошкодження декоративного шару. Особлива увага приділяється стану кромки і місць формування з'єднувальних елементів (пінів), оскільки наявність задирок або залишків литникової системи може негативно впливати на процес зварювання. Деталі з видимими дефектами лицьової поверхні відбраковуються та направляються на повторну переробку. Незначні задирки допускається видаляти механічним способом із застосуванням ручного інструменту.

Наступним важливим етапом є очищення поверхонь від можливих технологічних забруднень. Враховуючи, що деталі після лиття можуть містити залишки мастильних речовин або технологічних добавок, їх присутність у зоні зварювання може призвести до погіршення адгезії та зниження міцності з'єднання. З цією метою виконується сушіння або прогрівання з'єднувальних елементів за допомогою промислового фена при помірній температурі, що забезпечує видалення вологи та летких компонентів без деформації полімеру.

Процес ультразвукового зварювання



Рисунок 31. Схема технологічного процесу

Після підготовки деталей виконується їх позиціонування у спеціальному технологічному оснащенні — ложементі, який відтворює геометрію виробу та забезпечує точне взаємне розташування елементів. Спочатку встановлюється

нижня накладка, після чого на неї укладається верхня частина. Для запобігання зміщенню деталей під час зварювання застосовуються пневматичні або механічні притискні пристрої, які забезпечують їх фіксацію та щільний контакт у зоні з'єднання. При цьому необхідно контролювати відсутність перекосів або зазорів, що можуть призвести до дефектів шва.

Основна операція — ультразвукове зварювання — виконується за допомогою ручного ультразвукового інструменту. Оператор встановлює робочий торець хвилеводу строго перпендикулярно до поверхні з'єднувального піна, після чого прикладає контрольоване зусилля у межах 4–6 Н. Після активації системи ультразвуковий генератор подає високочастотні коливання, які передаються через хвилевід у зону контакту деталей. Внаслідок цього відбувається локальне нагрівання полімеру за рахунок внутрішнього тертя, що призводить до його розплавлення і формування зварного ядра.

Тривалість впливу ультразвуку визначається попередньо розрахованими параметрами і становить приблизно 3–4 секунди. Після завершення подачі коливань процес переходить у фазу формування з'єднання, під час якої оператор продовжує утримувати зусилля протягом декількох секунд для забезпечення охолодження і кристалізації матеріалу. Важливою умовою є нерухомість інструменту в процесі зварювання, оскільки навіть незначні зміщення можуть призвести до порушення структури шва та зниження його міцності.

Аналогічним чином виконується зварювання інших з'єднувальних елементів, причому послідовність обробки може змінюватися залежно від зручності доступу та конструктивних особливостей виробу. У результаті формується жорстке нероз'ємне з'єднання між верхньою та нижньою накладками.

Після завершення зварювальних операцій здійснюється контроль якості. На цьому етапі проводиться візуальний огляд зварних точок з метою виявлення дефектів, таких як неповне оплавлення, тріщини, перекоси або надмірне

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вигляду матеріалу. У разі необхідності можуть застосовуватися додаткові методи контролю, зокрема перевірка на міцність або геометричну точність.

Заключним етапом технологічного процесу є пакування готового виробу. Вставка панелі приладів укладається у захисну поліетиленову упаковку, що запобігає її пошкодженню під час транспортування та зберігання. Після цього виробу розміщуються у спеціальні контейнери або тару для подальшого переміщення на склад готової продукції або на наступні стадії виробництва.

Таким чином, розроблений технологічний процес забезпечує послідовне виконання операцій підготовки, складання, зварювання та контролю, що дозволяє отримати якісне та надійне з'єднання елементів вставки панелі приладів із мінімальними витратами часу та ресурсів.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Безпека та екологічність ультразвукового зварювання вставки панелі приладів

Процеси складання виробів з полімерних матеріалів із застосуванням ультразвукового зварювання характеризуються поєднанням механічних, теплових та акустичних впливів, що зумовлює необхідність комплексного аналізу умов безпеки праці та впливу технології на навколишнє середовище. Ультразвукове зварювання вставки панелі приладів легкового автомобіля, яке реалізується у вигляді ручного технологічного процесу, передбачає безпосередню взаємодію оператора з обладнанням, що генерує високочастотні коливання, а також виконання ряду допоміжних операцій, пов'язаних із підготовкою, складанням, контролем і пакуванням виробів. У зв'язку з цим питання забезпечення безпечних умов праці набуває першочергового значення і повинно розглядатися на етапі проектування технологічного процесу та обладнання.

Робоче місце оператора ультразвукового зварювання повинно відповідати сучасним ергономічним вимогам, що забезпечують мінімізацію фізичного навантаження, запобігання розвитку професійної втоми та підвищення ефективності виконання операцій. Конструкція робочого місця має передбачати оптимальне розташування обладнання, інструментів та допоміжних пристроїв у межах зони досяжності оператора. Важливим є забезпечення регульованої висоти робочої поверхні, наявність зручного сидіння або опори для стоячої роботи, а також достатнього простору для рухів. Організація робочого місця повинна виключати вимушені пози та тривале статичне навантаження, яке може негативно впливати на опорно-руховий апарат працівника.

Особливістю ультразвукового зварювання є наявність акустичних коливань високої частоти, які можуть поширюватися як через повітря, так і через елементи конструкції обладнання. Незважаючи на те, що робочі частоти ультразвуку лежать поза межами чутності людини, вони здатні чинити

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

негативний вплив на організм, зокрема викликати втому, головний біль, зниження концентрації уваги та функціональні порушення нервової системи при тривалому впливі. Тому одним із ключових напрямів забезпечення безпеки є зниження рівня ультразвукового випромінювання у робочій зоні. Це досягається шляхом застосування конструктивних заходів, таких як акустична ізоляція джерел випромінювання, використання демпфуючих матеріалів, герметизація корпусів обладнання, а також раціональне розміщення робочих місць.

Окрім акустичних факторів, важливу роль відіграють теплові навантаження, що виникають під час підготовчих операцій, зокрема сушіння полімерних елементів перед зварюванням. Використання промислових фенів або інших нагрівальних пристроїв може призводити до локального підвищення температури у робочій зоні, що створює ризик термічних опіків та перегріву оператора. Для запобігання таким небезпекам необхідно застосовувати теплоізоляційні рукавички, забезпечувати контроль температурних режимів та організувати вентиляцію приміщення для відведення надлишкового тепла.

Механічні ризики у даному технологічному процесі пов'язані насамперед із використанням ручного інструменту для видалення задирок або виконання контролю якості виробів. Ріжучі інструменти можуть спричинити травми у вигляді порізів, тому важливо забезпечити їх справність, правильне зберігання та використання відповідно до інструкцій. Працівники повинні проходити інструктаж з техніки безпеки та використовувати засоби індивідуального захисту, зокрема рукавички, що зменшують ризик травмування.

Значний вплив на безпеку праці має також психофізіологічний фактор, пов'язаний із монотонністю виконуваних операцій. Повторюваність дій, характерна для ручного ультразвукового зварювання, може призводити до зниження уваги та підвищення ймовірності помилок. Для мінімізації цього впливу доцільно впроваджувати раціональні режими праці та відпочинку,

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чергування операцій, а також використовувати елементи автоматизації, які зменшують навантаження на оператора.

Окрему увагу слід приділити питанням електробезпеки, оскільки ультразвукове обладнання працює від мережі змінного струму та містить високочастотні електронні компоненти. Необхідно забезпечити надійне заземлення обладнання, використання захисних автоматів та регулярний контроль технічного стану електричних елементів. Обслуговування та ремонт обладнання повинні виконуватися лише кваліфікованим персоналом з дотриманням вимог електробезпеки.

Пожежна безпека є ще одним важливим аспектом експлуатації ультразвукового зварювального обладнання. Хоча сам процес ультразвукового зварювання не передбачає відкритого полум'я, можливість займання полімерних матеріалів або ізоляції електричних проводів не виключається. Основними небезпечними факторами у разі пожежі є підвищена температура, теплове випромінювання, а також утворення токсичних продуктів горіння, які можуть становити серйозну загрозу для здоров'я людини. Для запобігання пожежам необхідно забезпечити належний технічний стан обладнання, уникати перевантажень електромережі, а також підтримувати чистоту робочого місця, не допускаючи накопичення горючих матеріалів.

На виробничій дільниці повинні бути передбачені первинні засоби пожежогасіння, зокрема порошкові вогнегасники, які ефективні для гасіння електрообладнання та горючих матеріалів. Крім того, необхідно впроваджувати системи пожежної сигналізації та оповіщення, що забезпечують своєчасне реагування на надзвичайні ситуації. Важливою складовою є навчання персоналу діям у разі пожежі, включаючи евакуацію та використання засобів пожежогасіння.

З точки зору екологічної безпеки ультразвукове зварювання полімерних матеріалів має суттєві переваги порівняно з традиційними методами з'єднання,

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

такими як клейові або термічні процеси. Відсутність використання додаткових матеріалів, зокрема клеїв і розчинників, значно знижує рівень викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище. Процес не супроводжується утворенням стічних вод або значних твердих відходів, що робить його екологічно доцільним для сучасного виробництва.

Водночас слід враховувати можливість утворення незначних кількостей полімерних відходів, які виникають у результаті браку або механічної обробки деталей. Такі відходи повинні збиратися та передаватися на вторинну переробку, що дозволяє зменшити навантаження на навколишнє середовище та підвищити ресурсоефективність виробництва. Використання полімерів, придатних до рециклінгу, є додатковим фактором екологічної безпеки.

Енергоспоживання ультразвукового обладнання також є важливим аспектом екологічності. У порівнянні з іншими методами зварювання, ультразвукове зварювання характеризується відносно низькими витратами енергії, оскільки нагрівання відбувається локально та протягом короткого часу. Це дозволяє зменшити загальні енергетичні витрати виробництва та знизити викиди парникових газів, пов'язані з генерацією електроенергії.

Таким чином, аналіз умов виконання ультразвукового зварювання вставки панелі приладів свідчить про необхідність комплексного підходу до забезпечення безпеки та екологічності технологічного процесу. Реалізація організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів дозволяє знизити рівень професійних ризиків, забезпечити комфортні умови праці та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище. У результаті впровадження запропонованих заходів досягається підвищення ефективності виробництва, покращення якості продукції та забезпечення відповідності сучасним вимогам охорони праці та екологічної безпеки.

Подальший розвиток підходів до забезпечення безпеки під час ультразвукового зварювання повинен базуватися на системному аналізі

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

небезпечних та шкідливих факторів із врахуванням їх комбінованої дії. В умовах реального виробництва одночасно діють кілька факторів різної природи, зокрема акустичні, теплові, механічні та психофізіологічні, що можуть взаємно підсилювати негативний вплив на організм людини. Тому ефективна система охорони праці повинна передбачати не лише окремі заходи захисту, а їх комплексну інтеграцію у технологічний процес.

Одним із ключових напрямів удосконалення безпеки є впровадження принципів ризик-орієнтованого управління. Це передбачає ідентифікацію потенційних небезпек, оцінку ймовірності їх виникнення та визначення ступеня тяжкості можливих наслідків. На основі такого аналізу формуються пріоритети впровадження заходів безпеки. Наприклад, при роботі з ультразвуковим обладнанням особливу увагу слід приділяти саме акустичним і вібраційним впливам, оскільки вони є специфічними для даної технології і часто недооцінюються у порівнянні з більш очевидними механічними ризиками.

Важливим аспектом є також контроль параметрів виробничого середовища. Для цього доцільно використовувати вимірювальні прилади, які дозволяють визначати рівень шуму, ультразвукового випромінювання, температури та освітленості. Регулярний моніторинг цих параметрів забезпечує своєчасне виявлення відхилень від нормативних значень та дає можливість оперативно вживати коригувальних заходів. У виробничих умовах доцільно впроваджувати систему періодичних перевірок та аудиту умов праці.

Окрему увагу слід приділити питанням вібраційної безпеки. Хоча ультразвукові коливання мають високу частоту, їх передача через корпус обладнання та інструмент може створювати локальні вібрації, що впливають на кисті рук оператора. Тривалий вплив таких вібрацій може призводити до розвитку професійних захворювань, зокрема вібраційної хвороби. Для зниження цього ризику рекомендується застосовувати антивібраційні

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рукавички, а також використовувати конструкції обладнання з демпфуючими елементами.

Значний потенціал для підвищення безпеки має автоматизація процесу ультразвукового зварювання. Перехід від ручних операцій до напівавтоматичних або автоматичних систем дозволяє зменшити контакт оператора з джерелами небезпеки. У таких системах оператор виконує переважно функції контролю та налаштування, що значно знижує рівень професійних ризиків. Проте навіть у цьому випадку необхідно забезпечити надійні системи захисту, зокрема блокування доступу до небезпечних зон під час роботи обладнання.

Не менш важливим є питання навчання персоналу. Працівники повинні не лише знати правила безпечної експлуатації обладнання, а й розуміти фізичну сутність процесів, що відбуваються під час ультразвукового зварювання. Це дозволяє більш усвідомлено підходити до виконання операцій та своєчасно виявляти потенційно небезпечні ситуації. Регулярне проведення інструктажів, тренінгів та перевірок знань є обов'язковою складовою системи охорони праці.

З точки зору екологічної безпеки важливим є аналіз життєвого циклу виробу. Використання полімерних матеріалів, таких як поліпропілен, має як переваги, так і певні екологічні обмеження. З одного боку, ці матеріали є легкими та енергоефективними у виробництві, що сприяє зменшенню витрат палива транспортних засобів. З іншого боку, їх утилізація потребує спеціальних технологій. Тому важливим є впровадження систем роздільного збору та переробки полімерних відходів.

Додатковим напрямом підвищення екологічності є оптимізація режимів зварювання з метою зменшення енергоспоживання. Раціональний вибір параметрів ультразвукового впливу дозволяє мінімізувати витрати енергії без погіршення якості з'єднання. Це досягається шляхом використання сучасних

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систем керування, які автоматично підлаштовують параметри процесу залежно від властивостей матеріалу та геометрії виробу.

Структура системи безпеки ультразвукового зварювання

[Джерело небезпеки] → [Передача впливу] → [Оператор] → [Засоби захисту] → [Зниження ризику]

Розшифрування блоків:

- Джерело небезпеки: ультразвуковий генератор, хвилевід, фен;
- Передача впливу: повітря, контакт через інструмент;
- Оператор: робоча зона;
- Засоби захисту: ЗІЗ, ізоляція, вентиляція;
- Результат: безпечні умови праці.

Класифікація небезпечних факторів

Схема ієрархічного типу:

Небезпечні фактори →

- Фізичні (ультразвук, температура, вібрація)
- Механічні (інструмент, рухомі частини)
- Психофізіологічні (монотонність, втома)
- Електричні (напруга, струм)

Опис схеми 3 – Екологічний баланс процесу

Вхідні потоки:

- електроенергія
- полімерні деталі

Процес:

- ультразвукове зварювання

Вихідні потоки:

- готовий виріб
- мінімальні відходи

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- відсутність шкідливих викидів

Комплексний аналіз показує, що ультразвукове зварювання є відносно безпечним та екологічно доцільним методом з'єднання полімерних матеріалів за умови дотримання відповідних вимог. Основними факторами ризику залишаються ультразвукове випромінювання, локальні теплові впливи та організаційні недоліки робочого процесу. Водночас застосування сучасних технічних засобів захисту, раціональна організація праці та впровадження систем управління ризиками дозволяють практично повністю мінімізувати негативний вплив на працівників.

З екологічної точки зору дана технологія відповідає сучасним тенденціям сталого розвитку, оскільки характеризується низьким рівнем викидів, відсутністю токсичних компонентів та високою енергоефективністю. Подальший розвиток технології пов'язаний із підвищенням рівня автоматизації, впровадженням інтелектуальних систем керування та розширенням використання вторинних матеріалів.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. У результаті аналізу встановлено, що ультразвукове зварювання є одним із найбільш ефективних методів з'єднання полімерних матеріалів, зокрема поліпропіленових композицій, завдяки високій швидкості процесу, відсутності додаткових матеріалів та можливості отримання міцних нероз'ємних з'єднань.
2. Виконано розрахунок параметрів ультразвукового зварювання та встановлено оптимальні режими процесу, які забезпечують формування якісного зварного з'єднання з мінімальними енергетичними витратами та стабільними механічними характеристиками.
3. Розроблено конструкцію ультразвукового обладнання, включаючи магнітострикційний перетворювач, хвилевід і ручний пристрій пістолетного типу, що забезпечує ефективну передачу енергії в зону зварювання та зручність експлуатації.
4. Запропоновано технологічний процес складання вставки панелі приладів, який включає етапи підготовки деталей, ультразвукового зварювання, контролю якості та пакування, а також визначено комплекс заходів з охорони праці та екологічної безпеки, що забезпечують безпечні умови роботи та мінімальний вплив на навколишнє середовище.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаної літератури та джерел

1. Юрженко М. В., Кораб М. Г. Зварювання високотехнологічних пластмас : монографія. Суми : Університетська книга, 2016. 316 с.
2. Зворикін К. О., Зворикін Л. О. Зварювання пластмас : навч. посіб. Київ : КММ, 2013. 184 с.
3. Шестопал А. М. Сварка и склеивание пластмасс : справочник. Киев : Техніка, 1990. 150 с.
4. Юрженко М. В. та ін. Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. (Чернігів, 2020). Чернігів : ЧНТУ, 2020. С. 45–48.
5. Технологія та устаткування переробки полімерів : навч. посіб. / С. М. Букевич та ін. Дніпро : УДХТУ, 2017. 212 с.
6. Актуальні задачі сучасних технологій : тези доп. XII Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів (Тернопіль, 2023). Тернопіль : ТНТУ, 2023. Т. 1. 188 с.
7. Troughton A. Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide. 2nd ed. William Andrew Applied Science Publishers, 2008. 600 p.
8. Wise R. J. Ultrasonic Welding of Glassy Thermoplastic Polymers. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. 152 p.
9. Levy S. Ultrasonic Welding of Plastics. New York : Springer, 2012. 168 p.
10. Shishkin A. et al. Trends and Future Projections in Ultrasonic Welding Research. *Polymers*. 2025. Vol. 17, No. 8. P. 1124.
11. Lionetto F., Maffezzoli A. Advances in Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 6. P. 1284.
12. Bates P. J. et al. Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites. *Advances in Joining and Welding Technologies*. ScienceDirect, 2015. P. 215–240.
13. Stokes V. K. Experiments on the ultrasonic welding of thermoplastics. *Polymer Engineering & Science*. 2004. Vol. 28, Iss. 15. P. 998–1008.
14. Wang X. et al. Interdependence of Technical and Technological Parameters in Ultrasonic Welding. *Machines*. 2022. Vol. 10. P. 445.

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк. 62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

15. Zheng J. et al. Ultrasonic Welding of Soft Polymer and Metal: A Preliminary Study. *ResearchGate*. 2019. URL: [назва посилання].

					КРБМТВА 26.23117.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		