

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»
УДК 621.519.

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

« ____ » _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

на тему: «Автоматизований контроль зварних з'єднань титанових листів»

Виконав (-ла):

студент (-ка) II курсу, групи ПМ-31мп

Чарнош Андрій Іванович _____

Науковий керівник:

д.т.н., професор

Куц Юрій Вікторович _____

Консультант з розробка стартап-проектів:

д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної

кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського

Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

доцент, к.т.н., доцент

Мокійчук Валентин Михайлович

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

Київ – 2024 року

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

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 174 “ Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”

Освітньо-професійна програма “Комп’ютерно інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис) Ю.В. Киричук
(ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2024 р.

Завдання

на магістерську дисертацію студенту

Чарношу Андрію Івановичу

1. Тема дисертації “Автоматизований контроль зварних з’єднань титанових листів”, керівник дисертації Куц Юрій Васильович, доктор технічних наук, професор затверджені наказом по університету від “07” травня 2024 р. №4987.
2. Термін подання студентом дисертації 1 грудня 2024 року
3. Об’єкт дослідження: Процес неруйнівного контролю зварного з’єднання титанових листів ультразвуковим магнітострикційним методом.
4. Вихідні дані до проекту: об’єкт контролю – зварювальне з’єднання титанових листів, товщина листів – 1мм, дефекти – поздовжні тріщини та не провари.
5. Зміст пояснювальної записки:

Вступ

1. Аналіз завдання проєкту
2. Розрахункова частина
3. Вибір та обґрунтування електричних схем системи
4. Отримання експериментальних даних
5. Моделювання процесу опрацювання сигналів магнітострикційних перетворювачів
6. Перелік графічного матеріалу (4 листа А1): схема електрична структурна, схема електрична принципальна блоку обробки сигналів, складальне креслення та деталювання одного елементу матричного вихрострумowego перетворювача, плакат.
7. Орієнтовний перелік публікацій
8. Консультант розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського Бояринова Катерина Олександрівна		

9. Дата видачі завдання 1 вересня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	02.09.2024	Виконано
2	Проведення аналітичного огляду	20.09.2024	Виконано
3	Опрацювання експериментальних даних	15.10.2024	Виконано
4	Оформлення пояснювальної записки	10.11.2024	Виконано
5	Розробка графічної частини проєкту	25.11.2024	Виконано

Студент _____

Андрій ЧАРНОШ

Керівник _____

Юрій КУЦ

Анотація

У дипломній роботі розглянуто задачу забезпечення якості зварних з'єднань титанових листів товщиною 1 міліметр за допомогою магніострикційного методу ультразвукового контролю. Актуальність дослідження обумовлена широким застосуванням титанових сплавів у високотехнологічних галузях, де висока міцність, корозійна стійкість та мала вага матеріалу є ключовими вимогами. Однак, зварні з'єднання таких листів вимагають особливого контролю через їх чутливість до дефектів, які можуть негативно вплинути на надійність конструкцій. Магніострикційний метод використано для генерації ультразвукових хвиль, здатних діагностувати внутрішні та поверхневі дефекти, такі як тріщини, пори та непровари, без пошкодження матеріалу. У роботі здійснено огляд принципів роботи магніострикційних перетворювачів, а також проведено експериментальні дослідження коефіцієнтів електроакустичного тракту, необхідних для обґрунтування вимог до засобів попереднього опрацювання сигналів магніострикційного перетворювача. Розроблено рекомендації для автоматизації методу, що дозволяють підвищити продуктивність виявлення дефектів у тонких титанових листах. Отримані результати підтверджують перспективність застосування магніострикційного методу для ультразвукового контролю зварних з'єднань у титанових конструкціях, а також надають основу для подальшого розвитку автоматизованих систем ультразвукового неруйнівного контролю в критичних галузях промисловості.

Ключові слова: магніострикційний перетворювач, магніострикційний дефектоскоп, неруйнівний контроль, зварні з'єднання.

Abstract

The thesis considers the problem of ensuring the quality of welded joints of titanium sheets with a thickness of 1 millimeter using the magnetostrictive ultrasonic testing method. The relevance of the study is due to the wide use of titanium alloys in high-tech industries, where high strength, corrosion resistance and low weight of the material are key requirements. However, welded joints of such sheets require special control due to their sensitivity to defects that can negatively affect the reliability of structures. The magnetostrictive method is used to generate ultrasonic waves capable of diagnosing internal and surface defects, such as cracks, pores and under-penetration, without damaging the material. The paper reviews the principles of operation of magnetostrictive transducers, and also conducts experimental studies of the coefficients of the electroacoustic path necessary to substantiate the requirements for the means of pre-processing of magnetostrictive transducer signals. Recommendations for automating the method have been developed to increase the performance of defect detection in thin titanium sheets. The results obtained confirm the prospects of using the magnetostrictive method for ultrasonic testing of welded joints in titanium structures, and also provide a basis for further development of automated ultrasonic non-destructive testing systems in critical industries.

Keywords: magnetostrictive transducer, magnetostrictive flaw detector, non-destructive testing, welded joints.

Зміст

Вступ.....	9
1. Аналіз завдання проекту	
1.1. Аналіз зварних з'єднань титанових листів як об'єкта УЗ контролю.....	10
1.2. Огляд методів ультразвукової дефектоскопії	16
1.3. Огляд магнітострикційного методу ультразвукового контролю та особливості його застосування для дефектоскопії зварних з'єднань	21
1.4. Приклад використання магнітострикційного методу в системі ультразвукового контролю.....	26
1.5. Постановка задачі дослідження	29
2. Аналіз формування сигналів магнітострикційних перетворювачів та визначення їх інформативних параметрів	
2.1. Фізичні основи явища магнітострикції.....	31
2.2. Аналіз магнітострикційних ефектів для використання в малоапертурних МСП.....	32
2.3. Розроблення малоапертурних МСП для автоматизованої ультразвукової системи контролю зварних швів.....	35
2.4. Аналіз електроакустичного тракту системи «МСП – ОК – МСП».....	38
2.5. Стенд для експериментальних досліджень коефіцієнту електроакустичного тракту.....	40
3. Розроблення автоматизованої магнітострикційної системи контролю зварних з'єднань титанових листів	
3.1. Обґрунтування та структурний розрахунок автоматизованої магнітострикційної системи контролю зварних з'єднань титанових листів	44
3.2. Конструкція магнітострикційного перетворювача.....	49

3.3. Вибір елементної бази для складання електричних принципових схем системи	54
3.4. Складання та розрахунок схеми електричної принципової підсилювача сигналів МСП	57
4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ	
4.1. Опис ідеї та технологічний аудит стартап-проєкту.....	60
4.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	67
4.3. Розроблення ринкової стратегії проєкту	77
4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	81
4.5. Організація реалізації стартап-проєкту	85
Висновки	89
Список використаної літератури	91

Вступ

Автоматизований контроль зварних з'єднань титанових листів є одним із ключових етапів забезпечення якості та надійності конструкцій у високотехнологічних галузях, таких як авіація, космічна промисловість, автомобілебудування та медичне обладнання. Титан завдяки своїм винятковим властивостям — високій міцності, корозійній стійкості та низькій питомій вазі — активно застосовується в цих сферах, проте його зварювання є технічно складним процесом, який вимагає ретельного контролю для запобігання утворенню дефектів. Особливо важливим є контроль зварних з'єднань титанових листів з товщиною 1 міліметр, оскільки тонкі матеріали підвищують ймовірність виникнення тріщин, пор та інших дефектів, що можуть негативно вплинути на експлуатаційні характеристики конструкції.

Магніострикційний метод ультразвукового контролю пропонує ефективне рішення для діагностики якості зварних з'єднань без необхідності руйнування зразків. Цей метод дозволяє точно виявляти внутрішні та поверхневі дефекти завдяки генеруванню та реєстрації ультразвукових хвиль за допомогою магніострикційних перетворювачів. При роботі з титановими листами товщиною 1 мм, магніострикційний метод забезпечує високу роздільну здатність, що є критично важливим для виявлення мікродефектів у зварних швах тонких матеріалів.

Таким чином, дослідження автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів товщиною 1 мм за допомогою магніострикційного методу є актуальним і спрямоване на підвищення якості контролю, що забезпечить надійність і безпеку сучасних інженерних конструкцій у критичних галузях промисловості.

1. АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ ПРОЄКТУ

1.1. Аналіз зварних з'єднань титанових листів як об'єкта УЗ контролю

Зварні з'єднання в конструкціях з титану мають значну важливість завдяки своїй ролі в забезпеченні міцності, надійності та тривалості служби виробів. Титан, як матеріал, відомий своєю високою механічною міцністю і корозійною стійкістю, що робить його ідеальним для використання в багатьох галузях, включаючи авіацію, автомобілебудування, медичну техніку та хімічну промисловість.

Зварювання є важливим технологічним процесом, який дає змогу об'єднувати титанові компоненти, створюючи при цьому формування складних і легких конструкцій. Можна зазначити, що майстерність виконання зварних з'єднань(рис.1.1.) істотно впливає на загальні властивості конструкцій. Високоякісні зварні шви здатні витримувати великі механічні навантаження, динамічні та статичні навантаження без ризику виникнення тріщин чи деформацій.

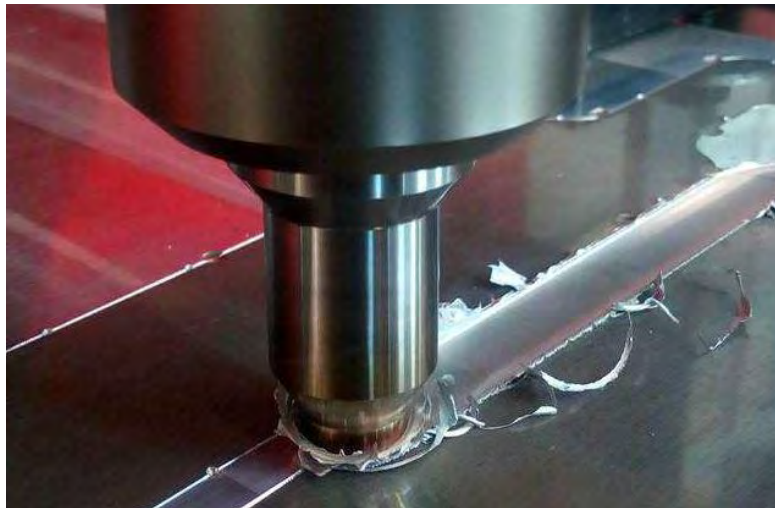


Рис.1.1.Процес зварювання титанового сплаву та контроль якості зварювання

Однією з основних переваг зварних з'єднань є корозійна стійкість титанових сплавів. Завдяки цій властивості, зварні шви, що виконані з цих матеріалів, здатні протистояти негативним впливам агресивних середовищ, що

робить їх незамінними для використання у хімічній промисловості та в умовах, де існує ризик корозії, наприклад, у морських конструкціях.

Крім того, зварні з'єднання дозволяють значно зменшити вагу конструкцій. Це є важливим чинником у таких галузях, як авіація та автомобілебудування, де легкість матеріалів безпосередньо впливає на економію пального та покращення ефективності використання відповідної техніки. До цього варто додати, що сучасні технології зварювання, такі як TIG (TungstenInertGas) і MIG (MetalInertGas), дозволяють досягати високої якості з'єднань, що, в свою чергу, знижує ймовірність виникнення дефектів у процесі експлуатації[1].

Завдяки тому, що зварні з'єднання забезпечують тривалість служби конструкцій, зменшується необхідність в частому ремонті або заміні елементів конструкцій, що позитивно позначається на витратах на їх обслуговування. Це також підвищує рівень безпеки, оскільки конструкції, виготовлені з титану, можуть експлуатуватися тривалий час без ризику аварійних ситуацій.

Зварні з'єднання демонструють значну адаптивність до різних умов експлуатації. Це дозволяє проєктувати конструкції, що відповідають специфічним вимогам і умовам роботи, з урахуванням всіх можливих факторів навколишнього середовища. У результаті, зварні з'єднання стають важливим елементом, що визначає їх конкурентоспроможність на ринку.

З урахуванням всіх цих аспектів, можна зробити висновок, що зварні з'єднання є критично важливими у проєктуванні та виготовленні виробів з титану, адже вони забезпечують баланс між надійністю, ефективністю та економічною вигодою, що відповідає сучасним вимогам промисловості.

Причини використання титанових сплавів: висока міцність, корозійна стійкість, легкість.

Титан та його сплави набули великого значення в багатьох галузях завдяки своїм унікальним властивостям. Однією з головних причин їх використання є висока міцність. Сплави титану характеризуються виключною здатністю витримувати великі механічні навантаження без деформацій і руйнувань.

Другою важливою характеристикою титану є його висока стійкість до корозії. Цей метал не піддається впливу багатьох агресивних середовищ, таких як морська вода, хімічні речовини та навіть деякі кислоти. Це робить титанові сплави дуже привабливими для використання в умовах, де корозійна стійкість є критично важливою.

Ще однією значною перевагою титану є його легкість. Він має значно меншу густину, ніж інші метали, наприклад сталь, що дозволяє створювати легкі конструкції без втрати міцності.

Крім того, титан та його сплави також відрізняються високою температурною стійкістю. Вони можуть працювати в умовах значних температурних перепадів і не втрачати своїх властей при високих температурах. Це робить їх ідеальними для використання в двигунах літаків, космічних апаратах та інших високотехнологічних пристроях, де від матеріалів потрібна стійкість до екстремальних температур.

Усі ці характеристики – висока міцність, корозійна стійкість, легкість і температурна стійкість – визначають титанові сплави як надзвичайно універсальні конструкційні матеріали.

Стислий огляд методів зварювання: TIG, MIG, лазерне зварювання.

Зварювання є одним із важливих процесів у багатьох галузях промисловості, і для кожного завдання можуть використовуватися різні методи, найпоширенішими з яких є TIG, MIG і лазерне зварювання. Кожен із цих методів має свої унікальні особливості, які обумовлюють їх ефективність у різних завданнях та умовах[2].

TIG-зварювання(рис.1.2.) (TungstenInertGas) є одним із найточніших і найбільш поширених методів зварювання. У процесі TIG-зварювання використовується металевий вольфрамовий електрод, який не плавиться під час роботи, а навколо зварювальної зони подається інертний газ, традиційно аргон, який захищає від окислення та інших негативних впливів атмосфери. Однією з переваг цього методу є можливість створювати дуже чисті й акуратні шви, важливі для деталей, які вимагають високої точності. TIG-зварювання

використовують для роботи з нержавіючою сталлю, алюмінієм, магнієм та іншими кольоровими металами. Воно часто використовується в авіаційній та автомобільній промисловості, а також у виробництві харчового обладнання, де потрібна висока якість швів.



Рис.1.2. Процес TIG-зварювання

MIG-зварювання(рис.1.3.) (MetalInertGas) є одним із найпопулярніших методів зварювання і використовується для різноманітних металів, включаючи сталь, алюміній та інші сплави. У процесі MIG-зварювання використовують плавкий електрод у вигляді дроту, який постійно подається під час зварювального процесу, а навколо зони зварювання також подається інертний газ для захисту від окислення. MIG-зварювання дає змогу працювати швидше, ніж TIG-метод, і підходить для масового виробництва завдяки високій ефективності та простоті виконання. Воно забезпечує хорошу якість шва і підходить як для товстих, так і для тонких матеріалів, але все-таки не дає змоги досягнути такої ж точності, як TIG. Цей метод традиційно використовується в будівництві, автомобільній промисловості та важкій індустрії.



Рис.1.3. Процес MIG-зварювання

Лазерне зварювання(рис.1.4.) є передовим методом, який використовує висококонцентрований пучок лазерного випромінювання для з'єднання металів. Під час цього процесу енергія лазера швидко розплавляє матеріал, що дозволяє створити надзвичайно точні та міцні шви. Лазерне зварювання має додаткові переваги в порівнянні з традиційними методами: воно забезпечує високу швидкість, мінімальне теплове викривлення металу і можливість працювати з дуже тонкими матеріалами. Цей метод часто використовується в таких високотехнологічних галузях, як авіація, космічна промисловість і медична техніка. Однак лазерне зварювання вимагає складного обладнання і досить дорогих установок, що обмежує його застосування в масовому виробництві через високу вартість[2].

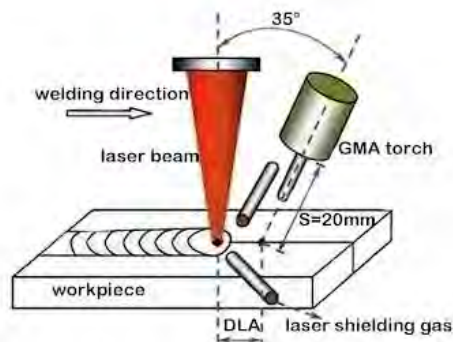


Рис.1.4. Процес лазерного зварювання

Кожен із перелічених вище методів зварювання має свої переваги та недоліки, які роблять його більш підходящим для певних завдань і галузей. TIG-зварювання підходить для робіт, де потрібна висока точність і якість, MIG-зварювання забезпечує ефективність і швидкість, тоді як лазерне зварювання дає можливість працювати з високою точністю і мінімальними еформаціями матеріалу.

Особливості зварних з'єднань титанових листів: технологічні характеристики.

Зварювання титанових листів має свої унікальні особливості, зумовлені властивостями самого металу. Титан характеризується високою міцністю, корозійною стійкістю та легкістю, але через його хімічну активність під час нагрівання мають місце певні технологічні виклики. Для того, щоб забезпечити

надійність зварних з'єднань, необхідно витримати кілька важливих технологічних характеристик і вимог.

Однією з головних особливостей зварювання титану є його висока здатність до окислення при підвищених температурах. Титан активно реагує з киснем, азотом і водою при температурах вище 400 °С. Якщо не захистити зону зварювання від впливу атмосферного повітря, шов стане крихким і вразливим до руйнування через проникнення цих хімічних елементів у зварний шов. Для запобігання такій реакції зварювання здійснюють в інертному середовищі.

Температура плавлення титану (приблизно 1660 °С) та його низька теплопровідність також мають велике значення для технології зварювання. Через низьку теплопровідність тепло повно розсіюється від зони зварювання, що може спричинити локальне перегрівання і призвести до дефектів, таких як пори чи мікротріщини. Тому при зварюванні титанових листів необхідно контролювати температурний режим і швидкість охолодження, щоб уникнути перегріву.

При зварюванні титанових листів важливо також використовувати правильні параметри процесу. Одним із популярних методів для цієї мети є TIG-зварювання (вольфрамовий електрод в інертному середовищі), що дає змогу забезпечити високу якість шва і контроль над процесом зварювання. MIG-зварювання також може застосовуватися для з'єднання титанових листів, але для цього потрібні спеціальні підходи та ретельне налаштування обладнання[3].

Особливу увагу слід приділити вибору зварювальних присадок. Присадкові матеріали для титану повинні відповідати хімічному складу основного металу, щоб уникнути утворення у шві твердих і крихких фаз. Неправильний вибір присадок може призвести до зниження пластичності та тріщиностійкості зварного з'єднання.

Ще одним важливим аспектом є техніка охолодження після зварювання. Через високу ступінь реактивності титану, особливо в нагрітому стані, зварений шов та його окіл повинні бути захищені інертним газом до повного

охолодження, щоб уникнути окислення. Крім того, іноді використовується додатковий захист задньої сторони зварного шва, що забезпечує повне виключення контакту з повітрям.

У підсумку, зварні з'єднання титанових листів вимагають дотримання суворих технологічних вимог, пов'язаних з його хімічною активністю, низькою теплопровідністю та вимогами до чистоти. Тож контроль температурних режимів, належний захист зони зварювання інертним газом і ретельна підготовка поверхонь є ключовими факторами для отримання якісних і надійних з'єднань.

1.2.Огляд методів ультразвукової дефектоскопії

Основи ультразвукової технології: принцип роботи, типи хвиль.

Ультразвукова технологія(рис.1.5.) є складною та багатогранною сферою, що охоплює низку різних методів і застосування в науці, медицині та промисловості. Використовуються ультразвукові хвилі і в неруйнівному контролі. На рис. 1.5 наведено приклад приладу ультразвукового контролю та тестового зразка для його налаштування.



Рис.1.5. Прилад і тестовий зразок для ультразвукового неруйнівного контролю

В приладах ультразвукового контролю використовується властивість пружних коливань поширюватись прямолінійно і рівномірно у однорідних середовищах і відбиватись від ділянок матеріалу, які мають відмінні акустичні

властивості. Пружні хвилі взаємодіють із матеріалами, через які проходять, дозволяють не тільки досліджувати внутрішню структуру матеріалу, але й або використовувати їх для різних процесів, таких як діагностика, обробка або навіть очищення.

Принцип роботи ультразвукових систем полягає у генерації ультразвукових хвиль за допомогою перетворювачів, які трансформують електричну енергію в механічну енергію коливань і аналізі пружних коливань, які пройшли через ОК. Коли хвилі стикаються з межами між акустично різними матеріалами або структурами, вони частково відбиваються назад до приймача. Датчик уловлює відбиті хвилі, перетворюючи їх назад в електричний сигнал, який аналізується для отримання інформації про властивості або структуру досліджуваного об'єкта. Важливо зазначити, що інтенсивність і час поширення ультразвукових хвиль залежить від матеріалу, через який вони проходять, що дозволяє робити висновки про його густину, еластичність та іншу владу[4].

Серед типів хвиль, які застосовуються в ультразвукових дослідженнях, найбільш розширеними є поздовжні (компресійні) і поперечні (зсувні) хвилі. Поздовжні хвилі є найпростішими для розуміння та застосовуються в медицині та промисловості. У цих хвилях частини матеріалу коливаються в напрямку поширення хвилі, створюючи відвідування зони стиснення і розрідження. Це дозволяє їм ефективно проникати в рідини та тверді тіла, виробляючи поздовжні хвилі дуже універсальними для різних продуктів. Вони використовуються, наприклад, у медичних ультразвукових сканерах для отримання зображення внутрішніх органів людини, а також у неруйнівному контрольному матеріалі для виявлення внутрішніх дефектів.

Іншою важливою галуззю застосування ультразвуку є очищення виробів. Ультразвукові ванни існують для очищення деталей, інструментів і обладнання. Вони працюють за рахунок кавітації – процесу, під час якого ультразвукові хвилі створюють мікроскопічні бульбашки в рідині, що вибухають, вивільняючи енергію, яка очищає поверхню від забруднення. Це дозволяє

видаляти найменші частинки бруду або мастила, що особливо важливо для медичних або високоточних інструментів.

Таким чином, ультразвукова технологія є потужним інструментом у багатьох галузях. Завдяки здатності досліджувати матеріали на мікрорівні, високій надійності діагностування та очищення, можливості досліджувати ОК без порушень їх якості ультразвук відіграє важливу роль у сучасному технологічному світі. Область його застосування постійно розширюється за рахунок розвитку нових технологій та обладнання, що робить ультразвук незамінним у багатьох сферах науки, промисловості та медицини[5].

Переваги та недоліки УЗК в порівнянні з іншими методами контролю.

Ультразвуковий контроль (УЗК) є одним із найбільш ефективних методів неруйнівного контролю, що дозволяє досліджувати внутрішні структури матеріалів без їх пошкодження. Проте поряд із УЗК широко застосовуються й інші методи, зокрема рентгенографія та електромагнітний контроль. Кожен із цих методів має свої переваги та обмеження, а доцільність їх застосування залежить від поставленої задачі та використання конкретних умов.

Однією з переваг ультразвукового контролю є його висока чутливість до виявлення внутрішніх дефектів у різномірних матеріалах. УЗК може виявляти тріщини, пори, включення та інші дефекти на значній глибині, що робить його універсальним для роботи з матеріалів, таких як метали, пластики або композити. Крім того, УЗК дозволяє точно оцінювати товщину матеріалу у виробі і може використовуватися для перевірки якості зварних швів, що особливо важливо в промисловості та будівництві. Ультразвуковий контроль відзначається безпечністю, цим він суттєво виграє порівняно з рентгенографією. Це дозволяє проводити контроль без необхідності спеціальних заходів безпеки для персоналу, що є вагомою перевагою в умовах частого використання на виробництві.

Мобільність та відносна простота обладнання також є перевагами ультразвукового методу. УЗК-обладнання фактично портативне і може використовуватися на місці проведення робіт, що є зручним для польових

досліджень або перевірки великих конструкцій, таких як мости, кораблі або трубопроводи. Крім того, ультразвукові системи легко інтегруються в автоматизовані виробничі лінії для контролю якості в режимі реального часу, що підвищує ефективність процесів.

Магнітний контроль, на відміну від ультразвуку та рентгенографії, використовується тільки для феромагнітних матеріалів, таких як сталь або чавун. Він є простим у виконанні і достатньо ефективним для виявлення поверхневих та підповерхневих дефектів, таких як тріщини або пори, особливо у зварних швах або деталях складної форми. Однією з цих головних переваг методу є його висока швидкість і відносно дешевизна. Він також не потребує складного обладнання, що дозволяє швидко виконувати контроль великих площ поверхонь[6].

Однак магнітний контроль має обмежене застосування, внаслідок чого він не може використовуватися для дослідження немагнітних матеріалів, таких як алюміній, мідь, титан та інші метали, які широко застосовуються в промисловості. Крім того, його чутливість до дефектів фактично нижча, ніж в УЗК або рентгенографії, що обмежує можливості виявлення дрібних або глибоко розташованих дефектів. Тому магнітний контроль використовується як додатковий або попередній метод контролю перед більш детальними дослідженнями.

Загалом кожен із цих методів має свої чітко виражені переваги та недоліки, і їх вибір залежить від конкретного завдання. УЗК є найбільш універсальним і безпечним, особливо для роботи з товстими матеріалами або конструкціями, до яких є складний доступ. Рентгенографія забезпечує високу точність і деталізацію внутрішніх структур, але її застосування обмежує високу вартість та небезпеку для здоров'я.

Чистка та підготовка поверхні зварного з'єднання до УЗК.

Чистка та підготовка поверхні зварного з'єднання є важливим етапом УЗК, який реалізується за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів. Належна підготовка поверхні дає змогу надійно виявляти такі дефекти, як пори, тріщини

та включення шлаку. Правильна чистка забезпечує надійний контакт між зварюваними деталями, що сприяє кращому злиттю металів і забезпечує необхідну міцність шва.

Основним завданням підготовки поверхонь є видалення всіх видів забруднень, таких як оксидні плівки, іржа, мастила, фарба, пил та інші сторонні частинки, які можуть негативно вплинути на процес зварювання. Наявність таких забруднень може спричинити утворення пористості, що призводить до зниження якості з'єднання, через включення повітря або сторонніх частинок[6].

Першим етапом підготовки є механічне очищення. Це може бути шліфування, полірування, обробка наждачним папером або металевою щіткою для видалення бруду, корозії, оксидів або старих покриттів. Особливо важливо остаточно очистити крайові частини деталей, що зварюються, тому що саме там буде утворюватися зварний шов. При роботі з корозійними матеріалами, такими як нержавіюча сталь або титан, особливу увагу слід приділяти видаленню оксидних плівок, після чого вони можуть значно погіршити якість шва.

Перед зварюванням слід забезпечити правильну підгонку зварюваних деталей. Неправильне вирівнювання або зазори між елементами можуть призвести до нерівномірного нагріву і, як наслідок, до виникнення дефектів у шві. Використання фіксуючих пристроїв або затискачів дозволяє точно позиціонувати деталі і забезпечити рівномірний контакт на всій довжині з'єднання.

Після завершення процесу зварювання також необхідно провести додаткову очистку, щоб видалити залишки шлаку або оксидів, які могли утворитися під час зварювання. Це особливо важливо для процесів зварювання із застосуванням присадкового матеріалу або флюсів, які можуть залишитись на поверхні шва.

Таким чином, підготовка поверхні зварного з'єднання є комплексним процесом, що включає механічну і хімічну обробку, правильну підгонку деталей і контроль чистоти поверхні до та після зварювання. Дотримання цих

вимог повинно забезпечити високу якість і довговічність зварних швів, знизити ризик виникнення дефектів і підвищити загальну надійність конструкції.

Порівняно з п'єзоелектричними перетворювачами МСП мають малу апертуру, що дає змогу вводити ультразвукові хвилі в ОК і приймати їх з непідготовленої поверхні та без застосування імерсійних рідин. Ця властивість дає підстави розглядати ультразвукову магнітострикційну дефектоскопію як перспективний напрям розвитку систем контролю зварних з'єднань[7].

1.3. Огляд магнітострикційного методу ультразвукового контролю та особливості його застосування для дефектоскопії зварних з'єднань

Загальні положення магнітострикційного методу.

Магнітострикція – це фізичне явище, при якому відбувається зміна форми або розмірів феромагнітного матеріалу під впливом зовнішнього магнітного поля. Це явище виникає внаслідок взаємодії між магнітними моментами атомів або доменів в матеріалі та зовнішнім магнітним полем. Іншими словами, коли феромагнітний матеріал намагнічується, його атоми змінюють своє просторове розташування, що призводить до деформації структури матеріалу. Магнітострикційний ефект має зворотний характер – при знятті магнітного поля матеріал повертається до свого початкового стану.

Принцип дії магнітострикційних ефектів заснований на взаємодії між магнітними моментами і кристалічною ґраткою феромагнітних матеріалів. У феромагнетиках існують магнітні домени – області, в межах яких магнітні моменти атомів орієнтовані в одному напрямку. Коли на матеріал діє зовнішнє магнітне поле, магнітні моменти атомів намагаються зорієнтуватись паралельно до зовнішнього поля. Цей процес супроводжується зміною положення атомів відносно один одного, що й викликає макроскопічну деформацію матеріалу. Ступінь цієї деформації залежить від сили магнітного поля і магнітних властивостей конкретного матеріалу.

Існують два основні типи магнітострикції: позитивна і негативна. У випадку позитивної магнітострикції матеріал видовжується в напрямку магнітного поля і стискається в перпендикулярному напрямку. При негативній магнітострикції, навпаки, матеріал стискається вздовж поля і розширюється перпендикулярно останньому. Цей ефект є надзвичайно важливим для використання в ультразвукових приладах, оскільки він дозволяє перетворювати електричну енергію на механічні хвилі – саме на цьому заснований магнітострикційний метод генерування ультразвукових коливань.

Магнітострикційні матеріали використовуються для створення МСП, що здатні генерувати високочастотні механічні хвилі при впливі змінного магнітного поля. Коли змінне магнітне поле прикладається до магнітострикційного матеріалу, він починає деформуватися зі змінною частотою, створюючи ультразвукові хвилі. Ці хвилі можуть поширюватися через матеріал і відбиватися від дефектів або меж з'єднань, що дозволяє виявляти дефекти в різних конструкціях[8].

Таким чином, магнітострикція є важливим явищем для використання в ультразвуковій дефектоскопії. Завдяки здатності перетворювати електромагнітну енергію в механічні коливання і навпаки, магнітострикційні ефекти стали основою для створення перетворювачів, які дозволяють здійснювати надійний неруйнівний контроль матеріалів, включаючи контроль зварних з'єднань та інших важливих елементів конструкцій.

Історія розробки методу: короткий огляд розвитку магнітострикційного методу у сфері дефектоскопії.

Магнітострикційний метод УЗК має глибоке коріння у фізичних дослідженнях магнітних властивостей матеріалів, яке почалося ще в середині 19-го століття. Перші спостереження за магнітострикційним ефектом були зроблені в 1842 році британським вченим Джеймсом Джоулем, який помітив, що зразки феромагнітних матеріалів змінюють свою форму під впливом магнітного поля. Це відкриття стало основою для майбутніх досліджень магнітної взаємодії з механічними властивостями матеріалів.

Перші практичні спроби застосування магнітострикційного ефекту для генерації механічних коливань з'явилися наприкінці 19-го та на початку 20-го століття. На той час вчені ще не повністю розуміли природу магнітострикції, але почали використовувати її для експериментів із перетворенням електричної енергії на механічні рухи. У 1917 році французький фізик Поль Ланжевен, один із засновників ультразвукової технології, зробив важливий прорив у створенні ультразвукових генераторів. Хоча він використовував інший ефект (п'єзоелектричний), його робота стала фундаментом для розвитку ультразвукової техніки загалом[20].

У середині 20-го століття інтерес до магнітострикційного методу зріс завдяки потребам промисловості в неруйнівному контролі матеріалів. Після Другої світової війни індустріалізація, зростання виробництва сталі, а також розвиток транспорту і енергетики вимагали більш точних і надійних методів виявлення дефектів у матеріалах. Магнітострикційний метод почав активно використовуватись у дефектоскопії завдяки своїм унікальним властивостям – можливості генерувати та приймати ультразвукові коливання за сухого контакту МСП з ОК.

Перші промислові застосування магнітострикційного методу стали можливими завдяки розробці спеціальних магнітострикційних матеріалів, таких як нікелеві та кобальтові сплави, які мають високі магнітострикційні властивості. Це дозволило створювати ефективні ультразвукові перетворювачі для неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій. Однією з перших областей застосування цього методу став контроль якості металевих виробів у металургії та важкому машинобудуванні.

У 1960-х і 1970-х роках розвиток магнітострикційного методу пришвидшився завдяки технічним досягненням в електроніці та матеріалознавстві. Було розроблено більш чутливі та надійні магнітострикційні перетворювачі, що дозволило підвищити точність і діапазон контролю. Метод почав активно використовуватися для контролю зварних з'єднань, зокрема в нафтовій, газовій, авіаційній та суднобудівній галузях. Окрім того,

магніострикційні датчики стали широко застосовуватись для моніторингу стану трубопроводів та інших важливих інфраструктурних об'єктів.

У 1980-х роках з'явилися нові матеріали з підвищеними магніострикційними властивостями, такі як рідкоземельні сплави, які дозволили розширити можливості магніострикційного методу. Ці матеріали значно покращили чутливість і ефективність ультразвукових перетворювачів, даючи змогу використовувати їх для складних завдань у дефектоскопії, таких як контроль товстостінних конструкцій та виявлення дефектів, які розташовані на значній глибині від поверхні ОК.

На рубежі 20-го і 21-го століть розвиток комп'ютерних технологій і програмного забезпечення додатково підштовхнув до удосконалення магніострикційного методу. Інтеграція комп'ютерних систем з ультразвуковими приладами дозволила автоматизувати процес контролю, покращити аналіз отриманих даних і підвищити точність виявлення дефектів. Водночас з'явилися нові технології обробки сигналів, які зробили можливим виявлення ще менших дефектів у складних конструкціях[9].

Сьогодні магніострикційний метод є одним із основних інструментів для ультразвукового неруйнівного контролю матеріалів у багатьох галузях, від енергетики та транспорту до будівництва і медицини. Його популярність пояснюється здатністю забезпечувати високу вірогідність та надійність контролю навіть у складних умовах. Постійні дослідження та інновації в області матеріалознавства та електроніки дозволяють розширювати застосування цього методу, роблячи його все більш ефективним і доступним для різних галузей промисловості.

Значення ультразвукового магніострикційного методу в сучасній дефектоскопії: актуальність використання в різних галузях, таких як промисловість, енергетика, транспорт.

В промисловості магніострикційний метод(рис.1.6.) є особливо актуальним для контролю якості матеріалів і зварних з'єднань. Він дозволяє виявляти приховані дефекти, такі як тріщини, пори та включення, що можуть

стати причиною поломок або аварій. У важкому машинобудуванні та металургії, де використовуються великі конструкції з металу, цей метод є незамінним для забезпечення надійності продукції, особливо там, де потрібно проводити контроль без прямого доступу до об'єкту, у складних і важкодоступних місцях.



Рис.1.6. Використання магніострикційного методу ультразвукової дефектоскопії в промисловому середовищі

В енергетичній галузі, зокрема в атомній та тепловій енергетиці, магніострикційний метод широко застосовується для контролю стану трубопроводів, резервуарів, котлів та інших важливих об'єктів. У випадках, коли навіть невеликий дефект може призвести до серйозних наслідків, ультразвуковий контроль дозволяє своєчасно виявити проблеми та запобігти катастрофам. Крім того, магніострикційний метод забезпечує можливість контролю при високих температурах та в агресивних середовищах, що робить його незамінним для енергетичних установок.

У транспорті, зокрема в авіаційній, автомобільній та залізничній галузях, магніострикційний метод використовується для виявлення дефектів у критичних конструкційних елементах, таких як шасі, кузови, крила літаків, рейки тощо. Завдяки здатності контролювати матеріали без їх руйнування або пошкодження, метод є важливим для проведення регулярного технічного

обслуговування і профілактичних перевірок, що забезпечує безпеку експлуатації транспортних засобів та інфраструктури.

Окрім цього, магніострикційний метод знаходить застосування в суднобудуванні, де необхідно регулярно перевіряти стан корпусів кораблів та інших важливих об'єктів, особливо у водному середовищі. Його використання допомагає запобігти корозії, виявити механічні пошкодження або інші потенційні загрози для безпеки судна.

Актуальність цього методу обумовлена також його безконтактною природою, що дозволяє знижувати витрати на проведення контролю і збільшувати продуктивність. Сучасні магніострикційні системи оснащені високоточними перетворювачами та автоматизованими системами обробки даних, що дозволяє проводити контроль в реальному часі, зберігати та аналізувати отриману інформацію, а також інтегрувати результати в загальні системи моніторингу стану обладнання[10].

Таким чином, магніострикційний метод ультразвукового контролю є надзвичайно важливим у багатьох галузях сучасної економіки. Він забезпечує високу точність і ефективність у виявленні дефектів, що дозволяє знижувати ризики аварій, підвищувати безпеку та продовжувати термін служби різних конструкцій і обладнання.

1.4. Приклад використання магніострикційного методу в системі ультразвукового контролю

Характерний приклад системи ультразвукового магніострикційного контролю об'єктів циліндричної форми наведено на рис. 1.7. Основними елементами системи є МСП, генератори, підсилювачі, комп'ютерні системи з оригінальним програмним забезпеченням та інше обладнання, яке використовується для створення та реєстрації ультразвукових хвиль. Розглянемо кожен з цих елементів детальніше.

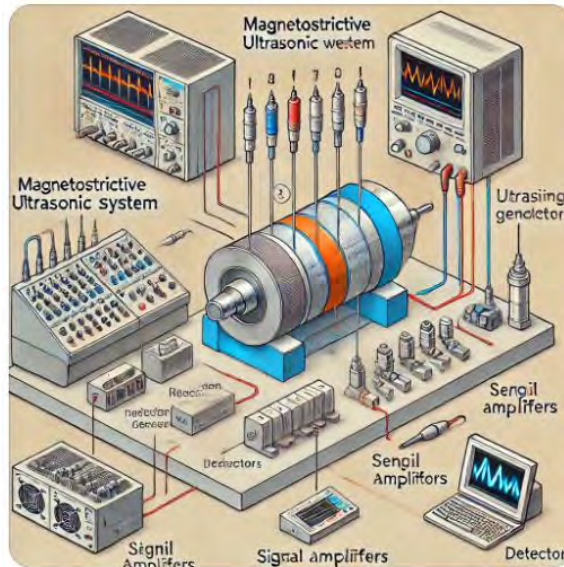


Рис.1.7. Структура магніострикційної системи ультразвукового контролю

1. Магніострикційні перетворювачі. Це ключовий компонент магніострикційного методу. Перетворювачі виконують функцію перетворення електричної енергії в механічні коливання (ультразвукові хвилі) та навпаки. В основі їх роботи лежить магніострикційний ефект, коли феромагнітний матеріал (наприклад, нікель або кобальт) під впливом змінного магнітного поля деформується і генерує ультразвукові хвилі. У зворотному процесі ці хвилі, відбиті від дефектів або меж матеріалу, спричиняють деформацію перетворювача, що перетворюється в електричні сигнали для наступного аналізу.

2. Генератори ультразвукових хвиль. Для створення змінного магнітного поля, необхідного для роботи МСП, використовують спеціальні генератори. Вони генерують високочастотні електричні сигнали у вигляді радіоімпульсів, які подаються на котушки МСП, створюючи змінне магнітне поле, що викликає магніострикційний ефект. Генератори можуть мати функцію налаштування частоти та зміни інтенсивності, що дозволяє адаптувати параметри ультразвукових хвиль для різних типів досліджень.

3. Датчики. Для реєстрації ультразвукових хвиль, відбитих від дефектів у матеріалі, використовуються спеціальні приймальні датчики. Вони фіксують механічні коливання, які повертаються до поверхні матеріалу, та перетворюють

їх в електричні сигнали. Приймальні датчики можуть бути інтегровані в сам перетворювач або працювати окремо, залежно від типу системи.

4. Підсилювачі сигналів. Оскільки ультразвукові сигнали можуть бути слабкими, особливо коли вони відбиваються від невеликих дефектів або проходять через товсті шари матеріалу, підсилювачі використовуються для збільшення амплітуди сигналу. Це дозволяє визначати параметри сигналів з високою точністю.

5. Осцилографи та аналізатори сигналів. Після того як ультразвукові хвилі перетворюються в електричні сигнали, останні мають бути візуалізовані та проаналізовані. Для цього використовуються осцилографи, які дозволяють відображати форму хвиль, і аналізатори сигналів, що виконують обробку та інтерпретацію отриманих даних. Це обладнання дає змогу виявляти навіть невеликі зміни у сигналах, які можуть свідчити про наявність дефектів[11].

6. Контролери та комп'ютерні системи. Сучасні магнітострикційні системи містять елементи автоматизації, що вимагає використання контролерів для керування роботою всієї системи. Контролери дають змогу регулювати параметри ультразвукових хвиль, реєструвати результати у режимі реального часу та зберігати їх для подальшого аналізу. Програмне забезпечення, яке працює з цими системами, часто оснащено функціями автоматичного виявлення дефектів, що значно спрощує процес контролю.

7. Допоміжне обладнання. Для магнітострикційного методу також використовуються різні аксесуари та допоміжні елементи, як-от кабелі, з'єднувальні пристрої, магнітні екрануючі матеріали, а також охолоджувальні системи для запобігання перегріву перетворювачів під час тривалих вимірювань.

Ці елементи разом утворюють комплексну систему, яка дає змогу не лише генерувати та реєструвати ультразвукові хвилі, але й аналізувати результати та формувати звіти щодо виявлених дефектів. Від їхньої надійності та чутливості залежить надійність і якість контролю, що робить магнітострикційний метод важливим інструментом сучасної дефектоскопії.

1.5. Постановка задачі дослідження

Зварні з'єднання титанових листів товщиною 1 мм вимагають особливої уваги до контролю якості через їх малу товщину та унікальні фізичні характеристики, такі як висока міцність, корозійна і термічна стійкість. Мала товщина матеріалу ускладнює виявлення дефектів, таких як тріщини, пори та включення, які можуть суттєво знизити експлуатаційні характеристики конструкцій. Попередній аналіз дав змогу зробити висновок, що магнітострикційного методу ультразвукового контролю має значний потенціал для створення автоматизованих систем дефектоскопії зварних з'єднань титанових листів[21].

Магнітострикційний метод ультразвукового контролю(рис.1.8.) пропонує нові можливості для ефективної діагностики зварних швів титанових конструкцій. Цей метод забезпечує високу чутливість і точність виявлення дефектів, завдяки здатності виявляти зміни в магнітних характеристиках матеріалу при наявності тріщин або включень.

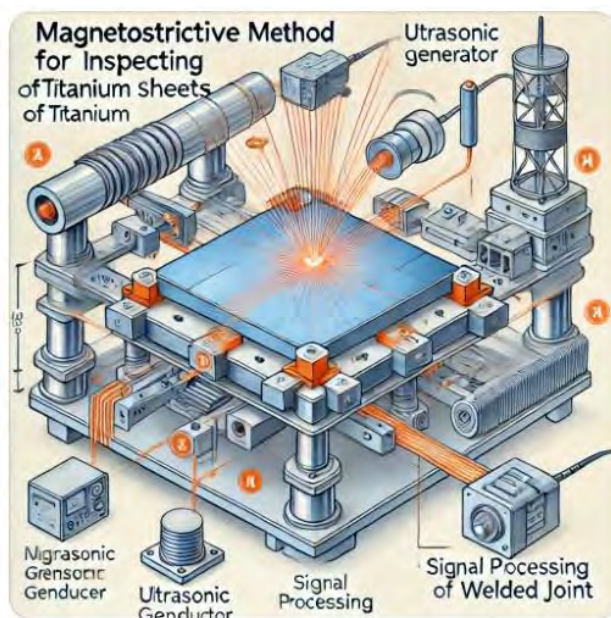


Рис.1.8. Ілюстрація використання магнітострикційного методу контролю в технологічному процесі зварювання

Проте магніострикційний метод ультразвукового контролю разом з унікальними перевагами має ряд особливостей, які необхідно враховувати при його технічній реалізації [22, 23]. По-перше, МСП внаслідок їх малої апертури, випромінюють одночасно різні типи ультразвукових хвиль, що ускладнює розшифровку сигналів перетворювачів і виявлення їх інформативних параметрів. По-друге, МСП-випромінювачі за їх малої апертури розглядаються як точкові джерела ультразвуку. У зв'язку з цим прийняті МСП-приймачами сигнали мають низьку інтенсивність, що вимагає проведення аналізу сигналів за низького відношення сигнал/шум [12]. У подальшому дослідженні необхідно:

- більш глибоко розглянути фізичні принципи ультразвукового магніострикційного методу контролю;
- розглянути особливості інтеграції цього методу дефектоскопії в автоматизованих системах контролю в технологічному процесі зварювання титанових листів;
- дослідити особливості електроакустичного тракту системи « МСП – зварне з'єднання–МСП»;
- розробити структуру автоматизованої системи ультразвукового контролю зварних з'єднань титанових листів на основі магніострикційного методу;
- виконати структурний розрахунок системи ультразвукового контролю зварних з'єднань титанових листів;
- розробити алгоритм опрацювання сигналів МСП за низького відношення сигнал/шум.
- розробити рекомендації щодо вдосконалення розробленої системи контролю зварних з'єднань титанових листів.

Розроблювана автоматизована система ультразвукового магніострикційного контролю зварних з'єднань титанових листів повинна включати засоби генерації та аналізу сигналів МСП, які уявляють собою короткі радіоімпульси, програмне забезпечення для обробки отриманих даних та сканер, який забезпечить переміщення МСП вздовж контрольованого зварювального шва [24, 25].

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ МАГНІТОСТРИКЦІЙНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ

2.1. Фізичні основи явища магнітострикції

Магнітострикція – це фізичне явище, при якому феромагнітний матеріал змінює свої розміри та форму під дією зовнішнього магнітного поля. Ця зміна відбувається внаслідок переорієнтації магнітних моментів атомів або доменів матеріалу, що впливають на його кристалічну структуру (рис. 2.1).

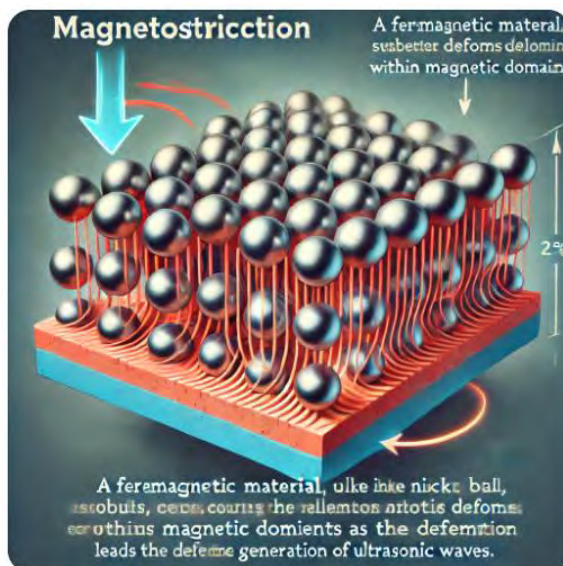


Рис. 2.1. Ілюстрація фізичного явища магнітострикції: зміна форми матеріалу під впливом магнітного поля

Коли феромагнітний матеріал, наприклад нікель або кобальт, піддається впливу магнітного поля, магнітні моменти атомів намагаються орієнтуватись за напрямком цього поля. Згідно із сучасною теорією магнетизму у феромагнетиках є магнітні домени – маленькі області, в межах яких магнітні моменти атомів орієнтовані в одному напрямку. Під впливом зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів перебудовуються, орієнтуючись у напрямку поля. Цей процес викликає зміну міжатомних відстаней і, відповідно, викривлення кристалічної решітки матеріалу. В результаті виникає механічна

деформація – матеріал стискається або розтягується. Ця деформація є причиною виникнення ультразвукових коливань. Якщо магнітне поле змінюється (наприклад, через накладання змінного електричного струму), то магніострикційний матеріал починає коливатися з частотою цього змінного поля. Таким чином, магніострикція перетворює змінне магнітне поле в механічні коливання, що можуть поширюватися як ультразвукові хвилі [26, 27].

Згенеровані у такий спосіб ультразвукові коливання можна використовувати для неруйнівного контролю матеріалів. Коли ультразвукові хвилі поширюються через матеріал, вони можуть відбиватися від дефектів або неоднорідностей, таких як тріщини чи пори [28]. Магніострикційний метод дає змогу отримувати відбиті від неоднорідностей хвилі, або фіксувати зміни коефіцієнту акустичного тракту і, таким чином, виявляти дефекти всередині матеріалу.

Отже, ключовим аспектом магніострикції є те, що взаємодія магнітного поля з феромагнітними матеріалами може викликати механічні деформації, які перетворюються на ультразвукові коливання, що використовуються для діагностики стану матеріалів [13].

2.2. Аналіз магніострикційних ефектів для використання в малоапертурних МСП

Ефект лінійної магніострикції було відкрито в 1842 році відомим англійським фізиком Д. П. Джоулем []. Він полягає у тому, що тіло з феромагнітного матеріалу у поздовжньому магнітному полі змінює свої розміри. Магніострикція спостерігається у феромагнетиках лише за температури нижче точки Кюрі і пояснюється дією механічних і магнітних сил зв'язку. Суть ефекту Джоуля ілюструє рис. 2.2. Якщо через котушку збудження, намотану на магніострикційний стержень довжиною l , пропустити електричний струм, то виникне магнітне поле, під впливом якого стержень змінить свою довжину на величину Δl .

Однією з основних характеристик магнітострикційного матеріалу є відносна магнітострикція λ , яка визначається за формулою

$$\lambda(B) = \frac{\Delta l(B)}{l}, \quad (2.1)$$

де B – магнітна індукція в осерді.

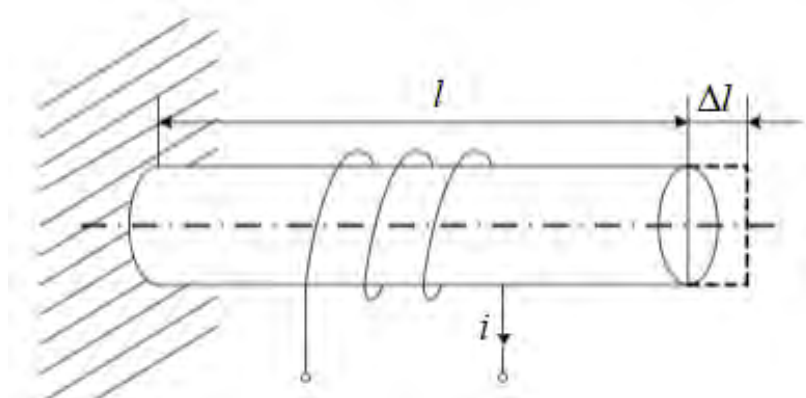


Рис. 2.2. Ілюстрація дії ефекту Джоуля

Ця характеристика є залежною від магнітного поля: у слабких полях магнітострикція незначна, а зі збільшенням поля зростає і досягає значення насичення λ_s .

Для опису ефекту Джоуля використовують формулу

$$\frac{\Delta l(t)}{l} = m \cdot \Delta U^*(t), \quad (2.2)$$

де m – коефіцієнт електромеханічного зв'язку, а $\Delta U(t)$ – відносна зміна електричної напруги на котушці.

Магнітний стан феромагнетика визначається не лише магнітним полем, а й зовнішніми пружними напруженнями. Магнітопружний ефект, який називають зворотним магнітострикційним ефектом, показує взаємозв'язок між механічними напруженнями та зміною намагніченості матеріалу стержня. Зворотним ефектом для лінійної магнітострикції є магнітопружний ефект Віллари (рис. 2.3) [29, 30].

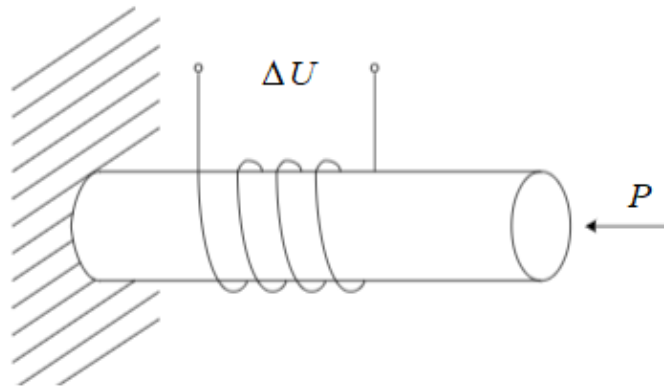


Рис. 2.3. Ілюстрація дії ефекту Віллари

Цей ефект полягає у зміні намагніченості феромагнетиката виникненні напруги ΔU на котушці перетворювача у відповідь на зовнішні розтягуючі або стискаючі сили P .

Окрім наведених вище ефектів – Джоуля і Віллари, існують й інші магнітострикційні ефекти, що відрізняються способом створення магнітного поля і характером механічної деформації [31]. Зокрема, варто згадати кутову магнітострикцію, також відому як ефект Відемана. Цей ефект проявляється у скручуванні феромагнітного полого циліндру під впливом комбінованого поздовжнього і циркулярного магнітного поля на величину кута $\Delta\phi$ (рис. 2.4).

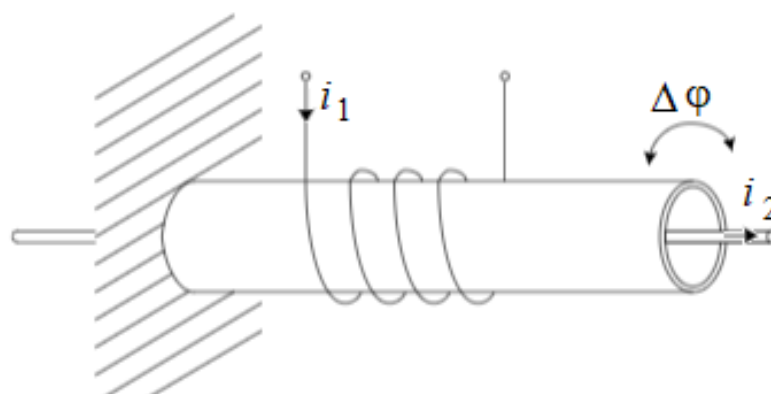


Рис. 2.4. Ілюстрація дії ефекта Відемана

На цьому рисунку циркулярне магнітне поле створює струм i_2 , що протікає по окремому струмопроводу в середині циліндра, а поздовжнємагнітне поле створюється струмом i_1 , що протікає по котушці, намотаної поверх циліндра.

Зворотним ефектом для кутового магнітострикційного ефекту (ефекту Відемана) є магнітопружний ефект Вертгейма (рис. 2.5). Він проявляється у зміні намагніченості стержня і виникненні напруги ΔU під впливом механічного закручуючого моменту M .

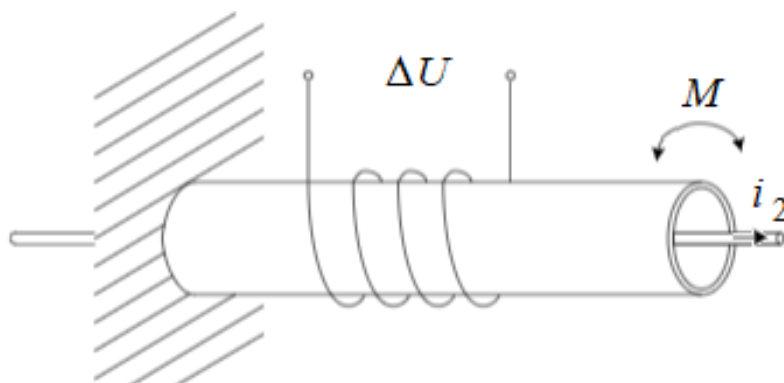


Рис. 2.5. Ілюстрація дії ефекта Вертгеймера

Магнітострикційні ефекти знаходять застосування не тільки у неруйнівному контролі та вимірювальній техніці. Низька швидкість поширення пружних хвиль (у п'ять порядків менша за швидкість електромагнітних хвиль) і відповідно коротка довжина хвилі дають змогу створювати компактні й ефективні пристрої для оброблення інформації, такі як лінії затримки, фільтри та системи кодування. Застосування нелінійних ефектів, які виникають при поширенні ультразвукових хвиль у твердих тілах, дало змогу розробити частотні помножувачі, змішувачі, параметричні підсилювачі та пристрої для кореляційного аналізу сигналів [7, 32].

2.3. Розроблення малоапертурних МСП для автоматизованої ультразвукової системи контролю зварних швів

Вавтоматизованій ультразвуковій системі контролю зварних швів МСП-випромінювач розроблено на основі ефекту Джоуля, МСП-сенсор – на ефекті Віллари. Але обидва перетворювачі мають подібну структуру, основними елементами якої є стержень з магнітострикційного матеріалу та електрична котушка, яка для МСП-випромінювач є джерелом змінного електромагнітного

поляз напруженістю $H(t)$, а у випадку МСП-сенсора котушка створює електрорушійну силу $\Delta U(t)$, пропорційну відносній магнітострикції $\lambda(t)$, яка змінюється в часі.

МСП уявляє собою сердечник з магнітострикційного матеріалу з нанесеною на нього обмоткою. В МСП-випромінювачі (рис. 2.2) енергія змінного магнітного поля, яка створюється в осерді змінним електричним струмом, що протікає по електричній котушці, перетворюється в енергію механічних коливань осердя. В МСП-сенсорі (рис. 2.3) енергія механічних коливань, що збуджується в осерді зовнішньою силою P , яка діє на осердя, перетворюється у енергію магнітного поля, яке наводить змінну в часі електрорушійну силу $\Delta U(t)$ в котушці сенсора [14].

В якості матеріалу осердя обрано сплав пермендюр 49КФ, який має одну з найбільших серед інших магнітострикційних матеріалів магнітострикцію насичення [17]: $\lambda_s = +70 \cdot 10^{-6}$. Нижче наведені інші важливі характеристики цього матеріалу:

$$\text{щільність} - \rho_{\text{п}} = +8200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\text{модуль Юнга} - E = 2,05 \cdot 10^{11} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2};$$

$$\text{швидкість поздовжньої хвилі} - c_l = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\text{відносна магнітна проникність} - \mu^* = 200;$$

$$\text{коерцитивна сила} - H_c = 140 \frac{\text{А}}{\text{м}};$$

$$\text{індукція насичення} - B_s = 2,4 \text{ Т};$$

$$\text{температура Кюри} - \theta = 980 \text{ }^\circ\text{С};$$

$$\text{питомий електричний опір} - \rho_{\text{ел}} = 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$\text{раціональне поле підмагнічування} - H_{\text{п}} = (0,4 \dots 0,6) \cdot 10^3 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Постійне магнітне поле підмагнічування необхідне для того, щоби МСП працював на лінійній ділянці характеристики $\lambda = f(H)$ (рис.2.6). В цьому випадку забезпечується близьке до лінійного перетворення змінної напруженості магнітного поля у магнітострикцію λ .

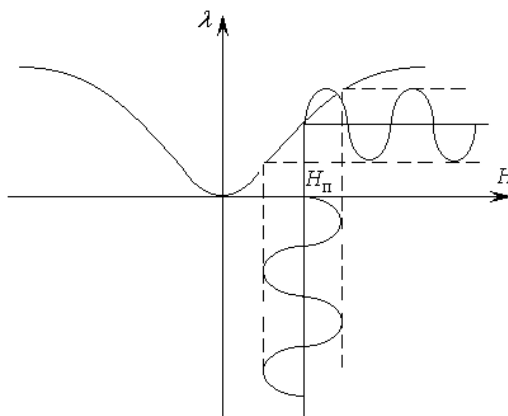


Рис.2.6. Графік залежності $\lambda = f(H)$

В ультразвуковій дефектоскопії використовуються пружні коливання частотою 1...10 МГц. Цим частотам відповідають частоти хвиль у пермендюрі

$$\lambda_n = \frac{c_l}{f} = \frac{5200}{(1...10) \cdot 10^6} = (5,2...0,52) \text{ мм.}$$

Діаметр осердя d_c обирають з наступної умови $d_c \ll \lambda_n$.

Оскільки електрична котушка на феромагнітному осерді уявляє собою антену, то для зменшення впливу зовнішніх завад необхідно котушку виконати як двосекційну з рознесенням секцій на $\lambda_n/2$ та включеними назустріч (рис. 2.7).

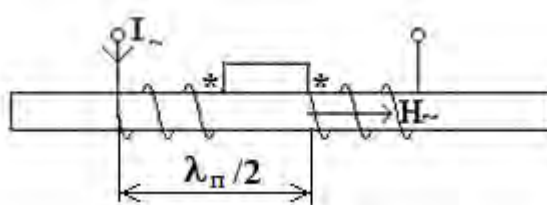


Рис. 2.7. Розташування двосекційної котушки на осерді МСП

Таке двосекційне виконання котушки МСП та розташування секцій на осерді забезпечує підсилення корисного сигналу у 2 рази і значне пригнічення шумів, що наводяться в системі цих котушок.

2.4. Аналіз електроакустичного тракту системи «МСП – ОК – МСП»

Електроакустичний тракт у системі контролю з використанням магнітострикційного перетворювача відіграє ключову роль, оскільки забезпечує передачу, приймання та обробку акустичних сигналів. Його аналіз дозволяє оптимізувати роботу всієї системи, підвищити точність виявлення дефектів і забезпечити стабільність контролю. Структура електроакустичного тракту МСП наведена на рис. 2.8.

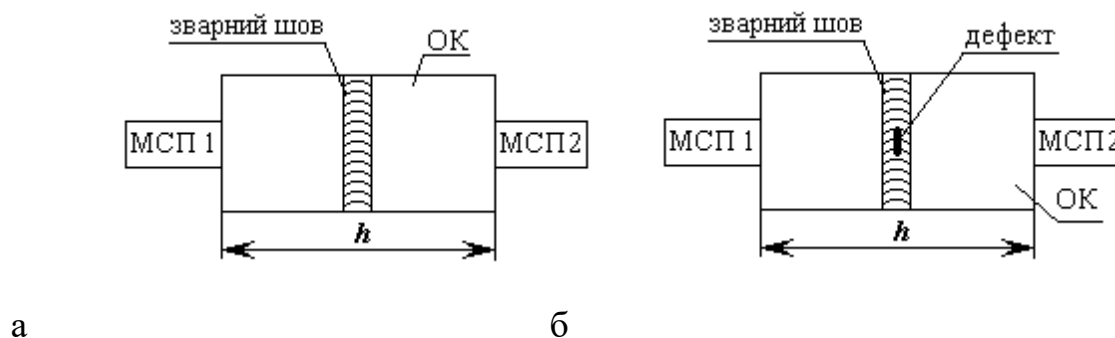


Рис. 2.8. Структура електроакустичного тракту за відсутності (а) та наявності дефекту зварного шва (б)

Електроакустичний тракт системи «Об’єкт контролю – магнітострикційний перетворювач» включає такі основні елементи:

- малоапертурний МСП-випрочінювач, що перетворює енергію електричного сигналу в енергію пружних коливань;
- об’єкт контролю – титановий лист зі зварним швом – середовище, в якому поширюються ультразвукові хвилі;
- малоапертурний МСП-сенсор, який перетворює енергію пружних коливань в електричний сигнал.

МСП встановлюються на ОК на відстані h (рис. 2.7). Для того, щоби охопити ділянку зі швом достатньо обрати $h = (10 \dots 20)$ мм.

В системі реалізовано тіньовий метод контролю. Поширюючись в матеріалі зі зварним швом ультразвукові хвилі дещо загасають. За наявності у зварному шві дефекту останній перекриває шлях акустичній хвилі і отриманий МСП-сенсором сигнал суттєво зменшується за амплітудою або зовсім зникає.

В загальному випадку коефіцієнт електроакустичного тракту визначається таким виразом [16]

$$K_{\text{е.а.т}} = \frac{U_{\Pi}}{U_B} = K_{\text{а.т}} K_{\text{п.п}}, \quad (2.3)$$

де U_{Π} і U_B – амплітуда напруги на приймачі та випромінювачі; $K_{\text{п.п}}$ – коефіцієнт подвійного електромеханічного зв'язку (для МСП з осердям зі сплаву пермендію $K_{\text{п.п}} \approx 0,25$ [17]); $K_{\text{а.т}}$ – коефіцієнт акустичного тракту:

$$K_{\text{а.т}} = K_{\text{з.в}} \cdot K_{\text{пр1}} \cdot K_{\text{р.д.н}} \cdot K_{\text{пр2}} \cdot K_{\text{з.п}}, \quad (2.4)$$

де $K_{\text{з.в}}$ і $K_{\text{з.п}}$ – коефіцієнти згасання сигналів у хвилеводах випромінювача та приймача; $K_{\text{пр1}}$ і $K_{\text{пр2}}$ – коефіцієнти проходження межі середовищ МСП-ОК і ОК-МСП; $K_{\text{р.д.с}}$ – коефіцієнт розбіжності, пов'язаний із діаграмою спрямованості МСП.

У формулі (2.4) не вказаний коефіцієнт проходження ультразвукової хвилі в акустичному тракті на межі середовищ «тітан–матеріал шва», оскільки вказані матеріали мають близькі акустичні імпеданси і цей коефіцієнт близький до одиниці; коефіцієнт послаблення акустичної хвилі в акустичному тракті на відстань h також близький до одиниці в наслідок малих h , тому у виразі (2.4) цей коефіцієнт також відсутній [8].

Найбільша складність виникає при аналітичному оцінюванні коефіцієнта $K_{\text{р.д.с}}$, оскільки акустична хвиля має сферичну діаграму напрямленості. Тому загальний коефіцієнт $K_{\text{е.а.т}}$ оцінювався експериментальним шляхом на лабораторному стенді.

2.5. Стенд для експериментальних досліджень коефіцієнту електроакустичного тракту

Стенд призначено для генерування сигналів збудження МСП-випромінювача, приймання сигналів від МСП-приймачів (сенсорів), спостереженні цих сигналів на цифровому осцилографі та визначенні їх амплітудно-часових параметрів для обчислення $K_{e.a.T}$ за визначеними амплітудами сигналів згідно (2.3) та часу затримки ультразвукових сигналів в акустичному каналі. Це і є основні інформативні параметри сигналів МСП для дефектоскопії зварних з'єднань. Структура лабораторного стенду наведена на рис.2.9.

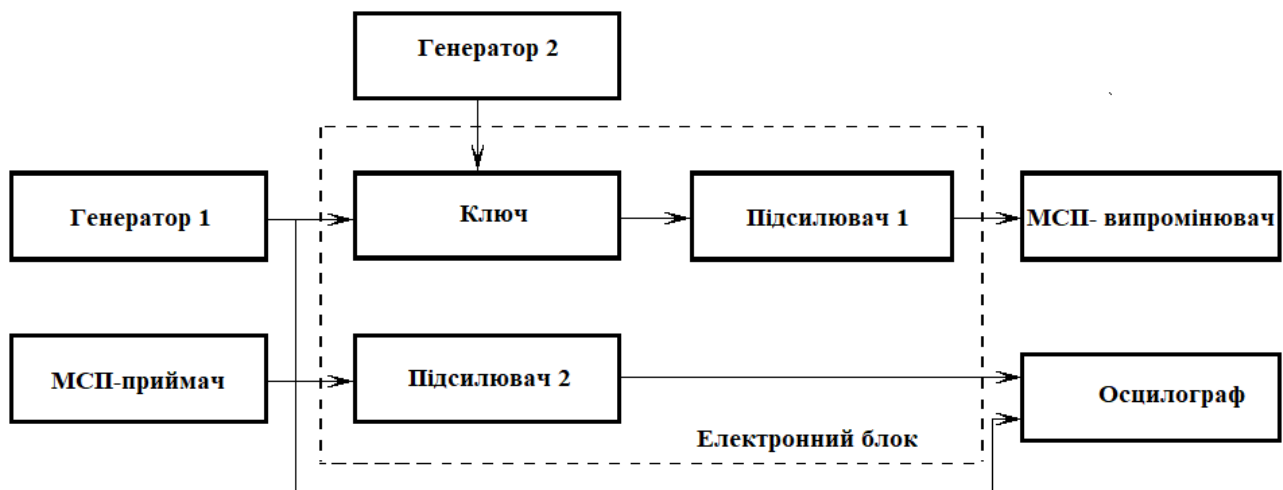


Рис. 2.9. Структура лабораторного стенду для експериментальних досліджень коефіцієнту електроакустичного тракту

До складу стенду входять:

- 1) електронний блок до складу якого входять два підсилювача і ключ;
- 2) високочастотний генератор 1 гармонічних сигналів Г4-102;
- 3) генератор 3 сигналів прямокутної форми Г5-54;
- 4) цифровий осцилограф GW Instek GDS-71022;
- 5) МСП-перетворювач;
- 6) МСП-приймач,

та блоки живлення електронного блоку (на схемі не показані). Блоки живлення забезпечують електронний блок стабілізованою напругою живлення ± 15 В, ± 30 В та $+5$ В.

Умови експлуатації стенду мають відповідати наступним:

- температура оточуючого повітря від 10°C до 35°C ;
- відносна вологість повітря $(50\pm 10)\%$ за температури 25°C ;
- атмосферний тиск від 84 до 107 кПа (від 650 до 800 ммрт.ст.).

Параметри електричної мережі живлення:

- напруга (230 ± 23) В;
- частота $(50\pm 0,5)$ Гц.

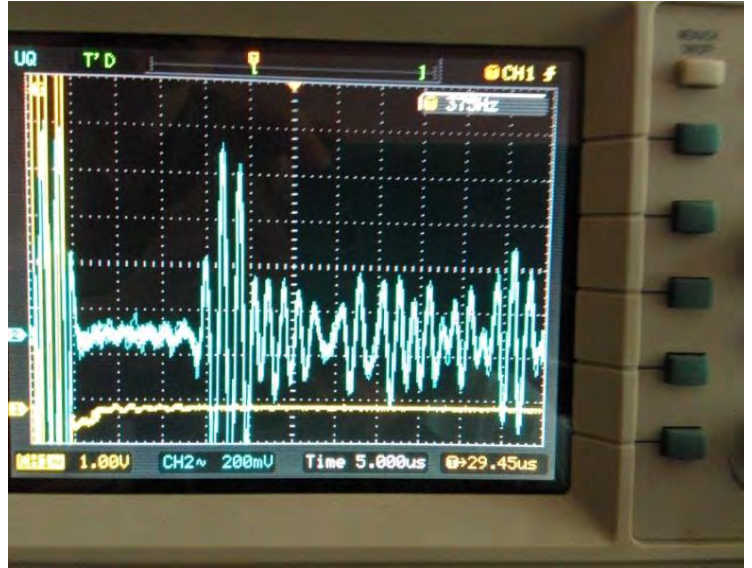
Стенд забезпечує такі технічні характеристики:

- частота заповнення радіо імпульсного сигналу збудження -1 МГц;
- тривалість імпульсу збудження -4 періодисигналу-носія;
- амплітудне значення напруги на випромінювачі - $0\dots 10$ В на навантаженні 1 Ом;
- вхідний імпеданс приймаючого підсилювача $2 - \sim 700$ Ом.
- коефіцієнт підсилення приймаючого підсилювача - 1000 .
- вхідна ємність підсилювача $-$ не більше 15 пФ.

Робота стенду полягає у наступному. МСП-випромінювач та МСП-приймач встановлюють на ОК на відстані $h = 20$ мм. В електронному блоці формуються радіоімпульсні сигнали, що збуджують МСП-випромінювач. У МСП-випромінювачі електричний сигнал перетворюється в ультразвуковий, що надходить по досліджуваному акустичному тракту до МСП-приймача. В останньому ультразвуковий сигнал перетворюється в електричний, що надходить на вхід підсилювача 1 електронного блоку. За допомогою осцилографа контролюють форми сигналів МСП та вимірюють їх амплітудні значення [15]. Встановлення МСП на ОК та характерний вид осцилограм наведений на рис. 2.10



а



б

Рис. 2.10. Розташування МСП на ОК (а) та осцилограма сигналів МСП-приймача

За результатами експерименту, з урахуванням коефіцієнтів підсилення підсилювача 2 та осцилографа, отримано такі значення $U_{II} \approx 0,1\text{мВ}$, $U_B = 10\text{ В}$, тоді згідно (2.3) маємо $K_{e.a.T} \approx 10^{-5}$.

Такий низький коефіцієнт електроакустичного тракту власне і обумовлює використання імпульсного режиму роботи, за якого можна передати в імпульсі більшу потужність в МСП-випромінювач.

Висновки до другого розділу

1. За результатами виконаного аналізу фізичних процесів, що лежать в основі явища магнітострикції та фізичних ефектів магнітострикції з'ясовано, що для використання в МСП-перетворювачах доцільно використовувати ефект Джоуля, а для використання в МСП-приймачах – магнітопружний ефект Віллари.
2. В якості матеріалу осердя доцільно обирати сплав пермендюр 49КФ, який має одну з найбільших серед інших магнітострикційних матеріалів магнітострикцію насичення.

3. Магнітострикційні матеріали мають парну магнітострикційну характеристику, тому для виходу на лінійну ділянку цієї характеристики необхідно використати підмагнічування осердя постійним магнітним полем.
4. Для зменшення впливу зовнішніх завад необхідно виконати котушку МСП як двосекційну з рознесенням секцій на довжину півхвилі коливання в пермендюрита їх електричним включенням назустріч.
5. Сигнали в електроакустичному тракті магнітострикційного дефектоскопу мають значне загасання, тому такі прилади контролю повинні мати у своєму складі підсилювачі з великим коефіцієнтом підсилення (не менше 10^4).

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ МАГНІОСТРИКЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТИТАНОВИХ ЛИСТІВ

3.1.Обґрунтування та структурний розрахунок автоматизованої магніострикційної системи контролю зварних з'єднань титанових листів

Структурна схема системи контролю побудована з використанням сучасних компонентів для генерації, випромінювання та аналізу ультразвукових сигналів. Система дозволяє забезпечити надійний контроль зварних з'єднань завдяки інтеграції можливостей магніострикційного методу ультразвукового контролю, сучасних інформаційно-вимірювальних технологій та програмно-апаратних засобів їх реалізації.

Структурна схема системи контролю зварних з'єднань титанових листів з магніострикційними перетворювачами наведена на рис. 3.1.

Надається за звернення до авторів

Рис. 3.1. Структурна схема автоматизованої магніострикційної системи контролю зварних з'єднань титанових листів

На рис.3.1 позначено:

G – генератор,

SW – ключ,

П1, П2 – підсилювачі сигналів,

ФСК – формувач сигналів ключа,

МСП – магніострикційний перетворювач,

ПС – привід сканера,

СУ – система управління приводом сканера,

АЦП – аналого-цифровий перетворювач,

ЦІ – цифровий інтерфейс,

ПК – персональний комп’ютер,

АПЗ – апаратно-програмне забезпечення.

Система працює наступним чином. Генератор G формує неперервні високочастотні сигнали частотою 1 МГц і амплітудою 2 В. Ця частота обрана як компроміс між технологічними можливостями виготовлення МСП та виявленням дефектів малих розмірів. Сигнали з генератора поступають на ключ SW, який під дією сигналів ФСК формує радіоімпульсний сигнал періодичністю 0,01 с і тривалістю 4 – 6 періодів сигналу-носія. Цей сигнал через підсилювач П1 поступає на МСП1, який випромінює в ОК ультразвукову хвилю. Блок П1 забезпечує підсилення сигналу до рівня 10 В і можливість його передачі на низькоомне навантаження МСП1 (~ 1 Ом)[18].

МСП1 перетворює електричний сигнал в ультразвукові хвилі, які поширюються в титановому листі Система орієнтована на збудження поверхневих ультразвукових хвиль. Для титанових сплавів швидкість поздовжніх і поперечних хвиль дорівнюють відповідно [1]

$c_l \approx 3200 \frac{\text{м}}{\text{с}}, c_t \approx 6400 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.Оскільки довжина поперечної хвилі титані

$\lambda_t = \frac{c_t}{f} = \frac{6400}{10^6} = 6,4 \text{ мм}$ є зівставною з товщиною пластини 1 мм, можна вважати,

що в ОК будуть поширюватись переважно нормальні хвилі, або хвилі Лява. Такі хвилі бувають двох видів – симетричні і асиметричні (рис. 3.2).

За виконання умови [2] $2h/\lambda_t < 0,5$ в пластині може поширюватись тільки одна так звана нульова симетрична нормальна хвиля. Її швидкість наближається до c_t [17, стор. 236].

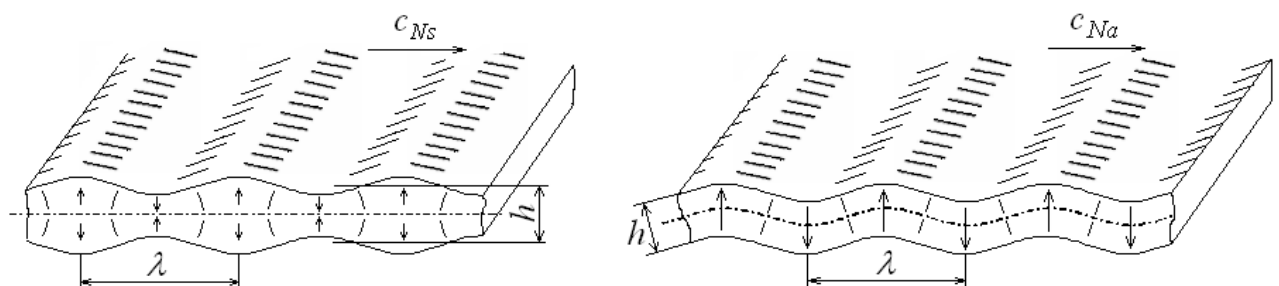


Рис. 3.2 Поширення в пластині симетричних (а) і асиметричних хвиль (б)

З урахуванням вище наведеного в титановому листі частоті 1 МГц відповідає довжина нормальної хвилі $\lambda_t \approx 6,4$ мм.

Час проходження сигналу в ультразвуковому тракті

$$\tau = \frac{h}{c_t} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{6400} = 0,3125 \text{ мкс.} \quad (3.1)$$

Виберемо період повторення сигналів МСП з урахуванням того, що ультразвукові коливання в ОК загасають за 20τ . Тоді період повторення сигналів МСП складе значення $0,3125 \cdot 20 = 6,25$ мкс, що необхідно врахувати при розробці блоку ФСК.

В системі реалізовано тінювий метод контролю, згідно якому МСП2 перетворює пружні коливання в електричний сигнал. У відповідності з отриманими в п.2.5 результатами коефіцієнт електроакустичного тракту становить $K_{e.a.t} \approx 10^{-5}$. Тому за відсутності в ОК дефекту на виході МСП2 згідно з (2.3) маємо і радіоімпульсний сигнал амплітудою

$$U_{II} = K_{e.a.t} \cdot U_B = 10^{-5} \cdot 10 = 10^{-4} \text{ В} = 0,1 \text{ мВ} .$$

За наявності в акустичному тракті (у зварному шві) дефекту значення $K_{e.a.t}$ зменшується до величини близької до нуля вольт, що є ознакою дефекту.

Блок П2 здійснює підсилення вихідного сигналу МСП2 з коефіцієнтом 10^4 , отже на виході П2 сигнал з бездефектної ділянки ОК матиме амплітуду $0,1 \text{ мВ} \cdot 10^4 = 1 \text{ В}$. Отриманий на виході П2 сигнал в АЦП перетворюється на цифровий код. Для реалізації такого перетворення АЦП повинен мати частоту дискретизації не менше 20 МГц та 10-12 двійкових розрядів. Отримані в АЦП коди подаються через ЦІ в ПК для подальшого оброблення і прийняття рішення щодо наявності дефекту зварного з'єднання.

В розробленій системі МСП1 та МСП2 об'єднані в один конструктивний вузол – блок перетворювачів БП, який рухається вздовж зварного шва за

заданою програмою. Цей рух реалізується за допомогою привода сканера ПС з кроковим двигуном, який відпрацьовує сигнали СУ – система управління приводом сканера. Ці сигнали поступають з ПК через ЦІ. Сигнали МСП отримуються після його переміщення на 1 мм, що відповідає апертурі перетворювача [17].

Сигнали МСП2 спостерігаються на фоні шуму, який приводить до зниження вірогідності виявлення дефектів. Для підвищення цієї вірогідності алгоритмом роботи системи передбачено в кожній n -тої точки контролю отримання 16 реалізацій сигналу, тобто отримання множини сигналів $\{u_n[j], n = \overline{1, 16}, j = \overline{1, J}\}$ де J – обсяг вибірки, що охоплює не менше 10 – 12 періодів сигналу, з подальшим визначенням їх середнього

$$u[j] = \frac{1}{16} \sum_{n=1}^{16} u_n[j], \quad j = \overline{1, J}. \quad (3.2)$$

В ПП програмним шляхом за допомогою дискретного перетворення Гільберта визначається амплітудна характеристика сигналу МСП2 згідно з виразом [3]

$$U_{\text{мсп}}[j] = \sqrt{(u[j])^2 + (\tilde{u}[j])^2}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (3.3)$$

де $\tilde{u}_{\text{мсп}}[j]$ – дискретне перетворення Гільберта сигналу $u[j]$.

На рис. 3.3 наведено графіки радіоімпульсного сигналу, його гільберт-образу та обвідної.

В цілому АПЗ виконує в системі наступні функції:

- забезпечує управління режимами роботи генератора G, формувач сигналів ключа ФСК, схеми управління сканером та АЦП;
- виконання в ПК дискретного перетворення Гільберта та обчислення обвідної сигналів МСП;
- накопичення множини реалізацій сигнал, отриманих за незмінного положення МСП відносно шва та їх усереднення з метою покращення відношення сигнал/шум;

- візуалізацію сигналів МСП та їх параметрів за результатами контролю;
- побудову зображень зварних з'єднань з виявленими дефектами та автоматичне виявлення дефектів;
- функції управління всіма компонентами системи через зручний інтерфейс користувача.

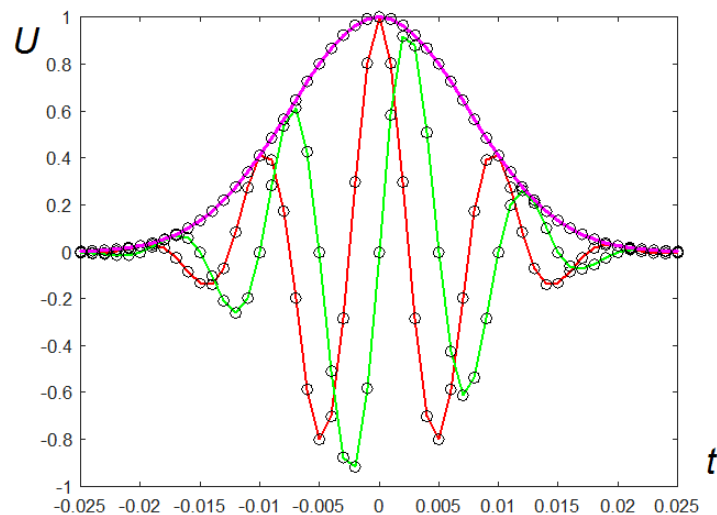


Рис. 3.3. Приклад графіків сигналу $u[j]$ (червона крива), його гільберт-образу $\tilde{y}_{мп}[j]$ (зелена крива) і обвідної $U_{мп}[j]$ (бузкова крива)

В розробленій системі АПЗ реалізовано в середовищі MATLAB.

Переваги системи:

- висока достовірність виявлення дефектів зварних швів завдяки використанню магнітострикційної технології ультразвукового неруйнівного контролю;
- автоматизація процесу контролю завдяки введення в систему двокоординатного сканера для переміщення МСП відносно зварного шва;
- гнучка обробка даних завдяки можливості доопрацювання програмного забезпечення системи і модифікації алгоритмів опрацювання сигналів МСП.

Система може стати надійним інструментом для контролю зварних з'єднань у виробництві, де використовуються титанові матеріали.

3.2. Конструкція магніострикційного перетворювача

Ключовим фактором, який впливає на ефективність малоапертурних ультразвукових магніострикційних сенсорів є матеріал хвилеводу та його технологічна обробка. Хвилевод, як один із основних компонентів сенсора, визначає його експлуатаційні та метрологічні характеристики.

До числа доступних і економічно обґрунтованих матеріалів для хвилеводів належать нікель, залізо-алюмінієві сплави, сплави нікель-кобальт-кремній (Ni-Co-Si), а також залізо-кобальтові сплави, такі як пермендюр і 65К.З цих матеріалів виготовляють дроти діаметром від 0,3 до 2,0 мм.

Використання пермендюру дає змогу значно підвищити чутливість малоапертурних ультразвукових сенсорів та забезпечити десятикратне покращення чутливості МСП порівняно з нікелевим дротом.

Конструкція малоапертурного МСП для ультразвукової дефектоскопії наведена на рис. 3.4, на якому позначено: 1 – корпус; 2 – ультразвукове дзеркало; 3 - хвилевод з магніострикційного матеріалу; 4 – двосекційна котушка збудження; 5 – постійний магніт; 6 – демпфер; 7 – роз'єм[9].

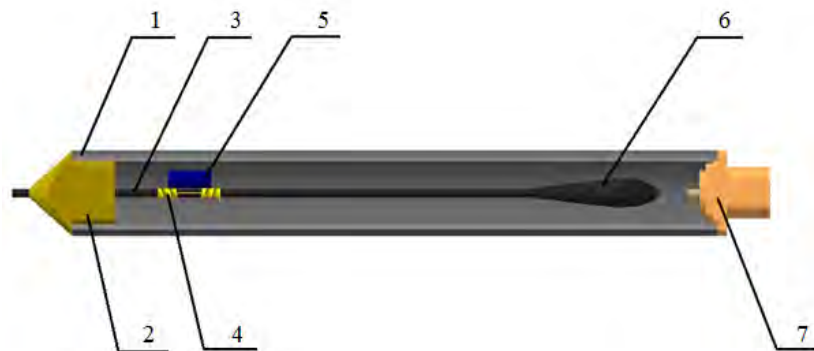


Рис. 3.4. Конструкція малоапертурного магніострикційного перетворювача

Кожен з елементів конструкції виконує важливу функцію в генерації та передачі ультразвукових хвиль, а саме:

1. Корпус

- **Призначення:** забезпечення механічної цілісності та захисту внутрішніх компонентів перетворювача від зовнішніх впливів (удари, вологість, пил).
- **Матеріал:** трубка з нержавіючої сталі із зовнішнім діаметром 12 мм, з товщиною стінки 0,88, що достатньо для забезпечення механічної міцності та стійкості до корозії.
- **Особливості:** має герметичну конструкцію для роботи в агресивних середовищах.

2. Ультразвукове дзеркало

- **Призначення:** відбиття та фокусування ультразвукових хвиль у потрібному напрямку.
- **Матеріал:** спеціальний матеріал з низькими втратами ультразвукової енергії, наприклад, титан або спеціальні сплави.
- **Розташування:** встановлюється при кінці хвилеводу.

3. Хвилевод з магніострикційного матеріалу

- **Призначення:** виконання функції перетворення магнітного поля в механічні (ультразвукові) коливання та передача цих коливань до ОК.
- **Матеріал:** пермендюр або інший магніострикційний матеріал з високим магніострикційним ефектом.
- **Особливості:** виготовлений у круглого стержня діаметром $d = 1$ мм і довжиною 50 мм. Площа випромінювання становить $\sim 0,785$ мм². Такі розміри дають змогу знайти компроміс між високою чутливістю перетворювача та технологічністю виготовлення хвилеводу з електричною котушкою.

4. Котушка збудження

- **Призначення:** створення змінного магнітного поля при подачі на неї змінного електричного струму частотою $f = 1$ МГц.
- **Матеріал:** обмотка виконується з мідного дроту з ізоляцією та діаметром електропровідної жили $d_{др} = 0,1$ мм.

- **Особливості:** кількість витків однієї секції котушки – $W = 20$, вибрана з умови, щоби її аксіальна довжина не перевищувала $\lambda_n/4$, а відстань між секціями – $\lambda_n/2$, що необхідно для збільшення відношення сигнал/шум перетворювача.

5. Постійний магніт

- **Призначення:** створення постійного магнітного поля, необхідного для початкової магнітної поляризації магнітострикційного матеріалу, що підвищує чутливість і стабільність роботи в лінійному режимі.
- **Матеріал:** Неодимові магніт з високою магнітною проникністю у виді циліндра діаметром 1 мм.
- **Розташування:** Встановлюється поруч із магнітострикційним елементом в місті розташування електричної котушки.

6. Демпфер

- **Призначення:** гасіння небажаних механічних коливань при їх відбитті від торця осердя, які можуть викликати спотворення сигналу та знизити вірогідність виявлення дефектів.
- **Матеріал:** використовується матеріал з високими демпфуючими властивостями (гумові або композитні вставки).
- **Розташування:** Розташовується поблизу торця хвилеводу.

7. Роз'єм

- **Призначення:** забезпечення електричного з'єднання між котушкою збудження та зовнішнім генератором сигналів.
- **Тип:** стандартний або спеціальний високочастотний роз'єм, наприклад, типу LEMO, BNC або SMA.
- **Особливості:** повинен мати надійний контакт та бути стійким до механічних впливів.

Розглянемо більш детально окремі елементи конструкції МСП.

Акустичний демпфер. Для зниження рівня паразитних сигналів, які виникають через відбиття ультразвукових коливань від кінців хвилеводів на кінцях хвилеводу встановлюються спеціальні пристрої, які забезпечують

поступове зростання питомого загасання ультразвукової хвилі до рівня допустимого мінімуму.

В цілому акустичні демпфери повинні:

- забезпечувати високі поглинаючі властивості;
- мати компактні масо-габаритні характеристики;
- зберігати стабільність фізико-механічних властивостей протягом тривалого часу як у нормальних, так і в специфічних умовах експлуатації.

Для виготовлення демпферів зазвичай використовують матеріали, такі як шкіра, каучук, гума, олово тощо. Такі демпфери мають певні недоліки:

- складна конструкція;
- значні масо-габаритні розміри;
- обмежений температурний діапазон експлуатації (від -40 до $+110$ °С).

За результатами досліджень МСП [19] зроблено наступні висновки.

- Найкращими поглинаючими властивостями характеризуються демпфери краплеподібної форми середніх розмірів із діаметром близько 5 мм.
- Як матеріал демпфера найефективніше застосовувати епоксидну смолу з наповненням порошком вольфраму або свинцевого сурику.
- Зменшення розміру демпфера призводить до різкого зниження його ефективності, тоді як подальше збільшення розміру має незначний вплив на поліпшення властивостей[15].

З урахуванням цих рекомендацій в МСП використано демпфер на основі епоксидної смоли з порошком вольфраму, форма якого представлена на рис. 3.5.

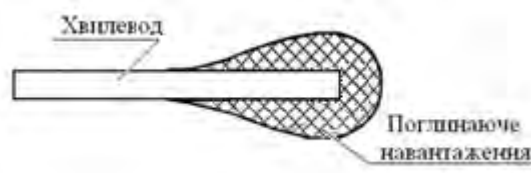


Рис. 3.5. Загальний вид конструкції демпфера хвильоводу

Котушки збудження. До котушок збудження малоапертурних МСП висуваються такі вимоги:

- висока механічна міцність;
- конструктивна довжина обмотки не повинна перевищувати половини довжини ультразвукової хвилі в хвилеводі;
- компактні масогабаритні характеристики;
- високий коефіцієнт електромеханічного зв'язку $K_{ем}$ між обмоткою та хвилеводом, тобто витки обмотки повинні бути розташовані якомога ближче до хвилеводу;
- максимальна щільність намотування.

намотуванні дроту безпосередньо на хвилевід

З урахуванням цих вимог в конструкції МСП використано безкаркасне намотування дроту безпосередньо на хвилевод.

Для узгодження котушок МСП1 важливо визначити їх електричний опір. Для визначених вище параметрів електричної котушки активна складова опору однієї секції котушки становить

$$R = \rho \frac{4(d + d_{др}) \cdot W}{d_{др}^2} = 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{(10^{-4})^2} = 0,154 \text{ Ом},$$

де $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \times \text{мм}^2}{\text{м}}$ – питомий опір міді.

Розрахункове значення індуктивності однієї секції котушки складає

$$L = \mu_0 \mu^* W^2 \frac{\pi D_{эф}^2}{4l} = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 200 \cdot 20^2 \cdot \frac{3,14 \cdot (1,1 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \approx 47,7 \text{ мкГн}.$$

В двосекційній котушці збудження при зустрічному включенні ідентичних котушок їх індукція повинна дорівнювати нулю. Але за неповної ідентичності котушок їх сумарна індуктивність становить $L_{\Sigma} \approx 0,2 \text{ мкГн}$, що підтверджено її вимірюванням. Тоді повний комплексний опір котушки збудження дорівнює

$$\dot{z} = 2R + j2\pi f L_{\Sigma} = (2 \cdot 0,154 + j \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}) = (0,308 + j \cdot 1,256) \text{ Ом}.$$

Отримане значення комплексного опору котушки збудження МСП 1 дає змогу коректноспроєктувати підсилювач П1 (рис.3.1).

Наведена на рис. 3.4 конструкція МСП забезпечує ефективне перетворення електричної енергії в механічну енергію пружних коливань і в зворотному напрямі, введення/виведення ультразвукових коливань з ОК, що дає змогу використовувати МСП для ультразвукової дефектоскопії зварних з'єднань титанових листів товщиною 1 мм.

Вибір осердя у вигляді дротини діаметром 1 мм забезпечує виконання необхідної умови: діаметр хвилеводу МСП повинен бути значно меншим за довжину хвилі ультразвуку в матеріалі.

3.3. Вибір елементної бази для складання електричних принципових схем системи

Для розробки електричних схем системи контролю необхідно обґрунтувати вибір ключових компонентів, які відповідають технічним вимогам і забезпечують надійність, точність та стабільність роботи блоків електронної частини системи. Нижче наведено вибір ключових компонентів з описом її основних характеристик і призначення.

1. Генератор сигналу

Призначення: створення зондуючих сигналів частотою 1 МГц та амплітудою 1 – 2 В.

- **Вибір елементної бази:**

- **Синтезатор частоти:** AnalogDevices AD9833 (DDS-генератор) рис. 3.6).

- **Особливості:** генерація сигналів синусоїдальної, трикутної та прямокутної форми до 12,5 МГц.
- **Переваги:** низьке енергоспоживання, точність формування сигналу, інтерфейс SPI.

- **Мікроконтролер для управління синтезатором:** STM32F103C8T6 (ARM Cortex-M3).

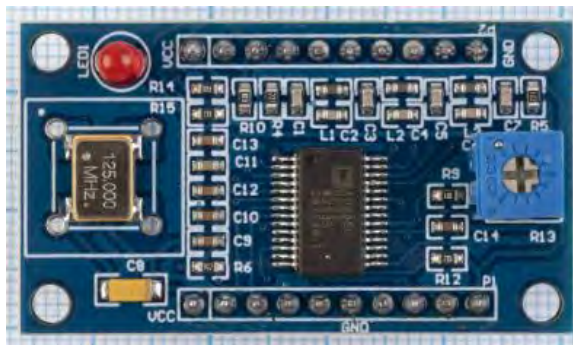


Рис. 3.6. Плата з мікросхемою AD9833

Основні характеристики:

- **Частотний діапазон:** до 12,5 МГц.
- Роздільна здатність по частоті: менше 0,1 Гц (28 біт).
- Напруга живлення: 2,3 В – 5,5 В.
- Інтерфейс управління: SPI.
- Низьке споживання потужності: не більше 20 мВт при 3 В.

2. Ключ

Призначення: комутація сигналів у передавальному тракті.

Використано напівпровідниковий ключ ADG412 (AnalogDevices).

- **Особливості:** низький опір у відкритому стані (до 35 Ом), чотирьоканальний, керування цифровими сигналами.
- **Переваги:** висока швидкодія, низький рівень спотворень.

3. Підсилювач

Призначення: підсилення сигналу МСП до необхідного рівня.

- **Рекомендація:** використати операційний підсилювач AD8021.

4. Формувач сигналів ключа

Призначення: генерація керуючих сигналів для комутації ключів.

- **Рекомендація:** мікроконтролер STM32F103C8T6; транзистор IRLZ44N (N-канальний MOSFET; **особливості:** низький опір каналу у відкритому стані (до 16 мОм), струм до 47 А).

5. Привід сканера.

Призначення: забезпечення руху БП з МСП вздовж зварного шва.

Реалізується на основі **крокового двигуна** NEMA 17, який забезпечує високу

точність позиціонування. Керування двигуном здійснюється за допомогою драйвера A4988.

6. Система управління приводом сканера

Призначення: керування параметрами руху сканера. Реалізується на основі мікроконтролера STM32F103C8T6.

7. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП)

Призначення: перетворення аналогового сигналу в цифровий.

Виконується на основі мікросхеми AD9051 (TexasInstruments).

- **Особливості:** розрядність 10біти; частота дискретизації – до 50 МГц; низька вартість, висока продуктивність; низький рівень споживання енергії.

8. Цифровий інтерфейс

Призначення: передача даних між АЦП та ПК.

- **Рекомендація:** інтерфейс USB-UART: FT232RL (FTDI).

- **Особливості:** підтримка передачі даних зі швидкістю до 3 Мбіт/с.

9. Персональний комп'ютер (ПК)

Призначення: оброблення та аналіз отриманих сигналів, управління сканером та режимами збирання даних.

- **Рекомендація:** стандартний ПК із процесором IntelCore i5, 8 ГБ оперативної пам'яті та ОС Windows/Linux.

Обрана елементна база забезпечить надійну роботу системи контролю зварних з'єднань титанових листах. Використання перевірених компонентів із відповідними характеристиками дозволяє створити надійну й стабільну систему, адаптовану для роботи в промислових умовах.

3.4.Складання та розрахунок схеми електричної принципової підсилювача сигналів МСП

Згідно структурної схеми рис.3.1 та виконаного структурного розрахунку підсилювач повинен забезпечити підсилення вхідних радіоімпульсних сигналів

частотою 1 МГц та амплітудою 0,01-0,1 мВ з коефіцієнтом підсилення 10000. Підсилювач виконується на базі операційних підсилювачах. Оскільки один ОП не може забезпечити такий коефіцієнт підсилення, схема містить 4 ідентичних каскадів з коефіцієнтом підсилення 10, які включені послідовно [19].

В якості операційного підсилювача обрано мікросхему AD8021, який має такі основні технічні характеристики.

Особливості мікросхеми

Низький рівень шуму:

шум вхідної напруги $2,1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$;

шум вхідного струму $2,1 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Висока швидкість

200 МГц ($G = -1$);

190 МГц ($G = -10$).

Мала потужність:

34 мВт або 6,7 мА, типові для живлення 5 В.

Низькі спотворення.

Висока точність постійного струму:

максимальна вхідна напруга зсуву -1 мВ ;

дрейф вхідної напруги зсуву $-0,5 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$.

Широкий діапазон живлення від 5 В до 24 В.

Низька ціна.

Схема електрична принципова одного каскаду підсилювача наведена на рис.3.7.

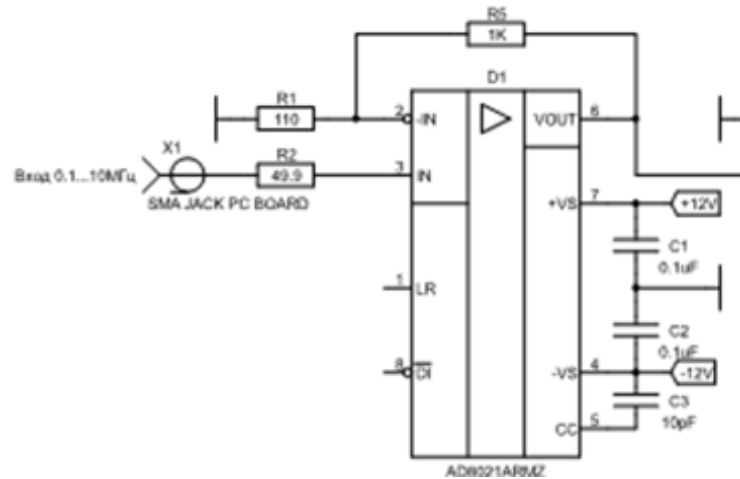


Рис. 3.7. Один каскад підсилювача сигналів МСП2

Кожен каскад підсилення реалізується за стандартною схемою неінвертуючого підсилювача з коефіцієнтом підсилення $K=1+R_f/R_g$, де:

- R_f – резистор зворотного зв'язку,
- R_g –резистор у "нижній" частині ланцюга.

В наведеній схемі $R_f=1$ кОм, $R_g = 110$ Ом, тому $K=1+1000/110=10$.

- **Резистори мають характеристики:**

- точність: $\pm 1\%$ (металоплівкові резистори, оскільки вони мають низький температурний коефіцієнт і високий рівень стабільності).
- потужність: 0,125 Вт, що достатньо для умов роботи в підсилювачі низької потужності.

Конденсатори (С)

- **Призначення:**

- Згладжування шумів у джерелі живлення.
- Забезпечення стійкості роботи підсилювача на високих частотах.

- Усунення паразитних частотних компонентів.
- **Живлення:**
 - Напруга живлення: ± 12 В .

Висновки до третього розділу

▪ Особливість розробленої структурної схеми системи контролю зварних з'єднань титанових листів полягає у використанні малоапертурних магніострикційних перетворювачів для збудження пружних коливань в ОК.

▪ Виконаний структурний розрахунок дав змогу сформулювати основні вимоги до складових схеми, що необхідно для вибору елементної бази для їх реалізації.

▪ Показано, що в об'єкті контролю – тонкому титановому листі, поширюється нульова симетрична нормальні ультразвукові хвиля, швидкість якої дорівнює швидкості поперечної хвилі в титані.

▪ Для підвищення відношення сигнал/шум з метою збільшення вірогідності виявлення дефектів алгоритмом роботи системи передбачено усереднення множини реалізацій сигналів для кожної точки контролю.

▪ Розроблено конструкцію магніострикційного перетворювача та виконано розрахунок його електричних параметрів.

▪ Виконано розрахунок схеми електричної принципової підсилювача сигналів МСП.

4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ

4.1. Опис ідеї та технологічний аудит стартап-проєкту

У цьому розділі проведено аналіз стартап-проєкту, мета якого полягає в розробці системи автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів товщиною 1 міліметр з використанням магніострикційного методу.

Для кращого розуміння вимог до реалізації проєкту, його цілей, завдань та орієнтовних термінів була створена інформаційна карта, представлена у вигляді таблиці 4.1 нижче.

Інформаційна карта

Назва блоку	Характеристика
1	2
Загальна характеристика стартап-проєкту	
Назва стартап-проєкту	Автоматизований контроль зварних з'єднань титанових листів.
Проблематика, яку вирішує стартап проєкт	Стартап-проєкт спрямований на вирішення проблеми низької ефективності та точності контролю зварних з'єднань титанових листів товщиною 1 міліметр, що є критично важливим для авіаційної, медичної та космічної промисловості. Існуючі методи неруйнівного контролю часто вимагають значних витрат часу, високої кваліфікації персоналу та не завжди забезпечують виявлення дрібних дефектів. Використання магніострикційного методу дозволяє автоматизувати процес контролю, зменшити ризик людських помилок та забезпечити високу якість зварних конструкцій.

<p>Головні цілі та завдання проєкту</p>	<p>Головні цілі проєкту:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Розробка автоматизованої системи контролю зварних з'єднань титанових листів товщиною 1 мм із використанням магніострикційного методу. 2. Підвищення точності та швидкості виявлення дефектів у зварних з'єднаннях для забезпечення їхньої надійності в критичних галузях. 3. Зниження витрат на контроль якості шляхом автоматизації процесу та зменшення залежності від кваліфікації персоналу. 4. Забезпечення екологічної безпеки та мінімізації відходів завдяки неруйнівному характеру контролю. <p>Основні завдання проєкту:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Розробити прототип магніострикційного сенсора для неруйнівного контролю зварних з'єднань. 2. Інтегрувати програмне забезпечення для автоматичного аналізу даних та формування звітів про якість з'єднань. 3. Провести тестування системи в умовах, наближених до реальних виробничих процесів. 4. Підготувати технічну документацію для серійного впровадження системи у виробничі лінії. 5. Розробити бізнес-модель комерціалізації проєкту для його впровадження в авіаційній, медичній та космічній галузях.
<p>Головні цільові групи, на які спрямований проєкт</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Підприємства авіаційної промисловості – для забезпечення надійності та безпеки конструкцій, виготовлених із титанових сплавів. 2. Медичні виробники – для контролю якості зварних з'єднань у виробках, таких як імпланти чи медичне обладнання. 3. Космічні компанії та організації – для підвищення надійності титанових компонентів у космічних апаратах. 4. Науково-дослідні установи та лабораторії – для впровадження інноваційних технологій неруйнівного контролю у дослідницьких програмах.
<p>Автори та команда стартап-проєкту</p>	
<p>Автори стартап-проєкту</p>	<p>Автори проєкту: Чарнош Андрій, Куц Юрій Вікторович</p>
<p>Команда стартап-проєкту</p>	<p>Чарнош Андрій, Куц Юрій Вікторович автори проєкту, Інвестори, керівники, працівники-дизайнери, інженери</p>
<p>Опис продукту стартап-проєкту</p>	

<p>Назва та коротка характеристика мінімального життєздатного продукту стартапу (MVP)</p>	<p>Мінімально життєздатний продукт стартапу — це автоматизована система магніострикційного контролю зварних з'єднань титанових листів товщиною 1 міліметр. Вона складається з портативного пристрою, оснащеного магніострикційним сенсором, та програмного забезпечення для автоматичного аналізу дефектів. Система здатна швидко і точно ідентифікувати тріщини, пори та інші недоліки, забезпечуючи неруйнівний контроль з'єднань та їхню високу якість.</p>
<p>Сфера застосування та функціональне призначення продукту</p>	<p>Сфера застосування продукту охоплює авіаційну, космічну, медичну промисловість, а також підприємства, що працюють із титановими конструкціями у високотехнологічних галузях. Продукт призначений для неруйнівного контролю якості зварних з'єднань титанових листів товщиною 1 міліметр, зокрема для виявлення дефектів, таких як тріщини, пори та внутрішні пошкодження. Його функціональне призначення полягає в забезпеченні швидкого, точного та автоматизованого аналізу зварних швів, що сприяє підвищенню надійності та довговічності кінцевої продукції.</p>
<p>Опис унікальних властивостей продукту стартапу</p>	<p>Продукт стартапу має ряд унікальних властивостей, що вигідно виділяють його на ринку. По-перше, система використовує магніострикційний метод, який забезпечує високу точність виявлення навіть мікроскопічних дефектів у зварних з'єднаннях титанових листів. По-друге, продукт є повністю автоматизованим, що мінімізує вплив людського фактора та прискорює процес контролю. По-третє, система є портативною, легко інтегрується у виробничі процеси та не потребує складного налаштування чи спеціальних умов експлуатації. Нарешті, неруйнівний характер контролю дозволяє проводити перевірку без шкоди для конструкцій, що особливо важливо для високотехнологічних галузей.</p>
<p>Стадія розробки продукту стартапу</p>	<p>Налагодження серійного виробництва, партнерство з українськими компаніями та потенційне масштабування на міжнародний ринок.</p>
<p>Технічні характеристики</p>	<p>Продукт здатний контролювати титанові листи товщиною 1 мм, використовуючи магніострикційний неруйнівний метод. Система забезпечує виявлення дефектів розміром від 0,1 мм з високою точністю. Вона працює в широкому діапазоні температур від -20°C до +60°C, має портативний дизайн із компактними розмірами та низьким енергоспоживанням. Інтегроване програмне забезпечення дозволяє проводити автоматичний аналіз даних і формувати звіти в реальному часі.</p>

Супровід продукту	Супровід продукту включає в себе комплекс послуг, що забезпечують безперебійну роботу системи на всіх етапах її експлуатації. Це передбачає регулярні оновлення програмного забезпечення для підтримки сумісності з новими технологіями та удосконалення алгоритмів аналізу. Також надається технічна підтримка для користувачів, включаючи дистанційну консультацію, а в разі потреби — виїзд фахівців для налаштування та калібрування системи. Крім того, забезпечується постійний моніторинг стану пристрою, а також доступ до навчальних матеріалів для користувачів, що дозволяє максимально ефективно використовувати продукт.
Забезпечення стартап-проєкту	
Необхідні ресурси	Для забезпечення стартап-проєкту необхідні технологічні ресурси для розробки та тестування магнітострикційного сенсора, а також програмне забезпечення для аналізу даних. Потрібні фінансові інвестиції для створення прототипу, випробувань і запуску виробництва. Людські ресурси включають команду розробників, тестувальників і маркетологів для просування продукту. Матеріальні ресурси — це титанові листи для тестувань і прототипи пристроїв. Також важливий час для розробки і вдосконалення продукту.
Потреба в інвестиціях	Для реалізації проєкту необхідні інвестиції на етапах розробки прототипу, створення програмного забезпечення, проведення випробувань та тестувань. Крім того, кошти знадобляться для запуску серійного виробництва, маркетингових заходів і створення інфраструктури для підтримки та обслуговування клієнтів. Інвестиції також будуть спрямовані на залучення кваліфікованих фахівців та розвиток бізнес-моделі.
Інтелектуальна власність	Усі майнові авторські права на дизайн системи, її модулі, зображення, схеми, креслення, включаючи літературний і технічний опис, належать авторам стартапу.
Результати стартап-проєкту	
Термін реалізації стартап-проєкту	Термін реалізації стартап-проєкту з автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів становить 18 місяців. Проєкт включає етапи розробки перших прототипів системи магнітострикційного контролю, проведення тестувань, калібрування пристроїв, налагодження виробництва та вихід на ринок. В кінцевому результаті буде забезпечено запуск серійного виробництва та впровадження продукту в авіаційну, медичну та космічну галузі.

<p>Плановані кількісні показники стартап-проєкту</p>	<p>Плановані кількісні показники стартап-проєкту з автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів передбачають запуск серійного виробництва та вихід на ринок України протягом перших 12 місяців. У подальшому, розвиток проєкту включає розширення на міжнародний ринок, зокрема в країни Європи та Північної Америки, протягом наступних 24 місяців. Це дозволить охопити ключові галузі, такі як авіаційна, медична та космічна промисловість, що потребують високоякісного контролю зварних з'єднань.</p>
<p>Якісні показники стартап-проєкту</p>	<p>Якісні показники стартап-проєкту з автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів включають підвищення точності та ефективності контролю якості зварних з'єднань. Цей продукт сприяє забезпеченню надійності та безпеки титанових конструкцій, особливо в критичних галузях, таких як авіація, медицина та космічна промисловість. Система дозволяє своєчасно виявляти дефекти, попереджати про можливі проблеми і забезпечує високий рівень автоматизації, що зменшує людський фактор і підвищує ефективність виробництва. Це сприяє зниженню ризиків та забезпеченню стабільності виробничих процесів.</p>
<p>Загальні очікувані результати</p>	<p>Загальні очікувані результати для стартап-проєкту з автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів включають виведення продукту на ринок та забезпечення його популярності серед підприємств, що працюють у високотехнологічних галузях, таких як авіація, космічна і медична промисловість. Мета проєкту полягає в підвищенні точності та ефективності контролю якості зварних з'єднань, забезпечуючи надійність та безпеку титанових конструкцій. Проєкт прагне знизити ризики, пов'язані з дефектами зварювання, та оптимізувати виробничі процеси, що забезпечить стабільність і якість продукції в критичних галузях.</p>

Із сформованої вище таблиці можна зробити висновок, що процес реалізації стартап-проєкту з автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів складатиме приблизно 18 місяців, враховуючи всі етапи від пошуку інвесторів до запуску виробництва та налаштування системи для досягнення оптимального функціонування. Для формування більш ефективних рішень та визначення оптимальних технічних характеристик було вирішено використати метод формування «морфологічної карти». Саму карту представлено в таблиці 4.2 нижче.

Параметри	Проміжні рішення
Кількість датчиків	Магнітострикційні, Ультразвукові, Радіочастотні, Лазерні, Інші
Розташування датчиків	На зварних швах, На поверхні листів, Всередині конструкції, Уздовж лінії зварювання
Механізм фіксації датчиків	Клеєння, Магнітне кріплення, Гвинтове кріплення, Інтеграція в конструкцію
Тип інтерфейсу	Бездротовий (Wi-Fi, Bluetooth), Дротовий (Ethernet), Гібридний, Інші
Метод виявлення дефектів	Виявлення тріщин, Пор, Зміщення, Корозії
Тип програмного забезпечення	Локальне, Хмарне, Гібридне
Метод аналізу даних	Автоматичний, Ручний, Гібридний
Тип звітності	Реальний час, Щоденний, Після кожного тесту, Індивідуальні налаштування

Відповідно до морфологічної карти проєкту автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів, оптимальні рішення для безпосередньої розробки системи визначаються наступним чином:

1. Кількість датчиків: 2 датчики.
2. Тип датчиків: Магнітострикційні.
3. Механізм фіксації: Інтеграція в конструкцію.
4. Тип інтерфейсу: Бездротовий (Wi-Fi).

Таким чином, оптимальним рішенням є використання кількох датчиків для забезпечення більш точного аналізу зварних з'єднань. Датчики будуть інтегровані в конструкцію для зручності монтажу та точного контакту із зварними швами. Інтерфейс системи буде бездротовим, що дозволить передавати дані в реальному часі через мережу Wi-Fi.

Для більш детального розгортання концепції стартап-проєкту, ми визначили сфери застосування та вигоди від використання системи для кінцевого користувача (див. Таблицю 4.3).

Опис ідеї стартап-проєкту	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Автоматизована система контролю зварних з'єднань титанових листів товщиною 1 мм	Автоматизований моніторинг і контроль якості зварних з'єднань у промислових умовах.	Забезпечення високої точності контролю якості зварних швів.
	Ефективний контроль зварних з'єднань у авіаційній, медичній і космічній промисловості.	Зменшення ризиків дефектів і підвищення надійності конструкцій.
	Інтеграція з виробничими лініями для автоматичного контролю якості.	Оптимізація виробничих процесів завдяки автоматизації та швидкому аналізу даних.
	Віддалений моніторинг та керування процесами контролю через хмарні технології.	Зниження витрат на контроль якості завдяки автоматизації та зменшенню людського фактору.
	Використання в науково-дослідних центрах для тестування нових матеріалів і технологій зварювання.	Забезпечення довговічності та безпечності конструкцій у високотехнологічних галузях.

Відповідно до таблиці 4.3, система автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів є інноваційним рішенням для забезпечення високоточного моніторингу якості зварювання. Ця система інтегрується у виробничі процеси та призначена для автоматизованого контролю параметрів зварних з'єднань, таких як тріщини, пори та інші дефекти. Її інтеграція з системами аналізу даних дозволяє ефективно управляти якістю зварних конструкцій. Система оптимізує процеси контролю, використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення, яке не потребує додаткових налаштувань чи програм. Крім того, віддалений моніторинг і управління через Інтернет дозволяють проводити аналіз даних у реальному часі, підвищуючи ефективність і точність контролю.

Для того, щоб оцінити можливість реалізації проєкту, проведемо технологічний аудит сформованої ідеї (табл. 4.5).

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Автоматизована система контролю зварних з'єднань титанових листів	Використання магнітострикційних сенсорів для аналізу дефектів	Наявні	У відкритому доступі
2	Система аналізу даних якості зварних з'єднань	Інтеграція магнітострикційних сенсорів з програмним забезпеченням для автоматичного аналізу	Наявні	Доступно
3	Оптимізація процесів виявлення дефектів	Використання персонально-розробленого програмного забезпечення для обробки великих масивів даних без додаткових програм	Наявні	У відкритому доступі
4	Віддалений моніторинг та керування системою	Використання мережі Інтернет для віддаленого доступу та аналізу даних	Наявні	Доступно
5	Інтеграція з виробничими системами	Сумісність із сучасними технологіями неруйнівного контролю	Наявні	Доступно
6	Зручне розташування сенсорів	Інтеграція сенсорів безпосередньо в конструкцію титанових з'єднань	Наявні	Доступно

Обрана технологія реалізації ідеї проекту:

Виходячи з наведеної таблиці, реалізація проекту є технологічно здійсненою. Усі необхідні технології для створення автоматизованої системи контролю зварних з'єднань доступні для використання. Магнітострикційні сенсори, як основний елемент проекту, доступні для закупівлі за розумними цінами, а програмне забезпечення забезпечує простоту інтеграції в різноманітні виробничі процеси.\

4.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для визначення перспектив впровадження проекту на ринок необхідно провести оцінку попиту, конкурентного середовища та можливих обмежень.

Таблиця. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	10 000 000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільний ріст
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Висока конкуренція, інтелектуальна власність
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Необхідна сертифікація відповідно до стандартів якості
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	15 %

Висновок:

Ринок автоматизованого контролю якості зварних з'єднань є перспективним. Основними перевагами є високий попит у високотехнологічних галузях, таких як авіація, медицина та космічна промисловість. Запуск проєкту може бути ефективним в Україні з можливістю подальшої експансії на міжнародні ринки.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Автоматизований контроль якості зварних з'єднань титанових листів	Авіаційні компанії, медичні виробники, космічні агенції	Відмінності у специфікації матеріалів та вимог до точності контролю	Висока точність, швидкість і автоматизація контролю

Висновок:

Розробка автоматизованої системи контролю зварних з'єднань відповідає актуальним потребам потенційних клієнтів у високотехнологічних галузях.

При впровадженні технології, яка подібна за принципом дії до запропонованої, можна визначити ряд потенційних викликів, які відображені у таблиці 4.8 нижче. Ці фактори можуть вплинути на можливості успішної реалізації та утримання конкурентоспроможності проєкту на ринку.

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Неоптимальна інтеграція з виробничими системами	Можливість недостатньої сумісності з існуючими системами контролю якості та виробничими процесами.	Проведення тестувань та адаптація системи до особливостей існуючих виробничих процесів, забезпечення сумісності.
2	Високі витрати на обслуговування	Можливість збільшення витрат на технічне обслуговування та підтримку клієнтів.	Розробка програм самодіагностики, оптимізація технічної підтримки, створення навчальних матеріалів для користувачів.
3	Низька готовність ринку до інновацій	Можливість відмови ринку від впровадження інноваційних рішень для контролю зварних з'єднань.	Проведення інформаційної кампанії, демонстрація переваг системи, співпраця з ключовими компаніями для популяризації.
4	Обмежений бюджет клієнтів	Недостатній бюджет у клієнтів для впровадження нових технологій контролю якості.	Запропонування різних цінових пакетів, розробка гнучких фінансових умов, таких як лізинг чи поетапна оплата.

Відповідно до сформованих загроз для нашого стартап-проект у сфері автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів, серед основних ризиків варто виділити потенційну неоптимальну інтеграцію з уже існуючими виробничими системами контролю якості. Можлива загроза полягає в недостатній сумісності нашого рішення з іншими технологіями, що може виникнути через технічні чи програмні розбіжності. Для уникнення цієї загрози ми плануємо провести ретельне тестування системи на різних виробничих лініях та адаптувати процес інтеграції відповідно до специфікацій клієнтів.

Ще однією значущою загрозою є можливе збільшення витрат на обслуговування та технічну підтримку клієнтів. Це може статися через складність системи або недостатню підтримку користувачів. Наш план передбачає оптимізацію процесів обслуговування, впровадження програм самодіагностики для користувачів, а також створення доступної технічної підтримки та навчальних матеріалів, які допоможуть швидко вирішувати дрібні проблеми.

Щодо низької готовності ринку до інновацій у сфері контролю якості, основною загрозою може стати небажання клієнтів впроваджувати нові

технології через страх змін або фінансові обмеження. Наша стратегія передбачає проведення інформаційної кампанії, спрямованої на демонстрацію переваг нашої системи, зокрема її точності, автоматизації та економічної ефективності. Крім того, ми плануємо співпрацювати з провідними компаніями у високотехнологічних галузях для популяризації нашого рішення.

Окремою загрозою може стати обмежений фінансовий бюджет клієнтів, що може призвести до недостатнього фінансування для впровадження нових технологій. У цьому випадку ми плануємо розробити гнучкі фінансові умови, такі як поетапна оплата або лізинг обладнання, а також різні цінові пакети, які відповідатимуть можливостям і потребам клієнтів.

Окрім зазначених загроз, є також значні можливості для реалізації цього проекту. На основі аналізу можна зробити висновок про перспективність впровадження та розвитку нашого рішення як на українському ринку, так і за його межами. Відсутність широкодоступних аналогів, висока точність та надійність системи, а також її простота у використанні відкривають можливість зайняти лідерські позиції у сфері автоматизованого контролю зварних з'єднань. Це створює перспективи масштабування виробництва та впровадження на міжнародних ринках, забезпечуючи нашій компанії конкурентну перевагу та статус ключового гравця в галузі.

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Ефективність вартості	Аналіз наявних компонентів для системи контролю дозволяє обрати оптимальні за ціною та якістю магнітострикційні сенсори.	Розгляд можливості використання більш точних сенсорів для підвищення ефективності контролю.
2	Неперевершена технологія	На українському та міжнародному ринках відсутні доступні автоматизовані системи контролю зварних з'єднань.	Запуск виробництва дозволить зайняти лідерські позиції на ринку неруйнівного контролю якості.
3	Простота конструкції	Простота реалізації сенсорної системи забезпечує доступність компонентів, що сприяє швидкому запуску виробництва.	Швидке масштабування виробництва для задоволення потреб внутрішнього та міжнародного ринків.
4	Постійна технологічна підтримка	Постійний контроль якості роботи системи та її впливу на виробничі процеси клієнтів.	Компанія забезпечує постійну технологічну підтримку, консультації клієнтам і збір

			зворотного зв'язку для вдосконалення.
5	Розвиток технології	Можливість покращення конструкції сенсорів та програмного забезпечення системи контролю.	Компанія активно досліджує нові технології та впроваджує інновації для вдосконалення системи й розширення функціоналу.

Для отримання більш докладного уявлення про конкурентне середовище та його вплив на функціонування підприємства, був проведений детальний аналіз особливостей конкурентного оточення, результати якого наведено у таблиці 4.10 нижче.

Відповідно до проведеного аналізу конкуренції на ринку автоматизованих систем контролю зварних з'єднань, виявлено певні бар'єри для виходу на український та міжнародний ринки. Зокрема, спостерігається олігопольна структура, де невелика кількість великих іноземних компаній домінує на ринку завдяки використанню дорогих технологій та складних інтеграційних процесів. Це створює конкурентний тиск, але водночас відкриває можливості для впровадження інноваційного рішення з оптимальним співвідношенням ціни та якості.

№	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	Тип конкуренції: олігополія	Невелика кількість великих компаній, що постачають дорогі рішення для контролю зварних з'єднань, займають основну частину ринку, зокрема через міжнародні канали.	Розвиток власного виробництва та технологій для отримання конкурентних переваг на українському та міжнародному ринках.
2	Рівень конкурентної боротьби: національний	Наявність значних бар'єрів для входу на ринок через високі вимоги до точності та спеціалізації технології.	Співпраця з великими підприємствами та науково-дослідними установами для підвищення технологічного рівня продукції.
3	Галузева ознака: внутрішньогалузева	Конкуренція між компаніями, що розробляють технології контролю якості зварних з'єднань та використовують	Поліпшення якості продукції та технологій, дослідження нових методів для покращення ефективності зварних з'єднань.

		магніострикційний метод або інші інноваційні рішення.	
4	Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція з іншими компаніями, що пропонують рішення для автоматизованого контролю зварних з'єднань в авіаційній, космічній та медичній промисловості.	Збільшення витрат на маркетинг та рекламу для підвищення впізнаваності бренду та продукту, залучення нових клієнтів.
5	Характер конкурентних переваг: нецінова	Орієнтація на високу точність контролю та простоту інтеграції системи в існуючі виробничі процеси.	Підвищення попиту завдяки якісному продукту, високій точності та надійності системи, зниження кількості дефектів у зварних з'єднаннях.
6	Інтенсивність конкуренції: марочна	Присутність великих відомих компаній на ринку технологій для контролю зварних з'єднань.	Ускладнення виходу на ринок, необхідність створення унікальної пропозиції, яка має конкурентні переваги в якості та інноваціях.

Однак налагодження повністю українського виробництва в галузі автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів дозволить ефективно зайняти ключову нішу, особливо враховуючи, що основні конкуренти є міжнародними компаніями, які працюють через посередників. Такий крок відкриває можливість для підприємства зайняти значну частку ринку, пропонуючи власні рішення та конкуруючи з іноземними брендами. Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за Портером. Отриманий аналіз показано у таблиці 4.11.

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	TitanCheck	MagniTech, Ultrasonic Systems	Виробники магніострикційних сенсорів, електронних компонентів	Авіаційні компанії, медичні виробники, космічні агенції	Системи для неруйнівного контролю зварювання інших матеріалів
Висновки:	Низька інтенсивність конкуренції через відсутність широкодоступн	Існують можливості для виходу на ринок через відсутність	Постачальники можуть впливати на ціни та доступність компонентів, таких як	Клієнти, такі як авіаційні компанії, медичні та космічні підприємств	Існують товари-замінники, як ультразвук

	их аналогічних рішень для контролю зварних з'єднань титанових листів.	аналогічного продукту в потенційних конкурентах.	магнітострикційні сенсори, але не мають домінуючої позиції.	а, мають високі вимоги до якості і точності, що може спричинити конкурентні умови.	радіочастотні сенсори, але вони не можуть забезпечити таку ж точність і надійність при контролі титанових з'єднань.
--	---	--	---	--	---

З проведеного аналізу видно, що ринок автоматизованих систем контролю зварних з'єднань титанових листів, зокрема в авіаційній, медичній та космічній промисловості, насичений продуктами, які мають подібний функціонал контролю якості зварювання. Однак вони відрізняються масштабами, технологічним оснащенням та ціною. Враховуючи це, виробництво спеціалізованих модулів для автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів є перспективним напрямком, оскільки наразі відсутні прямі конкуренти, які б спеціалізувалися на цьому сегменті ринку. Можливість виходу на ринок стає реальною завдяки відсутності аналогічних рішень у конкурентів та невисокій конкуренції, обумовленій тим, що існуючі продукти не фокусуються на контролі зварних з'єднань титанових листів.

Залежність від постачальників виникає через співпрацю з виробниками магнітострикційних сенсорів та електронних компонентів, що може впливати на умови контрактів і співпраці. Клієнтська база включає авіаційні компанії, медичні виробники, космічні агенції та інші високотехнологічні підприємства, що вимагає особливої уваги до умов контрактів та індивідуальних потреб кожного замовника.

Товари-замінники, наприклад, ультразвукові або радіочастотні сенсори, мають схожий функціонал, проте вони не можуть забезпечити таку ж точність і надійність при контролі зварних з'єднань титанових листів, що робить нашу розробку унікальною на ринку.

Після проведених аналізів буде сформований повний перелік факторів, які впливають на конкурентоспроможність проєкту в цьому сегменті ринку (табл. 4.12).

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1	Точність і надійність вимірювань	Висока точність і надійність магнітострикційних сенсорів є ключовими чинниками, які впливають на ефективність роботи системи контролю зварних з'єднань титанових листів, забезпечуючи своєчасне виявлення дефектів та підвищення якості продукції.
2	Масштабованість системи	Можливість масштабування системи від малих виробничих ліній до великих промислових підприємств забезпечує універсальність та адаптацію до різних вимог клієнтів у промислових секторах, таких як авіація, медицина та космічна індустрія.
3	Енергоефективність	Зменшення витрат електроенергії при використанні системи контролю зварних з'єднань сприяє економії коштів для клієнтів і збільшує стабільність та довговічність роботи обладнання в умовах виробництва.
4	Гнучкість інтеграції з існуючими системами	Здатність системи автоматизованого контролю зварних з'єднань легко інтегруватися з наявними виробничими лініями та системами управління дозволяє зберегти вже зроблені інвестиції клієнтів і спрощує впровадження нових технологій без значних додаткових витрат.
5	Регулярні оновлення програмного забезпечення	Постійні оновлення програмного забезпечення забезпечують підтримку нових функцій, покращення алгоритмів аналізу даних та оптимізацію роботи системи протягом тривалого періоду експлуатації, що підвищує її ефективність та знижує ризик помилок.

Після аналізу факторів конкурентоспроможності проведемо порівняльний аналіз слабких та сильних сторін (табл. 4.13).

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «DUST_METER»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з продуктом
1	Точність і надійність вимірювань	18	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3
2	Масштабованість системи	16	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3
3	Енергоефективність	12	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3
4	Гнучкість інтеграції з існуючими системами	17	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

5	Регулярні оновлення програмного забезпечення	14	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3
---	--	----	---------------------

Примітка: Всі фактори оцінюються за шкалою від -3 до +3 в порівнянні з конкурентами.

З проведеного порівняльного аналізу видно, що система автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів має значні конкурентні переваги. Її висока точність і надійність магнітострикційних датчиків, масштабованість, енергоефективність, гнучкість інтеграції з іншими виробничими системами та регулярні оновлення програмного забезпечення роблять її привабливою для користувачів. Рейтинг конкурентів підтверджує вищий статус цієї системи на ринку автоматизованого контролю зварних з'єднань порівняно з суперниками.

Ці фактори сприятимуть успішній реалізації проекту та забезпечать його конкурентоспроможність у сфері контролю якості зварних з'єднань. Для узагальнення результатів аналізу буде сформовано SWOT-аналіз, що підкреслить сильні та слабкі сторони, а також можливі загрози й можливості для розвитку проекту автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів.

Загалом, проведений аналіз показує, що продукт володіє значними перевагами, які роблять його перспективним для успішного впровадження на ринку неруйнівного контролю зварних з'єднань. Виявлені слабкі сторони та загрози не є критичними і можуть бути усунені за допомогою стратегічних кроків та заходів.

Переваги проекту включають високу точність та надійність вимірювань, масштабованість системи, енергоефективність, гнучкість інтеграції з існуючими системами та систематичні оновлення програмного забезпечення. Ці фактори сприятимуть успішній реалізації та популяризації продукту на ринку.

SWOT-аналіз для проекту "OfficeGuard Secure"

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Висока точність і надійність вимірювань магнітострикційними	1. Висока конкуренція на ринку автоматизованого контролю зварних з'єднань.

датчиками.	
2. Масштабованість системи, можливість адаптації до різних виробничих ліній.	2. Можливість недовіри клієнтів до нових технологій у галузі.
3. Енергоефективність, що знижує витрати для кінцевих користувачів.	3. Залежність від стабільності постачань магнітострикційних сенсорів та електронних компонентів.
4. Гнучкість інтеграції з існуючими виробничими лініями та технологіями.	4. Потрібно постійно вдосконалювати програмне забезпечення та алгоритми для збереження конкурентних переваг.
5. Регулярні оновлення програмного забезпечення для підвищення ефективності системи.	
Можливості	Загрози
1. Підвищення точності вимірювань за допомогою нових технологій, таких як удосконалені сенсори.	1. Можлива недостатня точність системи через обмеження поточних технологій.
2. Розширення виробництва для задоволення зростаючого попиту на ринку.	2. Підвищення чутливості клієнтів до ціни обслуговування та підтримки системи.
3. Покращення якості системи через постійну технічну підтримку та адаптацію до змінних вимог ринку.	3. Втрата конкурентних переваг через прискорене зростання конкуренції в галузі.
4. Розширення на міжнародні ринки та співпраця з іноземними компаніями.	4. Тиск з боку великих міжнародних конкурентів, що мають більший досвід і ресурси.

Хоча існують конкурентні виклики та певні труднощі, але з належним підходом та врахуванням виявлених факторів, є можливість ефективно уникнути або подолати ці обмеження. Такий SWOT-аналіз дає підстави вважати систему автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів перспективним та конкурентоспроможним продуктом в обраному сегменті ринку.

На основі проведеного SWOT-аналізу сформуємо стратегію альтернативного впровадження стартап-проєкту. Ця таблиця відображає альтернативні стратегії для покращення ринкового впровадження проєкту автоматизованого контролю зварних з'єднань. Кожна альтернатива має свої переваги та можливості для реалізації.

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Покращення точності та надійності системи автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів.	Ресурси доступні для підвищення ефективності роботи магнітострикційних сенсорів і алгоритмів.	3 місяці

2	Розширення функціоналу та можливостей системи для інтеграції з новими типами виробничих ліній.	Забезпечить конкурентні переваги та високий рівень адаптації до нових потреб клієнтів.	4-5 місяців
3	Інтенсивна рекламна кампанія та розвиток партнерських відносин з великими виробничими підприємствами.	Сприятиме підвищенню впізнаваності продукту та розширенню клієнтської бази.	2 місяці

На основі проведеного SWOT-аналізу сформульована стратегія альтернативного впровадження стартап-проєкту автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів. Запропоновані альтернативи для ринкового впровадження наведені в таблиці 4.15, і кожна з них орієнтована на підвищення конкурентоспроможності та ефективніше впровадження продукту на ринку контролю якості зварних з'єднань.

Зважаючи на розглянуті альтернативи, важливо обрати оптимальний напрямок розвитку, який враховує поточний стан ринку та переваги проєкту автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів. Такий підхід дозволить максимізувати конкурентоспроможність та забезпечити успішне впровадження на ринку технологій неруйнівного контролю зварних з'єднань.

4.3. Розроблення ринкової стратегії проєкту

Для ефективної розробки ринкової стратегії необхідно спочатку визначити стратегію охоплення ринку, зокрема, описати основні цільові групи потенційних споживачів (табл. 4.16). Основною аудиторією в цьому сегменті є підприємства та організації, що працюють у галузях авіації, медицини та космічної промисловості, де використовуються титанові конструкції. Вибір конкретного сегменту серед них не є критичним, оскільки всі вони мають спільну потребу в надійному контролі якості зварних з'єднань для забезпечення безпеки та ефективності своїх виробничих процесів.

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Авіаційні компанії	Споживачі готові впроваджувати високоточні технології контролю зварних з'єднань для забезпечення надійності конструкцій.	Високий попит, оскільки точність і надійність зварних з'єднань критично важливі для авіаційних компонентів.	Висока	Складність входу через високі вимоги до технологій та сертифікації.
2	Медичні виробники	Зацікавлені в контролі якості зварних з'єднань для медичних імплантатів і обладнання, де безпека і точність є ключовими.	Середній попит, оскільки медичні вироби потребують високої точності, але можуть вибирати серед різних рішень.	Середня	Висока конкуренція через різноманітні альтернативи на ринку, але високий попит на високоточні технології.
3	Космічні агенції та компанії	Потребують надвисокої точності і надійності для критичних з'єднань у космічних апаратах.	Високий попит, оскільки якість зварних з'єднань критична для безпеки космічних місій.	Висока	Високий бар'єр для входу через високі технологічні вимоги та сертифікацію.
4	Науково-дослідні установи	Зацікавлені в інноваційних рішеннях для дослідження нових матеріалів та зварних технологій, а також їх застосуванні в наукових проектах.	Середній попит, оскільки наукові установи можуть мати обмежений бюджет, але потребують точних технологій.	Середня	Легкість входу на ринок завдяки низьким вимогам щодо сертифікації і високій гнучкості технологій.

Таким чином, проект автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів орієнтований на широкий спектр клієнтів, і вибір конкретної цільової групи не є визначальним для стратегії виходу на ринок. Ключовим є

забезпечення універсальності системи, що дозволить її адаптацію для різних типів виробничих ліній та промислових об'єктів.

Для ефективної роботи з обраними цільовими групами необхідно розробити базову стратегію розвитку, яка допоможе визначити основні напрямки та підходи до взаємодії з клієнтами (табл. 4.17).

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Розширення функціоналу та можливостей системи, інтенсивна рекламна кампанія та розвиток партнерських відносин	Стратегія концентрованого зростання	Висока точність та надійність вимірювань, масштабованість системи, енергоефективність, гнучкість інтеграції, регулярні оновлення ПЗ.	Стратегія диференціації за точністю, надійністю та інноваційністю системи автоматизованого контролю зварних з'єднань.

У процесі аналізу стратегії розвитку для проєкту автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів можна виокремити ключові напрямки, що сприятимуть досягненню успіху на ринку. Обрані стратегії дозволяють позиціонувати проєкт як інноваційне та конкурентоспроможне рішення на ринку контролю якості зварних з'єднань, що сприятиме залученню нових клієнтів та підвищенню попиту серед цільових груп.

Наступним кроком буде вибір стратегії конкурентної поведінки. Обрану стратегію показано у таблиці 4.18 нижче.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так	Буде і шукати нових споживачів, і	Не буде, основою проєкту є розробка альтернативних та	Стратегія зайняття конкурентної ніші в ринку

		частково забирати існуючих у конкурентів.	інноваційних рішень для контролю зварних з'єднань.	автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів.
--	--	--	---	---

Обрана стратегія конкурентної поведінки для проєкту автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів передбачає активний пошук нових споживачів та часткове відтягування клієнтів від конкурентів, при цьому компанія не буде копіювати основні характеристики конкурентних рішень. Основною метою є розробка альтернативних та інноваційних рішень, що дозволить зайняти конкурентну нішу на ринку контролю якості зварних з'єднань титанових листів.

На основі проведеного аналізу обраного сегменту ринку, а також враховуючи вибрану стратегію розвитку та конкурентної поведінки, слід розробити стратегію позиціонування (табл. 4.19).

Обрана стратегія позиціонування фокусується на високій точності вимірювань, ефективності та надійності системи автоматизованого контролю зварних з'єднань, масштабованості та простоті інтеграції. Ключові асоціації для формування комплексної позиції проєкту: точність, надійність та ефективність.

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап- проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)
1	Наявність надійного та точного контролю якості зварних з'єднань титанових листів.	Стратегія лідерства по витратах	Низька ціна, висока точність вимірювань, ефективність, надійність, масштабованість, простота інтеграції	Точність, надійність, ефективність.

4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Для розробки ефективної та якісної маркетингової програми необхідно сформулювати маркетингову концепцію товару, яку отримає споживач та яка принесе йому вигоду. Для цього було узагальнено результати аналізу конкурентоспроможності системи автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів у вигляді таблиці 4.20 нижче.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Точність контролю зварних з'єднань	Забезпечення високої точності виявлення дефектів зварювання	Висока точність вимірювань магнітострикційними сенсорами, що перевищує можливості існуючих систем контролю зварних з'єднань.
2	Швидкість виявлення дефектів	Забезпечення оперативного виявлення дефектів зварних з'єднань	Швидке виявлення дефектів завдяки високій чутливості системи та миттєвій реакції на зміни.
3	Інтеграція з виробничими лініями	Можливість використання разом з іншими системами контролю якості	Сумісність з існуючими виробничими лініями та системами моніторингу для безшовної інтеграції та оптимізації виробничих процесів.

Аналізуючи ключові переваги концепції системи автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів, можна відзначити, що проєкт має унікальні характеристики, такі як висока точність вимірювань, швидка реакція на дефекти та здатність до інтеграції з існуючими виробничими лініями. Ці переваги роблять проєкт конкурентоспроможним на ринку технологій контролю якості зварних з'єднань.

Сформуємо основні характеристики і властивості нашого проєкту у вигляді трьохрівневої моделі товару. Сформований опис представлено у вигляді таблиці 4.21 нижче.

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Система автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів із використанням магнітострикційного методу для виявлення дефектів.
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики
1. Висока точність вимірювань	Висока точність магнітострикційних сенсорів для виявлення навіть мінімальних дефектів зварних з'єднань.
2. Ефективна цінова політика	Розробка конкурентоспроможної ціни для високотехнологічного продукту.
3. Легка інтеграція з існуючими системами	Простота інтеграції системи в існуючі виробничі лінії без великих витрат і змін у процесах.
4. Постійні оновлення програмного забезпечення	Регулярні оновлення для підтримки нових технологій і поліпшення алгоритмів аналізу даних.
5. Зручне програмне забезпечення для користувачів	Інтуїтивно зрозуміле програмне забезпечення для налаштування і моніторингу системи.
Якість: Висока точність, зручне і надійне програмне забезпечення	Пакування: Модуль поставляється разом з документацією, інтерфейсне програмне забезпечення і навчальні матеріали для користувачів.
Марка: AutoWeld Secure	
III. Товар із підкріпленням	Після продажу система супроводжується постійною технічною підтримкою, а також надається навчання щодо використання програмного забезпечення та налаштування системи для кінцевих користувачів.

З наведеного аналізу видно, що на першому рівні представлено основну концепцію проєкту — автоматизовану систему контролю зварних з'єднань титанових листів із використанням магнітострикційного методу для виявлення дефектів. На другому рівні розкриваються важливі характеристики та переваги продукту, такі як висока точність вимірювань, ефективна цінова політика, легкість інтеграції, регулярні оновлення програмного забезпечення та зручність для кінцевих користувачів. Всі ці характеристики роблять продукт перспективним і конкурентоспроможним на ринку технологій автоматизованого контролю зварних з'єднань.

Після детального аналізу властивостей та характеристик продукту необхідно визначити цінові межі для встановлення вартості товару. Ці межі формуються на основі цін конкурентів та доходів цільових споживачів. Отримані цінові межі наведені в таблиці 4.22.

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Від 10000 до 50000 грн	Немає аналогів у широкому доступі, ціна невідома	Від 30000 грн і вище	Від 20000 до 100000 грн

Отримані межі встановлення ціни на систему автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів враховують аналіз ринку товарів-замінників, відсутність аналогів у широкому доступі та дохід цільової групи споживачів. Рекомендовані верхня та нижня межі встановлення ціни на систему становлять від 20000 до 100000 гривень. Ці ціни враховують специфіку ринку та доступність для цільової аудиторії.

Після проведеного аналізу ціни на систему автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів, необхідно розробити стратегію збуту товару. Результати цієї стратегії наведені в таблиці 4.23 нижче.

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Авіаційні компанії, медичні виробники, космічні агенції, науково-дослідні установи	Технічна підтримка, налаштування, консультації, навчання користувачів	Ринок України та міжнародний	Продажі через офіційних дистриб'юторів, прямі поставки та онлайн-платформи для продажу

Отже, отримана система збуту для системи автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів враховує особливості цільових клієнтів, функції постачальника товару та ринкові умови. Продажі плануються через офіційних дистриб'юторів, прямі поставки та онлайн-платформи для продажу, орієнтуючись на авіаційні компанії, медичні виробники, космічні агенції та науково-дослідні установи на ринку України та міжнародному.

Останнім етапом буде формування концепції комунікацій для маркетингу, що ґрунтуються на основі попереднього аналізу проєкту. Отриману концепцію буде представлено у вигляді таблиці 4.24 нижче.

Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Пошук системи автоматизованого контролю зварних з'єднань, яка забезпечує високу точність, надійність та інтеграцію з існуючими виробничими лініями.	Спеціалізовані веб-сайти, виставки, технічні конференції, презентації для інженерів і керівників підприємств.	Автоматизована система контролю зварних з'єднань титанових листів.	Пояснення переваг точності, ефективності та простоти інтеграції системи.	Підкреслення інноваційності, високої точності та надійності системи, а також її здатності до інтеграції з існуючими технологіями виробництва.

В результаті формування концепції маркетингових комунікацій для системи автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів визначено, що в основі поведінки цільових клієнтів лежить потреба у високій точності вимірювань та надійності системи для контролю якості зварних з'єднань. Основними каналами комунікацій є спеціалізовані веб-сайти, технічні конференції та презентації для промислових підприємств. Для привертання уваги цільових споживачів необхідно акцентувати увагу на сильних сторонах проєкту, таких як висока точність вимірювань, ефективність системи та її здатність інтегруватися з існуючими виробничими лініями, а також на відсутності подібних рішень у широкому доступі на ринку контролю якості зварних з'єднань титанових листів.

4.5. Організація реалізації стартап-проєкту

В результаті формування концепції маркетингових комунікацій для системи автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів було визначено, що ключовим фактором для цільових клієнтів є потреба в рішенні, яке забезпечує високу точність контролю якості зварних з'єднань та можливість інтеграції з існуючими виробничими лініями. Основними каналами комунікацій стануть спеціалізовані веб-сайти, технічні конференції та презентації для інженерів і виробничих підприємств. Для привертання уваги споживачів необхідно акцентувати увагу на сильних перевагах системи, таких як її висока точність, надійність, ефективність, здатність інтегруватися з різними виробничими процесами, а також на відсутності подібних рішень у широкому доступі на ринку технологій автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів.

Команда стартап-проєкту

Учасник команди	Посада	Завдання, що необхідно виконати
Інженер-розробник	Керівник розробки	Розробити прототип системи автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів та забезпечити її функціональність.
Архітектор програмного забезпечення	Головний програміст	Розробити вискооефективне програмне забезпечення для автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів.
Менеджер проєкту	Керівник проєкту	Координувати роботу команди, визначити критичні точки та вирішувати організаційні питання для ефективного виконання проєкту.
Спеціаліст з інтеграції систем	Інженер з інтеграції	Забезпечити сумісність системи автоматизованого контролю зварних з'єднань із існуючими виробничими лініями та технологіями.
Експерт з маркетингу	Спеціаліст з аналізу ринку	Провести ретельний аналіз ринку систем контролю зварних з'єднань і розробити стратегію маркетингу для просування продукту.

Після створення команди важливо розробити графік для моніторингу завдань та приблизного визначення термінів їх виконання. Створений графік подано у таблиці 4.26 нижче.

Календарний план реалізації проєкту

№ п/п	Зміст етапу	Собівартість реалізації
1	Аналіз ринку та визначення вимог	0
2	Розробка концепції ідеї проєкту	1,000\$
3	Створення технічного завдання та конструкції	1,500\$
4	Розробка електричних та принципових схем, виготовлення прототипу	3,000\$
5	Розробка та вдосконалення програмного забезпечення	4,500\$
6	Тестування та виправлення недоліків	800\$
7	Пошук і залучення інвестицій	2,000\$
8	Запуск виробництва	20,000\$
9	Проведення масштабних рекламних кампаній та старт продаж	5,000\$
Сума		37,800\$

Ціни відображають реалістичні витрати для стартап-проєкту, що займається розробкою автоматизованої системи контролю зварних з'єднань титанових листів, включаючи етапи розробки, тестування, запуску виробництва і рекламної кампанії.

На основі розробленого календарного плану, вартість повного процесу від розробки системи автоматизованого контролю зварних з'єднань титанових листів до її запуску оцінюється приблизно в 1 000 000 грн. Ця сума знаходиться в межах визначеного цінового діапазону, вказаного в таблиці 4.22. Процес реалізації проєкту включає розробку надійного модуля для автоматизованого контролю зварних з'єднань, створення конструкції та супутньої документації для монтажу, розробку програмного забезпечення для управління системою, тестування отриманого продукту, а також залучення інвестицій, запуск виробництва та продажу.

Для залучення інвесторів рекомендується використовувати можливості спеціалізованих виставок технологій контролю якості, де можна продемонструвати основні переваги системи. Крім того, платформи для запуску нових стартапів, такі як Kickstarter, можуть стати ефективним інструментом для залучення фінансування. Таким чином, впровадження та виробництво автоматизованої системи контролю зварних з'єднань титанових листів, згідно з

розробленими етапами, дозволяє реалізувати проєкт у визначеному ціновому діапазоні та залучити необхідні інвестиції.

Після створення календарного плану необхідно розробити таблицю вихідних витрат на компоненти та обладнання, необхідні для виготовлення модуля. Розрахунки за цією ініціативою наведено у таблиці 4.27.

Витрати на виробництво

№ п/п	Витрати	Тип	Терміни постачання/виконання	Вартість, грн
1	Магніострикційний датчик	----	5 днів	3000
2	Мікроконтролер Arduino	----	3 дні	400
3	Програмовані логічні елементи	----	4 дні	200
4	Макетна платформа	----	2 дні	150
5	Паяльна станція	----	3 дні	1500
6	Припій	----	2 дні	100
7	Флюс	----	3 дні	80
8	Розхідні матеріали	----	4 дні	500
Сума				4930 грн

Висновки до 4 розділу

У цьому розділі детально розглянуто перспективи впровадження автоматизованої системи контролю зварних з'єднань титанових листів. Підкреслено, що реалізація такого проєкту є надзвичайно важливою в контексті зростаючих вимог до якості та безпеки зварних конструкцій у високотехнологічних галузях, таких як авіація, медицина та космічна промисловість.

Автоматизована система контролю зварних з'єднань титанових листів має стратегічне значення для забезпечення надійності та якості продукції. Вона передбачає інтеграцію з існуючими виробничими лініями та покращення процесів контролю якості зварних з'єднань, що є критичними для безпеки та ефективності кінцевих продуктів. Розроблений календарний план показує, що загальні витрати на реалізацію проєкту оцінюються на рівні приблизно 37,800 доларів.

Процес реалізації включає створення надійної та високоточної системи контролю зварних з'єднань, а також розробку концепції, створення конструкції, супровідної документації, розробку програмного забезпечення, тестування, залучення інвестицій, запуск виробництва та впровадження на ринок.

Загальний висновок підкреслює важливість впровадження автоматизованих систем контролю якості зварних з'єднань у високотехнологічних виробництвах. Цей інноваційний підхід сприяє підвищенню надійності та точності контролю, відкриваючи нові можливості для розвитку безпечних і ефективних виробничих процесів. Тому впровадження автоматизованої системи контролю зварних з'єднань титанових листів стане важливим кроком до стабільної роботи високотехнологічних підприємств, що є ключовим фактором у забезпеченні безпеки та якості продукції на сучасному ринку.

Висновок

У даному дипломному проекті розроблено автоматизовану ультразвукову систему контролю зварних з'єднань титанових листів, в основу якої покладено магнітострикційний метод збудження та приймання пружних коливань. Проведені аналітичні та експериментальні дослідження підтвердили ефективність застосування малоапертурних магнітострикційних перетворювачів в ультразвуковій дефектоскопії

У першому розділі проекту виконано аналіз зварних з'єднань титанових листів як об'єкта ультразвукового контролю, особливості застосування магнітострикційного методу ультразвукового контролю для дефектоскопії зварних з'єднань, сформульовано основні завдання роботи.

У другому розділі розглянуто фізичні основи явища магнітострикції, виконано аналіз магнітострикційних ефектів, зокрема ефектів Джоуля і Віллари, для розроблення малоапертурних МСП. Виконано аналіз електроакустичного тракту системи «магнітострикційний перетворювач – об'єкт контролю – магнітострикційний перетворювач», експериментально отримано значення коефіцієнту електроакустичного тракту системи.

У третьому розділі наведено обґрунтування та структурний розрахунок автоматизованої магнітострикційної системи контролю зварних з'єднань титанових листів, наведено конструкцію МСП, подано вибір елементної бази для складання електричних принципових схем системи, представлено електричну принципову схему підсилювача сигналів МСП.

Магнітострикційний метод виявився ефективним інструментом виявлення к внутрішніх поверхневих дефектів зварних з'єднань. Розроблена автоматизована система контролю дає змогу не лише виявляти дефекти, а й аналізувати отримані дані, що робить процес контролю більш надійним та інформативним.

У результаті проведених досліджень було підтверджено, що магнітострикційний метод може суттєво покращити процес контролю якості

зварних з'єднань титанових конструкцій. Впровадження технології ультразвукової дефектоскопії на основі явища магнітострикції у промисловість може суттєво сприяти підвищенню надійності контролю виробів з титану.

Список використаної літератури

1. Babak, V.P., Babak S.V., Eremenko V.S., Kuts Y.V., Myslovych M.V., Scherbak L.M. & Zaporozhets A.O. (2021). Models and Measures for Standardless Measurements of the Composite Materials Characteristics. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 360. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5> **Scopus**
2. Babak, V.P., Babak, S.V., Eremenko, V.S., Kuts, Y.V., Myslovych, M.V., Scherbak, L.M., Zaporozhets, A. (2021). *Models and Measures in Measurements and Monitoring*. Springer International Publishing, 266 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70783-5>. **Scopus**
3. V. Babak, A. Zaporozhets, V. Zvaritch, L. Scherbak, M. Myslovych, Y. Kuts. (2022). Models and Measures in Theory and Practice of Manufacturing Processes, *IFAC-Papers OnLine*, Vol. 55, Issue 10, pp. 1956-1961, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.685>. **Scopus**.
4. Bohachev, I., Babak, V. & Zaporozhets, A.: Novel small-aperture transducers based on magnetostrictive effect for diagnostic systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 3, 69–78. (2022).
5. Bohachev I., Kovtun S., Kuts Y., Sozonov S., Khaidurov V. Research of the magnetostriction methods of ultrasonic defectoscopy of energy equipment / Системні дослідження в енергетиці, 2023, №2.– P. 72-82. doi.org/10.15407/srenergy2023.02.072.
6. Information Provision of Diagnostic Systems for Energy Facilities / V.P. Babak, S.V. Babak, M.V. Myslovych, A.O. Zaporozhets, V.M. Zvarych; Edited by Corresponding Member of the NAS of Ukraine V.P. Babak. – Kyiv: Akadempriodyka, 2018. – 132 p. DOI: <https://doi.org/10.15407/akadempriodyka.353.134>.
7. Babak, V., Zaporozhets, A., Khaidurov, V., Scherbak, L., Bohachev, I., Tsiupii, T. (2023). *Mathematical Models and Software for Studying the Elasticity of Building Structures and Th*

eirSystems. In: Zaporozhets, A. (eds) Systems, DecisionandControlinEnergy IV. StudiesinSystems, DecisionandControl, vol 454. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_4

8. Babak V.P. Method and Apparatus for Detecting Surface Cracks / V. Babak, I. Bogachev, L. Shcherbak, R. Hamota // Bulgarian Society for NDT, International Journal “NDT Days”, Vo. 1, Issue 4, 2018. – Pp. 477-483.

9. Бабак В.П. Науково-технічна проблематика шумової діагностики / В.П. Бабак, О.І. Красильніков, М.В. Мислович, Л.М. Щербак // Промышленная теплотехника. – 2017. – Т.39, № 7. – С. 104.

10. MagnetostrictiveSensors: FundamentalsandApplications

<https://www.hindawi.com/journals/jece/2016/2674801/>

11. ResearchGate - MagnetostrictiveMaterials

https://www.researchgate.net/publication/260167920_Magnetostrictive_Materials

12. MagnetostrictiveEffectinMaterials

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004060310700456X>

13. "Magnetostriction: A Review"

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838806004374>

14. UltrasonicTestingofWelds

<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/technical-articles/ultrasonic-testing-of-welds>

15. MagnetostrictiveMaterialsintheDetectionofDefects

<https://www.intechopen.com/chapters/46327>

16. Цапенко В.К. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник/В.К. Цапенко,Ю.В. Куц.К.: НЕУУ «КПІ». –2010.–448 с.

17. Ультразвук. Маленькаяэнциклопедия. Глав.ред. И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979.–400 с.

18. IhorBogachev, SvetlanaKovtun, YuriiKuts, SergeySozonov, VladislavChaydurov. Researchofthemagnetostrictionmethodsof ultrasonicdefectoscopyofenergyequipment /

Системні дослідження в енергетиці, 2023, №2.– Р. 72-82. doi.org/10.15407/srenergy2023.02.072.

19. Babak V., Bohachev I., Zaporozhets A. Novel Small-Aperture Transducers Based on Magnetostrictive Effect for Diagnostic Systems / Technical Electrodynamics, 2022, 2022(3), Pp. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.069>.
20. "Magnetostriction and Its Applications" (Springer)
21. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
22. Куц, Ю. В. Спеціальні розділи математики. Курс лекцій: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 180 с.
23. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
24. Дослідження вихрострумових перетворювачів для контролю зварних швів конструкцій із алюмінієвих сплавів з використанням дефектоскопа на базі смартфона / Мок Г., Учанін В.М., Лисенко Ю.Ю. // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2024, №3, стор. 32-38.
25. Ефективність технології автоматизованої вихрострумової дефектокопії з матричними перетворювачами / Лисенко Ю.Ю., Куц Ю.В., Мірчев Й., Левченко О.Е., Глабець С.М. // Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2024, №3, стор. 3-8.
26. Enhancing neural network efficiency in automated image analysis for thermal nondestructive testing / D. Storozhyk, A Protasov, Y. Kuts, O. Muraviov, I. Lysenko, Y. Mirchev // Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Sofia, Vol.54 (2024) pp. 242-252
27. Evaluation Of Eddy Current Array Performance In Detecting Aircraft Component Defects / I. Lysenko, Y. Kuts, V. Uchanin, Y. Mirchev, O. Levchenko // Transactions 81

- on Aerospace Research, Institute of Aviation: Poland, 2024. –Volume 2/2024 (275).
– pp. 1-9
28. Eddy Current Array Testing of Steel Tube Profiles / Mirchev Y., I. Lysenko I., V. Kovtun, Ts. Borisov, P. Chukachev // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 3. – 137-147 pp.
29. Using the RedPitaya platform in automated eddy current testing / Levchenko O., Aleksiev A., Kuts Y., Lysenko I. // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 4. – 194-201 pp.
30. Advantages of Using Eddy Current Array for Detection and Evaluation of Defects in Aviation Components / Lysenko I., Mirchev Y., Levchenko O., Kuts Y., Uchanin V. // International Journal “NDT Days”, BSNDT: Bulgaria, 2023. – Volume 6, Issue 2. – 84-88 pp.
31. Automated Eddy Current System for Aircraft Structure Inspection / Iuliia Lysenko, Yurii Kuts, Valentyn Petryk, Volodymyr Malko, Andrii Melnyk // Transactions on Aerospace Research, Institute of Aviation: Poland, 2023. –Volume 4/2023 (273). – 33-40 pp.
32. Analysis of formation processes of informative features in eddy current probes with pulsed excitation mode / I. Lysenko, Y. Kuts, V. Uchanin, A. Protasov // Research and Review Journal of Nondestructive Testing, vol. 1, no. 1