

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**Для службового
користування
Примірник №**

Сучков Григорій Михайлович

УДК 620.179.16: 620.179.17

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ СТВОРЕННЯ ПРИЛАДІВ ДЛЯ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ
МЕТАЛОВИРОБІВ**

**Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю
та визначення складу речовин**

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Харків – 2005

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі "Прилади і методи неруйнівного контролю" у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України та в Науково-дослідному інституті "УкрНДІМет" Міністерства промислової політики України, м. Харків.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Себко Вадим Пантелійович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», м. Харків, завідувач кафедри
приладів і методів неруйнівного контролю.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Ігуменцев Євген Олександрович,
Українська інженерно - педагогічна академія, м. Харків,
професор кафедри систем управління та автоматизації
промислових установок;

доктор технічних наук, професор
Гальченко Володимир Якович,
Луганський державний медичний університет, м. Луганськ,
завідувач кафедри медичної та біологічної фізики,
медичної інформатики, біостатистики;

доктор технічних наук, професор
Савін Віктор Гурійович,
Національний технічний університет України "Київський
політехнічний інститут", м. Київ,
завідувач кафедри теоретичної механіки.

Провідна установа: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН
України, відділ неруйнівних методів контролю якості
зварних з'єднань, м. Київ.

Захист відбудеться "15" грудня 2005 р. о 14.30 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д64.050.09 в Національному технічному
університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002,
м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного
університету "Харківський політехнічний інститут"

Автореферат розісланий "14" листопада 2005 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення вимог до якості промислової продукції зумовило інтенсивний розвиток засобів УЗК матеріалів і виробів. Їх основу складають прилади, що реалізують контактний («мокрый») метод ультразвукового контролю. Значний досвід практичного використання «мокрого» методу дозволив встановити області, в яких він не є ефективним. Це ультразвуковий контроль виробів із забрудненою поверхнею, уражених корозією, або з покриттями (фарба, полімерні плівки і інші ізоляційні покриття), дефектоскопія гарячих і холодних виробів, високошвидкісний контроль, дефектоскопія з низькими експлуатаційними витратами та ін. Заповнити існуючу нішу можливо за рахунок приладів, які не потребують використання для своєї роботи контактної рідини. Перспективними серед таких приладів є засоби, створені на основі ЕМА способу збудження і прийому ультразвукових коливань. Електромагнітно-акустичний спосіб неруйнівного контролю зародився на стику декількох наукових напрямків, що мають різне фізичне єство. Тому для його опису потрібне використання апаратів електродинаміки і термодинаміки, теорії пружності, феромагнетизму, акустики, матеріалознавства. Використання ЕМА способу розповсюджується на області неруйнівного контролю: дефектоскопію, товщинометрію, визначення фізико-механічних властивостей матеріалів. Багатогранність і обсяг необхідних наукових і технічних рішень створили до значні труднощі при розробці ЕМА приладів. В літературі відмічається, що відомі ЕМА засоби мають низьку чутливість, значну «мертву» зону, складну апаратурну реалізацію. Недостатньо досліджено вплив чинників, що визначають результати контролю. Не були розроблені високочутливі перетворювачі. В результаті не були створені ефективні прилади для дефектоскопії, товщинометрії і визначення фізико-механічних властивостей матеріалів.

ЕМА прилади можуть ефективно контролювати якість виробів із забрудненою поверхнею, уражену корозією, або з ізоляційними покриттями, що знаходяться в гарячому або холодному стані. Їх використання підвищує продуктивність контролю, знижує витрати на зачистку поверхні виробів, виключає витрати на контактну рідину і стирання п'єзоперетворювачів. За рахунок виключення з процесу контролю контактної рідини поліпшуються екологічні умови. Розв'язання поставленої проблеми вимагають: залізничний транспорт – при високошвидкісному контролі забруднених рейок; об'єкти нафтогазової промисловості – при контролі виробів з різними видами покриттів; металургійна промисловість - при швидкісному контролі виробів покритих оксидами, або при високих температурах; хімічна промисловість – при контролі виробів, уражених корозією; авіа і суднобудування та ін.

Значні потенційні переваги ЕМА приладів, з одного боку, але низька

чутливість, значна “мертва” зона і складність їх реалізації, з іншого, привели до появи важливої для промисловості наукової проблеми. Її суть полягає в розвитку теорії і практики створення нових приладів на основі ЕМА способу, які забезпечать виявлення дефектів, вимірювання товщини і визначення структурних параметрів електропровідних виробів широкого асортименту.

Отже, розв’язання проблеми створення нового різновиду приладів для ефективного ультразвукового ЕМА контролю є актуальним і своєчасним.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних робіт НТУ “ХПІ” та Науково-дослідного інституту “УкрНДІМет” (м. Харків), тематика яких безпосередньо пов’язана: з комплексною науково-технічною програмою «0.28.4 Транспорт» п. 64 (про розробку та впровадження нових засобів неруйнівного контролю), затверджена Ухвалою ГКНТ СРСР від 20.10.1985 р. № 555; Наказом Міністерства транспорту України № 400 від 24.07.2000 р. (про розробку та налагодження виробництва вітчизняних ЕМА дефектоскопів). Як науковий керівник очолював виконання науково-дослідницької роботи: «Розробка і впровадження на КМК технології ультразвукового контролю макроструктури незагартованих рейок в зонах, обмежених товщиною шийки і головкою» (1.24-К-640-87-ВН, ВАТ «Кузнецкий металургійний комбінат», м. Новокузнецк, РФ) та госпдоговорних робіт «Виготовити і поставити виставковий зразок безконтактного ультразвукового товщиноміра» (№ 03-427 від 03.01.2003 р., АО «Інноваційний центр «Практика», м. Харків), «Проведення досліджень та розробка технічних вказівок з неруйнівного контролю рейок типу UIC 60, зварних стиків рейок типу UIC 60 та перехідних зварних стиків UIC 60 з іншими типами рейок та стрілочними переводами» (№ 548/03-56/03-Цтех від 01.09.2003 р., Укрзалізниця, м. Київ), «Розробка макета ЕМА дефектоскопа для ультразвукового контролю внутрішніх і поверхневих дефектів каліброваних прутків шестигранного і круглого перетину»; № 03-481 від 04.01.2005 р. (№ д47/0867 від 09. 03. 2004 р., ОАО «Металургійний завод ім. А.К. Серова», м. Серов, РФ), «Виготовити і поставити виставковий зразок ЕМА дефектоскопа для контролю виробів, уражених корозією» (№ 03-481 від 04.01.2005 р., АО «Інноваційний центр «Практика», м. Харків). Був відповідальним виконавцем госпдоговорних робіт «Розробити галузевий стандарт України «Дефектоскопи ультразвукові для контролю рейок при їх експлуатації» (№ 98-129/99 від 17.06. 1999 р., Укрзалізниця, м. Київ), «Виготовити, поставити, провести монтаж і впровадження на місці експлуатації двох електромагнітно-акустичних товщиномірів для контролю товщини стінки труб діаметром 42-114 мм» (№ Ф3-2000/178 від 31.08.2000 р., м. Нікополь). Був виконавцем науково-дослідницьких робіт «Розробка і освоєння технології безконтактного ультразвукового контролю

якості головок рейок» (5.18-8-К-469-85-Р-ДСП, «Кузнецкий металургійний комбінат», м. Новокузнецк, РФ), «Дослідження і розробка технології ультразвукового контролю якості рейкових блюмів при температурі прокатки (пошукова)» (1.24-9-К-590-86-ТП-ДСП).

Мета і задачі досліджень. Мета роботи – на базі узагальнення досвіду використання ультразвукового контролю в діапазоні частот 0,1...7 МГц розвинути наукові і практичні основи створення високоефективних приладів для ЕМА дефектоскопії, товщинометрії і визначення фізико-механічних властивостей матеріалів. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- розробити принципи підвищення чутливості приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів;

- розвинути основи і на їх базі розробити концепції створення дефектоскопів і товщиномірів нового покоління;

- теоретично і експериментально дослідити вплив орієнтації вектора поляризації об'ємних ультразвукових зсувних коливань при контролі виробів луна- і дзеркально-тіншовим методами на виявлення дефектів, витягнених переважно вздовж однієї координати;

- дослідити стабільність інформаційних ультразвукових імпульсів при контролі якості металовиробів за допомогою п'єзоелектричних і електромагнітно-акустичних перетворювачів;

- дослідити основні чинники, які впливають на результати ЕМА контролю, визначити допустимі діапазони зміни його параметрів і оптимізувати їх дію на результати контролю;

- дослідити умови розповсюдження ультразвукових імпульсів, збуджених і прийнятих ЕМА перетворювачами, і на їх основі розробити і реалізувати технічні рішення по зменшенню «мертвої» зони;

- розвинути концепції створення ЕМА перетворювачів для дефектоскопії, товщинометрії, визначення фізико-механічних властивостей металевих виробів з урахуванням особливостей їх використання в різних галузях промисловості; дослідити і обґрунтувати принципи формування джерел магнітного поля, призначених для використання в малогабаритних ЕМАП;

- розробити транзисторні генератори пакетних імпульсів підвищеної потужності і підсилювачі з низьким рівнем шуму;

- розробити і виготовити зразки дефектоскопів і товщиномірів нового покоління.

- дослідити особливості метрологічного забезпечення ультразвукового контролю ЕМА способом; розробити пропозиції щодо гармонізації метрологічного забезпечення ЕМА способом відносно традиційного методу.

Об'єктом досліджень є процес взаємодії електромагнітного, магнітного і акустичного полів з металом, який формує у відповідь

імпульсну пакетну реакцію, що несе дані про його якість. При цьому створюється проблемна ситуація ефективного упровадження ЕМА способу в практику ультразвукового контролю.

Предметом досліджень є засоби для дефектоскопії, товщинометрії і визначення фізико-механічних властивостей металевих матеріалів і виробів електромагнітно-акустичним способом.

Методи дослідження. При теоретичних дослідженнях по створенню основ побудови приладів були використані методи, що базуються на апараті диференціального і інтегрального числення, спектрального зображення імпульсів, теорії формування імпульсів складної форми і їх обробки. При дослідженнях ЕМА способу контролю застосовувалися методи формування і аналізу акустичних і електромагнітних полів, їх взаємодії з матеріалами і їх границями. Для оцінки акустичних властивостей виробів були застосовані луна-імпульсні, тіньові і дзеркально-тіньові методи контролю, методи металографії. Оптимізація напряму вектора поляризації заснована на методах розв'язання векторних хвильових рівнянь в частинних похідних, зв'язках експлуатаційних характеристик матеріалів і їх пружних властивостей. Був застосований апарат спеціальних циліндричних функцій. При створенні засобів ЕМА контролю використано методи теорії електротехнічного приладобудування, реалізовано методи боротьби з шумами і завадами електромагнітного і акустичного походження. При розгляді особливостей метрологічного забезпечення ЕМА контролю були застосовані методики взаємодії акустичного і електромагнітного полів з електропровідними і феромагнітними матеріалами.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблено і обґрунтовано принцип підвищення чутливості засобів ЕМА контролю, суть якого полягає: у формуванні інформаційного імпульсу з власними ознаками (частотою заповнення, тривалістю, амплітудою і фазою); подальшому перетворенні електричного імпульсу в акустичний з використанням проміжних електромагнітного і магнітного полів; формуванні акустичного відгуку, який несе інформацію про параметри виробу; зворотному перетворенні акустичного імпульсу в електричний тим же або іншим ЕМАП; його виділенні з урахуванням сформованих раніше індивідуальних ознак;

- досліджено основні чинники, що впливають на результати ЕМА контролю пакетними ультразвуковими імпульсами; визначено допустимі межі їх змін; розроблено способи і пристрої, які оптимізують їх дію в різних умовах;

- розвинуто і обґрунтовано концепції побудови ЕМА перетворювачів різного типу і призначення з підвищеними експлуатаційними характеристиками;

- вперше аналітично вирішено задачу з оптимізації ультразвукового

контролю пружними лінійно-поляризованими коливаннями. Теоретично встановлено і експериментально підтверджено основні закономірності використання ЛПК при луна- і дзеркально-тіньовому методах контролю виробів, підданих витяжці;

- експериментально доведено високу ефективність використання кореляційних методів для виділення з шумів і завад різного походження пакетних імпульсів, прийнятих ЕМА перетворювачами;

- вперше розв'язано задачу виключення «мертвої» зони контролю. Суть розв'язання полягає: у збудженні одним ЕМА перетворювачем пакетних імпульсів об'ємних ультразвукових зсувних коливань нормально поверхні металу; дифракції збуджених хвиль на дефекті, що фіксується; трансформації дифрагованих хвиль на межі розподілу метал - повітря в хвилі Релея; прийом поверхневих хвиль іншим ЕМА перетворювачем;

- вперше розроблено транзисторні генератори пакетних імпульсів з піковою потужністю понад 10 кВт в діапазоні частот 0,2...6 МГц тривалістю 1...7 періодів заповнення і підсилювачі з рівнем шуму не більше 0,7...0,8 нВ/Гц^{0.5};

- розроблено і обґрунтовано принципи формування джерел магнітного поля для малогабаритних ЕМА перетворювачів.

Практичне значення одержаних результатів:

- доведено технічну здійсненність високоефективних приладів для ультразвукового контролю ЕМА способом металовиробів в нагрітому і нормальному стані, з використанням луна-методу з високою чутливістю, малою «мертвою» зоною, високою продуктивністю. Ці прилади доповнюють традиційну групу засобів для дефектоскопії, товщинометрії і визначення фізико-механічних властивостей матеріалів;

- розроблено і виготовлено взаємодоповнюючу групу ЕМА перетворювачів, дефектоскопів і товщиномірів для контролю виробів об'ємними зсувними і подовжніми хвилями, поверхневими хвилями, а також нормальними хвилями;

- розроблено нові технічні рішення, направлені на підвищення можливостей ЕМА приладів і пристроїв. Новизна технічних рішень захищена 8 авторськими свідоцтвами;

- розроблено і введено в дію галузевий стандарт на ЕМА дефектоскопи для контролю залізничних рейок в колії.

Результати дисертаційної роботи використано: в Укрзалізниці Міністерства транспорту та зв'язку України (м. Київ) - при розробці галузевого стандарту на ЕМА дефектоскопи та при розробці технології контролю зварних стиків рейок різного типу; у ВАТ "Харківський котельно-механічний завод" (м. Харків) - під час продуктивного контролю виробів заводу без зачистки їх поверхні від окису та іржі та при розробці технології ЕМА контролю якості трубчатих елементів; у Науково-дослідному інституті

“УкрНДІМет” (м. Харків) - під час розробки технологій та приладів для ЕМА контролю головок та шийок залізничних рейок, заготовок прямокутного та круглого перетину у холодному та гарячому стані, труб нафтогазового сортаменту; у ТОВ фірма “ЕРГОС” (м. Харків) – при застосуванні ЕМА приладів для вимірювання товщини труб ЗАТ “НІКО ТЬЮБ” з допомогою ультразвукових пакетних імпульсів з заданими характеристиками, побудові ЕМА перетворювачів, кореляційного аналізу для виділення корисних сигналів, технології проведення ЕМА контролю; у ВАТ “Металургійний завод ім. А.К. Серова” (м. Серов, РФ) - при розробці ЕМА дефектоскопу для контролю каліброваних прутків круглого та шестигранного перетину; у навчальному процесі на кафедрі «Прилади і методи неруйнівного контролю» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; у навчальному курсі «Акустичний контроль»; у навчальному процесі Атестаційного центру ВАТ «Виробничо-технічне підприємство «Укренергочормет» (м. Харків) - при підготовці фахівців по ультразвуковому контролю 2 - го рівня; у курсі дистанційного навчання НТУ «ХП» «Сучасні методи неруйнівного контролю в машинобудуванні «Акустичний і електромагнітний контроль».

Вагомість наукових розробок автора була відмічена включенням результатів його досліджень до книги «Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.» і його статей в міжнародну електронну бібліотеку в ФРН (<http://ultrasonic.de>). Усі його статті, що були опубліковані в журналі «Дефектоскопія», переопубліковані в журналі «Russian Journal of Nondestructive Testing» в США.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційну роботу включено теоретичні положення і результати, одержані здобувачем особисто: розроблено теоретичні і практичні основи створення приладів, робота яких базується на застосуванні ЕМА способу збудження і прийому пакетних ультразвукових імпульсів; запропоновано і обґрунтовано використання в засобах ЕМА контролю інформаційних імпульсів у вигляді пачки, їх підсилення, перетворення в акустичні імпульси, зворотне перетворення в електричні імпульси, розпізнавання на фоні шумів і завад; виконано всі теоретико - аналітичні дослідження; основні результати по розробці технічних рішень для створення аналогових частин ЕМА приладів; виконано експериментальні дослідження чутливості ЕМА способу, «мертвої зони» та інших чинників. Разом із співавторами проведено обговорення основних концепцій і варіантів обладнання, виконано конструкторські, технологічні, патентно-ліцензійні роботи і роботи з впровадження, виготовлено лабораторні і промислові зразки приладів, розроблено механічне устаткування автоматичних установок ЕМА контролю.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися: на науковому семінарі «Діагностика-2000», (УкрНДІГаз, м. Харків, 2000 р), 5-й конференції-виставці «Неруйнівний контроль -2001» (м. Київ, 2001 р.), 6-й українській конференції-виставці «Неруйнівний контроль-2002» (м. Київ, 2002 р.), щорічних семінарах-виставках «Сучасні технології і прилади неруйнівного контролю і технічної діагностики» (м. Харків, 2002, 2003, 2004 рр.), XI, XII, XIII міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2003, 2004, 2005 рр.), 6-й Міжрегіональній виставці «Енергозбереження. Електроустаткування. Енергетика 2005» (м. Харків, 2005 р.). У повному обсязі дисертаційна робота була доложена на розширеному засіданні кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю» НТУ «ХПІ» і секції наукової ради НДІ «УкрНДІМет», м. Харків.

Публікації. Основні положення дисертації відображено в 42 публікаціях, у тому числі: 33 в фахових виданнях ВАК України і РФ, 1 галузевий стандарт і 8 авторських свідоцтв.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків та 3 додатків. Повний обсяг дисертації складає 521 сторінку, з них: основний текст - 296 сторінок, 2 ілюстрації до тексту, 126 ілюстрацій на 113 сторінках; 20 таблиць до тексту, 1 таблиця на 4 сторінках; 3 додатка на 69 сторінках; 349 найменувань використаних літературних джерел на 36 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано проблему, мету та основні задачі дисертаційної роботи, наведено дані про її зв'язок з науковими програмами, викладено наукову новизну і практичне значення досліджень, особистий внесок здобувача, вказано відомості щодо апробації результатів дисертації, їх публікації та впровадження.

Використано накопичений в даному напрямку науки і техніки світовий досвід, в який зробили свій внесок багато вітчизняних шкіл під керівництвом Троїцького В.О., Карпаша О.М., Маєвського С.М., Малинки А.В. та науковці: Ключев В.В., Ермолов І.М., Білокур І.П., Радько В.П., Корольов М.В., Димкін Г.Я., Крауткреммер Й., Крауткреммер Р., Щербінський В.Г., Ланге Ю.В., Гурвіч А.К., Комаров В.А., Palmer S.B., Шкарлет Ю.М., Нікіфоренко Ж.Г., Рокштро Б.І., Чабанов В.Є., Гуревич С.Ю., Dobbs E.R., Буденков Г. А., Kavashima K., McClung R., Kummel H., Pawelletz R. H. і багато інших.

У першому розділі виконано аналіз стану робіт з дефектоскопії, вимірювання товщини та визначення фізико-механічних властивостей матеріалів в області контролю виробів, поверхня яких забруднена, вкрита

захисними плівками, уражена корозією, або не підлягає дії контактної рідини, а також виробів, нагрітих до високих температур або які переміщуються в зоні контролю з високою швидкістю. На базі огляду науково-технічної та патентної літератури, аналізу і узагальнень досліджень, що проводяться у галузі електромагнітно-акустичних приладів, установок і пристроїв, визначено основні невирішені проблеми і задачі та обґрунтовано напрям досліджень.

У другому розділі досліджено і визначено основні концепції створення засобів, які побудовані на використанні ЕМА способу збудження та прийому УЗ імпульсів. Розглянуто традиційну роботу ЕМАП при живленні його котушки індуктивності імпульсами струму ударного типу (рис.1). Спектр такого сигналу займає широку смугу – від значення постійної складової і, як правило, до кількох мегагерц, і має не чітко визначений максимум (рис.2). Енергія такого сигналу також розподіляється в широкій смузі частот. При вимірюванні товщини h виробу деякі низькочастотні компоненти з довжиною хвилі λ_k збігаються з механічними резонансними частотами f_k , $(h = k \frac{\lambda_k}{2})$, виділяються і складаються разом.

Сукупний сигнал має вигляд $S(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-f_k t} \sin(2\pi f_k t)$. На прийнятій реалізації з'являться суміш випадкових максимумів, які не дозволяють якісно вимірювати товщину. Під час проведення дефектоскопії низькочастотні складові УЗ сигналу через дифракцію майже беруть участі у виявленні дефекту. Крім того, для зменшення впливу шумів та завад з прийнятого сигналу використовують вузьку частотну смугу. У результаті ефективність контролю ЕМА способом стає низькою.

Для розв'язання цієї проблеми запропоновано збуджувати ЕМАП пакетними імпульсами струму з заданими амплітудою, частотою заповнення, тривалістю, фазою. Комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження дозволили підтвердити ефективність використання пакетного імпульсу (рис.3 - 5). з виділенням пакетного імпульсу на фоні завад з допомогою смугових фільтрів.

Живлення ЕМАП пакетними імпульсами струму з заданими параметрами дозволяє використовувати сучасні методи обробки прийнятої реалізації, як це робиться, наприклад, в радіолокації або зв'язку. Одним з найбільш відомих методів є кореляційний. Проте повністю застосувати закономірності його використання для ЕМА способу контролю неможливо. Це обумовлено рядом протиріч. З одного боку для кращого виділення корисних імпульсів на фоні шумів і завад імпульс живлення ЕМАП повинен бути якнайдовшим, оскільки ефективність кореляційного аналізу цілком залежить від енергії сигналу. З другого боку для забезпечення контролю виробів малої товщини імпульс живлення ЕМА перетворювача повинен

бути коротким, бо прийняті УЗ імпульси будуть перекриватися в часі. Окрім того, при розповсюдженні пружних імпульсів в тілі виробу, на його поверхнях та внутрішніх включеннях виникають трансформовані хвилі різного характеру. Мають місце багатократні відбивання УЗ імпульсів між поверхнями виробу. Вони будуть сприйматись як когерентні завади. При розповсюдженні в матеріалі виробу амплітуда ультразвукових коливань послаблюється. Тому, з урахуванням малого коефіцієнту ЕМА перетворення, проблема створення ефективних ЕМА приладів розпадається на кілька різнопланових напрямків, які в першу чергу визначаються параметрами УЗ імпульсу, характеристиками виробу і властивостями його матеріалу, що підлягає УЗК.

Тому перший напрямок створення ЕМА приладів повинен реалізуватись при товщинометрії металовиробів з низьким рівнем послаблення енергії УЗ коливань (фіксується більше 8 - 10 донних імпульсів), наприклад, алюмінію та його сплавів. У такому випадку достатньо сформувати однополярний імпульс з регульованими амплітудою та тривалістю. Регулювання тривалості дозволяє оптимізувати робочу частину спектру сигналу для його виділення підсилювачем та самим виробом. Однополярний УЗ імпульс може бути прийнятним для використання в недорогих ЕМА товщиномірах для контролю трубної продукції, прутків, листів товщиною до 20 мм.

Другий напрямок повинен реалізуватись при контролі металовиробів з середнім послабленням енергії УЗ імпульсів (фіксується від 3 до 8 - 10 донних сигналів). При цьому необхідно використовувати імпульс живлення ЕМАП у вигляді пакету з регульованими частотою заповнення, амплітудою та тривалістю. Такі ЕМА прилади оптимально підстроюються для знаходження дефектів заданої величини шляхом регулювання частоти УЗ коливань та часу дії імпульсу. Майже вся енергія імпульсу зосереджена у вузькій частотній смузі ($<0,2...1$ МГц), що забезпечує ефективне використання вузькосмугових фільтрів, в тому числі лінійних. При контролі товщини за рахунок підвищення частоти заповнення (до 6 - 7 МГц з використанням зсувних хвиль) та часу дії пакетного імпульсу (1 - 3 періоди заповнення) забезпечується контроль виробів товщиною 0,7...1 мм і більше.

Третій напрямок повинен реалізовуватись при контролі металовиробів з високим послабленням енергії УЗ імпульсів (фіксується 1 - 2 донних сигналів) або з малим коефіцієнтом ЕМА перетворення. У цьому випадку необхідно формувати імпульс живлення ЕМАП у вигляді пакету з регульованими частотою заповнення, фазою, амплітудою та часом дії. Збуджений в контрольованому матеріалі і відбитий дефектом або протилежною поверхнею пакетний сигнал після прийому виділяється з шумів та завад з допомогою оптимального фільтра. При цьому, використовуючи результати робіт Тихонова В.І., Баскакова С.І., Вудворда

Ф.М. та інших, можна показати, що найбільш ефективним є кореляційний метод обробки прийнятої реалізації. У часовій області вихідний сигнал корелятора з відгуком $h(t)$ на взаємодію з сигналом $x(t)$, починаючи з часу $t = 0$, має вигляд інтегралу скрутки

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_0^t x(\tau)h(t - \tau)d\tau = \int_0^t x(t - \tau)h(\tau)d\tau. \quad (1)$$

З радіотехнічної літератури відомо, що на виході фільтра необхідно отримати максимальне значення відношення параметрів сигналу до шуму S/N , де S – пікова миттєва вихідна потужність сигналу, N – вихідна потужність шуму. Максимального значення S/N набуває в момент часу, рівний затримці T_d оптимального фільтра. Тоді, згідно з (1)

$$y(T_d) = \int_0^{T_d} x(\tau)h(T_d - \tau)d\tau = \int_0^{T_d} x(T_d - \tau)h(\tau)d\tau. \quad (2)$$

Дійсна частина миттєвої вихідної потужності на одиничному опорі складає $S = y^2(t)$. Повна нормована середньоквадратична вихідна потужність шуму σ^2 на виході оптимального фільтра дорівнює середньому значенню повної вихідної потужності шуму, тобто $\sigma^2 = \frac{N_0}{2} \int_0^\infty h^2(t)dt$, де $N_0(f) = N_0(-f)$ –

спектральна густина шумової потужності (Вт/Гц). Тоді, використовуючи нерівність Шварца, отримаємо вираз для максимального значення S/N . Маємо

$$\frac{S}{N} = \frac{\left| \int_0^{T_d} x(T_d - \tau)h(\tau)d\tau \right|^2}{\frac{1}{2} N_0 \int_0^\infty h^2(t)dt} \cdot \frac{S}{N} \leq \frac{\int_0^{T_d} x^2(T_d - t)dt \int_0^{T_d} h^2(t)dt}{\frac{1}{2} N_0 \int_0^\infty h^2(t)dt}. \text{ Звідси } \left(\frac{S}{N} \right)_{\max} = \frac{\int_0^{T_d} x^2(T_d - t)dt}{N_0/2} = \frac{\int_0^{T_d} x^2(t)dt}{N_0/2}.$$

Або
$$\left(\frac{S}{N} \right)_{\max} = \frac{2E}{N_0}, \quad (3)$$

де E – енергія сигналу. Відгук узгодженого (оптимального) фільтра з часом затримки T на імпульс з часом дії T має вигляд АКФ.

$$y(t) = \int_{t_0}^t x(\tau)x(T - t + \tau)d\tau. \quad (4)$$

При використанні ЕМА способу для товщинометрії єдиною характеристикою, що повинна вимірюватись, є час появи донних імпульсів. Для цього процесу з усіх складових апостеріорної густини вірогідності залишиться

$$p(\tau) = k \cdot p_0(\tau) \cdot \exp \left[2/N \int_0^T \xi(t)S(t - \tau)dt \right]. \quad (5)$$

Отриманий показник експоненти, який визначає τ , має вигляд нормованої кореляційної функції. Як видно з (5), час появи донного імпульсу визначається з максимальною точністю, оскільки максимум кореляційної

функції відповідає максимуму апостеріорної густини вірогідності.

Якщо на інформаційний сигнал діє значна завада або якщо сформований початковий сигнал змінюються при збудженні УЗ імпульсів, розповсюдженні в виробі та його прийомі ЕМАП чи в частотному фільтрі, що завжди має місце, то характеристики корелятора не будуть оптимальними. У цьому випадку маємо взаємкореляційний варіант аналізу прийнятої реалізації.

$$u_{\text{вих}}(T_d) = \alpha \int_{-\infty}^{\infty} u_{\text{вх}}(\tau) s_{\text{вх}}(\tau) d\tau, \quad (6)$$

де α величина, що менше 1. При цьому коефіцієнт передачі узгодженого фільтра близького до оптимального, повинен мати вигляд

$$K_{\text{кор}}(j\omega) = \alpha S_{\text{вх}}^* \exp(-j\omega T_d), \quad (7)$$

де $S_{\text{вх}}^*$ - комплексно-спряжений вхідний сигнал.

Модуль частотного коефіцієнта передачі фільтра повинен бути пропорційним модулю спектральної густини УЗ сигналу. При цьому імпульс на виході узгодженого фільтра набуде максимального значення.

З викладеного виходить, що максимум сигналу на виході узгодженого фільтра залежить від його енергії, яка, в свою чергу, залежить від його амплітуди, тривалості і спектрального складу. При максимальній встановленій амплітуді слід регулювати час дії імпульсу або збільшувати спектральний склад сигналу таким чином, щоб $\Delta f \tau_u \gg 1$. З радіотехніки відомо, що збільшити наведений добуток можливо за рахунок використання кодованих по амплітуді, фазі та частоті сигналів. При цьому для зменшення величини бокових пелюсток кореляційної функції доцільно використати додаткову вагову функцію, що дасть можливість збільшити співвідношення головного максимуму АКФ відносно додаткових до 1000 разів.

Таким чином, щоб забезпечити високу ефективність приладів для неруйнівного контролю ЕМА способом, необхідно виконати такі вимоги. Збуджувати УЗ коливання у вигляді пакетних імпульсів з регульованими амплітудою, частотою заповнення, фазою та часом дії. Обробку прийнятих з виробу корисних сигналів виконувати кореляційними методами. При цьому необхідно додатково забезпечити ЕМА прилади регуляторами амплітуди, частоти заповнення імпульсу, фази і тривалості, а також оптимальним фільтром. Узагальнений ЕМА прилад буде мати структуру, блок-схема якого показана на рис. 6. У приладі формувач 1 містить регулятор 8 частоти заповнення пакету, регулятор 9 тривалості пакету, регулятор 10 частоти зондування і регулятор 11 коду інформаційного сигналу. Виберемо, наприклад, фазокодований вид оптимального сигналу - тринадцятипозиційний код Баркера. Сформований оптимальний сигнал посилюється ГЗІ 2 до амплітуди, встановленої регулятором 12. ГЗІ 2 збуджує в широкосмуговому ЕМАП 3 імпульси високочастотного струму. Частотна смуга ЕМАП 3 в режимі збудження і прийому УЗ імпульсів

повинна бути на 10...15% більше смуги сформованого сигналу. Прийняті ЕМАП 3 інформаційні імпульси посилюються підсилювачем 5, також зі смугою пропускання, що на 10...15% більше ширини смуги сигналу, що приймається. Далі оптимальний фільтр 6, налаштований на сформований сигнал, стискає інформаційний імпульс. Одержана в результаті цього АКФ є максимальною. Для вибраного коду Баркера вона має рівень, у 13 разів більший, ніж у її бокових пелюсток, шуму та завад. Чутливість контролю підвищується. Аналогічно підвищується чутливість приладів при використанні пакетних імпульсів прямокутної форми та ЛЧМ сигналів.

У третьому розділі викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень взаємодії пакетних імпульсів з матеріалом виробів за наявності та відсутності в них дефектів. Розроблено методи, способи та обладнання з використання пакетних імпульсів для ЕМА контролю. Вивчено вплив технологічних і апаратних факторів на результати контролю.

Порівнювальні експериментальні дослідження контактних та ЕМА дефектоскопів при їх використанні для контролю якості виробів з «чорною» поверхнею вперше дозволили довести, що головною перевагою ЕМА приладів є висока стабільність амплітуди інформаційного сигналу. При контролі одних і тих самих ділянок виробів контактним методом амплітуда донних імпульсів змінювалася випадковим чином на 10...30 дБ проти 3...8 дБ при використанні ЕМА способу і збудженні пакетних ультразвукових імпульсів. Особливо ефективним є використання ЕМА приладів для автоматичного контролю, оскільки вплив повітряного зазору між ЕМАП та поверхнею металу вдалось компенсувати в діапазоні до 8 мм з точністю ± 1 дБ. При цьому дискові відбивачі діаметром 2 мм в сталі типу У7 виявляються ЕМАП з амплітудою луна сигналу в середньому 18 ± 3 дБ, а ПЕП - відповідно 14 ± 12 дБ.

Теоретично та експериментально доведено, що високоефективним є використання об'ємних імпульсів ЛПК для контролю виробів, які витягнуті при обробці переважно в одному напрямку, наприклад, катаних. Аналітично розв'язано задачу знаходження перетину γ_{np} розсіювання об'ємних ЛПК з хвильовим вектором ξ_1 для пружного середовища при луна методі контролю на моделі дефекту у вигляді витягнутого циліндра радіусом δ .

$$\gamma_{np} = \frac{2}{\xi_1 \delta} \sum_{m=0}^{\infty} (E_m^+)^2 \left[\left(B_m^* B_m + \frac{(2\mu_1 + \lambda_1)}{\mu_1} D_m^* D_m \right) \sin^2 \alpha + \mu_1 A_m^* A_m \cos^2 \alpha \right],$$

де μ_1, λ_1 - сталі Ламе для матеріалу пружного середовища, в якому знаходиться дефект; A_m, B_m, D_m та їх комплексно-спряжені пари – величини, що залежать від сталих Ламе для матеріалів середовища та дефекту, хвильових векторів зсувних та поздовжніх коливань для тих же матеріалів; α - кут між віссю дефекту та напрямком вектора поляризації. Експериментально встановлено, що в алюмінії сталый дефект діаметром 3

мм, при пакетному імпульсі тривалістю 6 періодів частоти заповнення 2,2 МГц, має луна сигнал який на 8 дБ більший за сигнал при орієнтації вектора поляризації перпендикулярної осі дефекту. При дзеркально-тіньовому контролі для забезпечення більшого послаблення донного сигналу вектор поляризації слід орієнтувати перпендикулярно напрямку найбільшого витягування виробу при його виготовленні. Для забезпечення відсутності впливу випадкових змін вектора поляризації, наприклад, під час автоматичного контролю, слід забезпечити сталість його орієнтації до ± 5 градусів відносно номінального значення. При ручному контролі використання ЛПК

Результати дослідження з виявлення плоскодонних відбивачів в рейкових зразках луна методом

Таблиця дозволяє визначити яку форму має знайдений дефект – колоподібну, чи плоску.

Експериментальні дослідження підтвердили високу чутливість знаходження моделей дефектів у вигляді плоскодонних відбивачів діаметром від 0,9 мм і більше в залізничних рейках, заготовках колоподібного та прямокутного

Зона контролю	Діаметр плоскодонного відбивача, мм	Відстань до відбивача, мм	Відношення ампл. луна-сигнал/шум, разів
Шийка рейки зверху	4	169,5	>33
	3	158	27
	2	162	11
	0,9	164	3,5
Головка рейки з бокової грані	3	62	30
	2	60,5	17
	0,9	59	6
Шийка рейки збоку в центральній частині	3	8,5	15
	2	7,9	7
	0,9	8,2	2

перетину, листах, виготовлених за різними технологіями та з різних сортів сталей пакетними імпульсами об'ємних ЛПК з частотами заповнення 2...5 МГц і тривалістю 2...8 періодів коливань. Поверхня зразків знаходилася в стані після прокатки і не зачищалася. Виділення сигналів з шумів та завад робилось з допомогою смугового фільтра. Типові дані наведено в таблиці. Аналогічні результати отримано при дослідженнях зразків, виготовлених із заготовок колоподібного та прямокутного перетину і листів, з моделями плоскодонних відбивачів. Порівняння чутливості пакетного збудження з ударним збудженням показали, що його чутливість більше на 20...30 дБ, з урахуванням впливу «чорнової» поверхні.

Встановлено ефект виявлення плоских тріщин, орієнтованих вздовж

напрямку розповсюдження зсувних ЛПК при орієнтації вектора поляризації нормально площині дефекту (рис. 7).

Пакетне збудження ЕМАП дозволяє збільшити чутливість контролю поверхневими хвилями. Чутливість контролю буде максимальною, якщо кількість робочих ділянок в індукторі Релеєвського ЕМА перетворювача буде відповідати кількості періодів частоти заповнення збуджуючого імпульсу струму. В цьому випадку виконується кореляційний принцип накачки початкового УЗ сигналу, а також виділення прийнятого пакета згідно з встановленою частотою заповнення та часом дії імпульсу. Реалізація такого підходу дозволяє виявляти на «чорновій» поверхні виробу дефекти глибиною 0,2 мм і більше, розкриттям 0,01 мм і більше та довжиною понад 1 мм. При частоті збуджуваних УЗ хвиль 1...1,2 МГц та тривалості пакета 4...6 періодів частоти заповнення контрольована довжина поверхні досягає 5...7 м. Це дозволяє з однієї позиції ЕМАП контролювати поверхню виробу з високою продуктивністю та спростити конструкцію механічного обладнання установки контролю. Підвищення чутливості контролю хвилями Релея дало можливість виявляти дефекти, які лежать за різкими зламами поверхні виробу (90 градусів). Встановлено, що цей ефект обумовлений подвійною дифракцією потужних поверхневих хвиль на границі різкої зміни кривизни поверхні.

Повністю розв'язано проблему наявності «мертвої» зони. Її розвезення побудоване на ефекті дифракції об'ємних ЛПК на границях поверхневого дефекту, або дефекту, який залягає під поверхнею на глибині до 30 мм. Спостерігається і зворотний фізичний механізм - посилення відлуння сигналу від дефекту, якщо від нього відбивається поверхнева хвиля. При цьому приймальний ЕМАП хвиль Релея розташовується над поверхневим дефектом. На основі виявлених ефектів розроблено метод УЗК, який дозволяє виключити «мертву» зону. Його суть полягає у збудженні ПЗК прямим ЕМА перетворювачем, скануванні їм виробу і фіксації хвиль Релея іншим ЕМАП, розташованим на відстані, достатній для виключення впливу перехідних процесів в ЕМАП, електричних колах генератора та підсилювача. Використання нового методу дозволяє знаходити дефекти на глибині від 0 до 30 мм у виробках з криволінійною і плоскою поверхнями.

Експериментально визначено, що один тип прямого сумісного ЕМА перетворювача ПЗК спроможний контролювати вироби з плоскою і криволінійною поверхнями. Наприклад, стрижні діаметром 6 мм і більше з чутливістю, не гіршою, ніж у «мокрого» методу, і з «мертвою» зоною, що не перевищує 3...4 мм.

Встановлено, що порівняно з «мокрим» методом ефективність виявлення плоских надтонких (<0,01 мм) дефектів, розташованих перпендикулярно відносно напрямку розповсюдження пакетних імпульсів зсувних УЗ коливань, підвищується на 15...17%. Виявляються

«розшарування», заповнені як газами, так і неметалічними включеннями типу сульфідів марганцю і заліза, оксисульфідів і оксидів, сполук на основі титану та ін. Такий ефект обумовлений слабкою можливістю передачі напруги зсуву на границі двох матеріалів, які значно відрізняються своїми пружними характеристиками. Тому контроль листів на дефект типу «розшарування» доцільно виконувати об'ємними зсувними УЗ коливаннями, використовуючи прямі ЕМАП.

Дослідження умов контролю нагрітого металу пакетними імпульсами також підтвердили високу ефективність їх використання. Так, залежність виявлення дефектів в феромагнітних матеріалах ПЗК має рівномірний характер при нагріванні від кімнатної до температури Кюрі – для більшості сталевих виробів це температура до 600 °С. В зоні температури Кюрі та за вищих температур (до 1100...1200 °С) для НК потрібно використовувати пакети поздовжніх коливань. Встановлено аномальне підвищення амплітуди пакетних імпульсів поздовжніх коливань в області температури Кюрі на 17...36 дБ. Величина підвищення залежить від хімічного складу феромагнітного матеріалу. Ці дані збігаються з висновками інших дослідників, які використовували ударне збудження УЗ імпульсів. Пояснити аномальне підвищення амплітуди сигналів можливо за рахунок поступової перебудови кристалічної та доменної структури матеріалу при зміні його температури. Короткочасно виникає аморфний стан частини об'єму металу, який, як відомо з літератури, має високі магнітні характеристики. Такий висновок підтверджується появою структурних шумів на прийнятих реалізаціях. Складність використання контролю нагрітих виробів ПЗК обумовлює необхідність збільшення нормальної компоненти поляризуючого магнітного поля до 1,5 Тл. Відповідно при контролі пакетними імпульсами поздовжніх хвиль тангенціальну компоненту необхідно встановлювати більше 0,7 Тл при амплітуді струму в провідниках індуктора ЕМАП до 100 А. Експериментально підтверджено можливість виконання контролю як дзеркально-тіньовим, так і луна методом до температур 1100 °С з виявленням плоскодонних відбивачів діаметром 12...18 мм. Цього достатньо для виявлення уражень металу, які виникають під час його твердіння. Досліджено вплив на результати УЗК температури контрольованого металу від 80 до 1200 °С, при повітряному прошарку між ЕМАП і металом від 0 до 5 мм, величин нормальної і тангенціальної складової індукції поляризуючого магнітного поля до 1,5 Тл, послаблення амплітуди УЗ коливань в нагрітому матеріалі на товщині до 200 мм, а також виявлення дискової моделі дефектів діаметром від 10 до 18 мм. Встановлено, що при виявленні дефектів із заданим розміром необхідно компенсувати не тільки послаблення амплітуди УЗ імпульсів залежно від глибини їх розташування, а і від температури контрольованого металу. Величини компонентів поляризуючого МП і зазор між ЕМАП і металом повинні бути

максимальними, а сталість величини зазору - не перевищувати $\pm 0,5$ мм. Запропоновано налаштувати ЕМА прилад на задані характеристики з допомогою зразків з неферомагнітного електропровідного матеріалу, що перебуває при нормальній температурі і характеристики якого аналогічні характеристикам нагрітого металу. Такі ж зразки слід використовувати для дослідження технологічних параметрів УЗ контролю феромагнітних виробів, нагрітих до температури, вищої за точку Кюрі.

Теоретично і експериментально визначено, що для ефективного контролю ЕМА способом заданого об'єму металу, що має клинову форму, необхідно збуджувати і приймати об'ємні зсувні коливання періодичною структурою провідників індуктора перетворювача. При цьому повинен забезпечуватися змінний крок структури відповідно до набігу фази хвилі, що розповсюджується у виробі. Виконано розрахунки форми і розмірів джгутів провідників ЕМАП для контролю головок рейок типу Р65 і Р75. Розроблено варіанти технології виготовлення і електронні схеми ЕМА перетворювача для високочутливого УЗК головки рейок. Дослідженнями встановлено, що на результати контролю головки рейок впливають зміни відстані від ЕМАП до поверхні металу, зміщення перетворювача щодо бічної грані головки, розвороти його подовжньої осі, а також індукція поляризуючого МП. Встановлено оптимальні значення і межі змін: відстань від ЕМАП до металу - $3 \pm 0,25$ мм; зміщення ЕМАП від номінального значення - до ± 1 мм; розворот його подовжньої осі - до ± 6 градусів. Індукція поляризуючого МП повинна бути максимально можливою, але не менше 0,9 Тл. При цьому максимальна абсолютна похибка вимірювання інформаційного сигналу не буде виходити за межі ± 1 дБ. Оптимізація впливу технологічних чинників дозволила забезпечити виявлення в головці рейок дефектів типу «розшарування», «неметалічні включення», «газові пузири» діаметром $> 1 \dots 3$ мм та інші.

У четвертому розділі викладено результати розробки та вдосконалення ЕМА перетворювачів різного призначення і типів.

Дослідження відомих котушок індукторів ЕМАП різної форми для збудження та прийому УЗ коливань показали, що вони можуть використовуватись і при живленні ПП в діапазоні частот заповнення 0,2...7 МГц тривалістю до 20 періодів, величині індукції поляризуючого МП до 1,5 Тл і амплітуді високочастотного струму 12...60 А. Оскільки більшість індукторів мають двопелюсткову діаграму спрямованості, то в електропровідних і феромагнітних елементах ЕМА перетворювача, розташованих в зоні дії його котушки збудження, виникають когерентні акустичні завади. Для виключення або істотного зменшення амплітуди перешкод такого типу запропоновано використовувати електропровідні або електромагнітні екрани, а також виготовляти близько розташовані до котушки індуктивності ЕМАП елементи конструкції з матеріалів, що мають

низький коефіцієнт ЕМА перетворення, наприклад, з латуні ЛС63. Для збудження і прийому об'ємних зсувних і поздовжніх хвиль необхідно виділяти робочі ділянки котушок індуктивності перетворювача і формувати під цими ділянками МП з максимально можливим значенням індукції. В поєднаних і роздільно-поєднаних ЕМАП для універсальної дефектоскопії і вимірювання товщини ПЗК робочі ділянки високочастотних котушок індуктивності повинні мати лінійні ділянки провідників із заданими розмірами. Поляризуюче МП повинне формуватися тільки в зоні дії електромагнітного поля, сформованого цими робочими ділянками. В роздільно-поєднаних ЕМАП робочі лінійні ділянки провідників ВЧ котушок повинні розташовуватися паралельно. В ЕМАП, призначених для контролю феромагнітних виробів, формування МП необхідно проводити у присутності металу в зоні контролю. В «ручних» ЕМАП для НК феромагнітних виробів необхідно використовувати джерело поляризованого постійного МП з мінімально можливою величиною добутку величини індукції на площу полюса магнітної системи. Для забезпечення високочутливого і завадозахищеного контролю дзеркально-тіньовим методом і вимірювання товщини виробів з еквідистантними поверхнями (труби, листи, оболонки та інші) площа робочих ділянок котушок індуктивності повинна бути максимальною при дії в цій же зоні поляризованого МП. Крім того, контроль оптимально виконувати із застосуванням неелектропровідної плівки завтовшки 0,1 мм і більше, розташованої між ЕМАП і поверхнею контрольованого виробу. Завдяки такому рішенню термін служби ЕМАП збільшується в 12...15 разів.

Розроблено принцип одержання максимальної величини індукції МП витісненням і переорієнтацією напрямку векторів індукції джерела ЕМАП шляхом формування майже замкнутого об'єму, обмеженого поверхнею, на якій створюється магнітний полюс одного знака. При цьому максимальна індукція буде сформована в єдиному напрямі, де однополюсна внутрішня поверхня джерела МП матиме розрив заданих розмірів і форми. Виведення МП із замкнутого об'єму здійснюється за допомогою феромагнітного матеріалу з високою індукцією насичення, набраного з пластин завтовшки не більше 0,5 мм. Між пластинами набраного пакета повинна бути рідина з високим послабленням ультразвукових коливань, наприклад, гліцерин. Пластини в набраному пакеті заданих форми і розмірів повинні між собою бути електрично ізольовані.

Концептуальні підходи дозволили розробити і виготовити ЕМАП, призначені для дефектоскопії, товщинометрії і визначення фізико-механічних характеристик матеріалів і виробів об'ємними зсувними і поздовжніми хвилями, хвилями Релея, а також нормальними хвилями. ЕМАП для контролю імпульсами зсувних хвиль реалізовано у варіантах з будь-яким напрямком вектора поляризації УЗ коливань, включаючи кругову

і таку, що обертається під час збудження. ЕМА перетворювачі за своїми характеристиками узгоджені з ГЗІ і підсилювачем з урахуванням елементів його конструкції, по частотній смузі, імпедансу, струму і напрузі. Розроблено принцип узгодження котушки індуктивності поєданого ЕМАП з генератором пакетних імпульсів і підсилювачем приладу НК із захистом входу підсилювача від дії потужного зондуючого імпульсу, а також від дії завад, що виникають в генераторі і схемі узгодження. Це дозволило додатково підвищити чутливість контролю в 3...5 разів.

У п'ятому розділі викладено результати роботи по створенню товщиномірів і дефектоскопів для контролю металовиробів різного типу і призначення.

У портативному приладі для вимірювання товщини тонкостінних ОК, розробленому за першим сформульованим напрямком, для формування однополярних імпульсів з регульованою амплітудою і тривалістю вперше використано генератор на основі ключових елементів IGBT. Ці елементи більш ефективні порівняно з раніше використовуваними тиристорами, які також можуть комутувати значний струм, але мають невизначений час виключення і тому не забезпечують необхідне регулювання тривалості імпульсів. Для прийому УЗ імпульсів з ОК був розроблений широкосмуговий ЕМАП з індуктором, котушка якого має 20 витків дроту з робочою зоною 4x6 мм² без використання узгоджувачих конденсаторів. Індукція постійного МП дорівнювала 0,6 Тл. Підсилення прийнятих сигналів виконувалось смуговим підсилювачем з діапазоном 0,6...13 МГц. Типова прийнята реалізація, яка отримана розробленим ЕМА товщиноміром, наведена на рис. 8.

Багатоцільовий портативний ЕМА товщиномір (рис. 9), розроблений за третім сформульованим напрямком, виготовлено на основі елементної бази, яка має малу енергію споживання і малу масу. Дослідження дозволили встановити, що для його генератора пакетних імпульсів також необхідно використовувати польові транзистори і IGBT. Такі радіоелементи витримують напругу до 1200 В і в ключовому режимі здатні комутувати струм до 100 А з частотами до 7 МГц

У підсилювачах для прийому УЗ сигналів використано спеціалізовані мікросхеми типу AD603 і AD604 виробництва фірми «Analog Devices» Вони мають мінімальне споживання енергії при високому співвідношенні корисний сигнал/шум. Згадані мікросхеми дозволяють управляти коефіцієнтом їх посилення в широких межах. Вказані характеристики реалізовано при малих габаритах за рахунок застосуванням SMD технологій. Для формування «свого» сигналу у вигляді пакета з декількома періодами заповнення з частотою до 8 МГц достатньо застосувати мікропроцесор типу AT90S1200-16. У той же час встановлено, що як пристрої для обробки прийнятого ЕМАП «свого» сигналу оптимально

використовувати сучасні мікропроцесори типу ADUC831, ADUC841, мікроконвертери типу 7026 виробництва фірми «Analog Devices». Ці прилади дозволяють проводити операції по обчисленню АКФ і ВКФ при низькому споживанні енергії. Тому в товщиномірі були застосовані одночасно АТ90S1200-16 і ADUC841.

Для вимірювання товщини використовуються імпульси об'ємних ЛПК з частотою заповнення 3 МГц та тривалістю в 3 періоди. Дослідженнями роботи товщиноміра встановлено, що похибка вимірювання по катаній поверхні складає $\pm 0,1$ мм, діапазон контрольованої товщини - 2...45 мм, радіус кривизни виробів – від 6 мм, відстань між ЕМАП і контрольованим металом – до 3 мм. Живлення від батарей типу «Крона» та пальчикових. Маса електронного блока 1,4 кг, а ЕМАП – 0,35 кг.

За третім сформульованим напрямком розроблено 4- канальний товщиномір для автоматичного контролю товщини безшовних труб з товщиною стінки 3...12 мм на базі DSP та стандартного РС. Апаратну частину товщиноміра можна умовно розділити на 2 частини – аналогову та цифрову. Остання складає сукупність апаратної платформи та програмного інтерфейсу, реалізованих на базі стандартного РС. Один канал аналогової частини показано на рис. 10. Його основу складають: поєднаний ЕМАП масою менше 30 г., ГЗІ, який формує імпульси струму з частотою 2...3 МГц та тривалістю, що відповідає одному періоду коливальних. Амплітуда струму в індукторі перетворювача складає 40 А при напрузі живлення 800 В. Величина нормальної компоненти індукції МП в повітряному прошарку між ЕМАП і поверхнею труби в 1 мм складає 1,2 Тл. Підсилення прийнятих сигналів на 60 дБ по кожному з каналів виконується після послідовної комутації. Фільтрація робиться з допомогою DSP вейвлетним цифровим фільтром. Подальша обробка прийнятої реалізації виконується шляхом побудови АКФ кількох накопичених реалізацій. Програмна оболонка управління має два блоки. Один діє під час калібровки товщиноміра на заданій товщині ділянки СЗП з відомими акустичними характеристиками. Другий відображає отриману інформацію на екрані монітора (рис. 11). Якщо товщина стінки труби більше або менше встановлених значень, то через модуль DSP видається сигнал «брак» на автоматичну систему розподілу труб. Таким чином виконується автоматичний контроль товщини труб діаметром 42...115 мм на швидкості 1 м/с з похибкою вимірювання $\pm 0,1$ мм. Автоматичний товщиномір введено в експлуатацію ЗАТ «НІКО ТЬЮБ» 20.07.2001 р.

Більш складною проблемою є розробка ЕМА дефектоскопа (за третім сформульованим напрямком). Так, в каліброваних прутках (ГОСТ 4543 та 1414) трапляються дефекти у вигляді краплень свинцю. Тому потрібно забезпечити максимальну чутливість дефектоскопа, еквівалентну плоскодонному відбивачу діаметром не більше 1,2 мм - для внутрішніх

дефектів, і канавці $0,5 \times 0,5 \times 50 \text{ мм}^3$ - для поверхневих дефектів. Половинну блок-схему розробленого дефектоскопа показано на рис. 12. Друга половина приладу аналогічна.

Конструкцію ЕМАП для контролю внутрішніх та поверхневих дефектів показано на рис. 13. Одним перетворювачем для контролю внутрішніх дефектів забезпечується дефектоскопія колоподібних прутків діаметром 10...40 мм і шестигранних, з відстанню між гранями 12...36 мм. Він виявляє дефекти, еквівалентні плоскодонному відбивачу діаметром 1,2 мм і більше при частоті УЗК 5,6 МГц з тривалістю імпульсу 3 періоди частоти заповнення. Для виявлення поверхневих дефектів використовуються 2 окремих ЕМАП з частотою 1,2 МГц і тривалістю імпульсу в 3 періоди. Живлення ЕМАП забезпечувалось оригінальним двотактним ГЗІ (підсилювач пакетних імпульсів), розробленим на базі польових транзисторів IRF510, IRF530, IRF540 та біполярних транзисторів з ізольованим затвором. Це забезпечило пікову вихідну потужність в імпульсі близько 10 кВт в смузі частот 0,2...6 МГц. Прийнята реалізація надходить на підсилювач на основі спеціалізованої мікросхеми AD604, яка забезпечує підсилення 60 дБ з рівнем шуму не більше 0,7...0,8 нВ/Гц^{0,5}. Підсилений сигнал перетворюється в цифровий і тимчасово зберігається в буфері FIFO. Після цього виконується скрутка цифрової реалізації з сигналом-зразком для отримання взаємкореляційної функції (рис. 14). Розроблений дефектоскоп (рис. 15) переданий ВАТ «Металургійний завод ім. А.К. Серова». Дефектоскоп призначений для ультразвукового контролю луна- та дзеркально-тіньовим методами каліброваних прутків колоподібного та шестигранного перетину без зачистки поверхні з використанням об'ємних зсувних та поверхневих хвиль. Прилад має трирівневу світлову і звукову сигналізацію, а також релейний вихід для керування системою сортування прутків за рівнем якості.

ЕМА контроль залізничних рейок потребує для забезпечення умов контролю збільшення пікової потужності збуджуючого сигналу. Розроблено двотактний ГЗІ на біполярних транзисторах КТ926, п'ять пар яких включено паралельно, з частотною смугою 0,5...3 МГц. Це дозволило на частоті 2,3 МГц та тривалості імпульсу 3...6 періодів частоти заповнення виявляти в рейці плоскодонні відбивачі діаметром 0,9 мм і більше на відстані до 170 мм. Відображення реалізації на виході аналогової частини пристрою для контролю рейок (за другим сформульованим напрямком) показано на рис. 16. Для підсилення реалізації на 80 дБ з малим шумом використано блок на базі подвійного балансного модулятора 174ПС1. Подальше використання кореляційної обробки дозволяє автоматизувати процес дефектоскопії рейок. При цьому, для забезпечення стабільної відстані між ЕМАП і рейкою, розроблено перетворювачі, які можуть котитися по поверхні металу.

Для контролю рейок, на відміну від відомих засобів, розроблено пристрої, які дозволяють контролювати всю складну за формою поверхню рейок хвилями Релея. Вони також дозволяють якісно виконувати контроль поверхневих та внутрішніх дефектів труб луна методом (рис. 17 і 18). Одночасно можна виконувати контроль тіньовим та дзеркально-тіньовим методами. При цьому використовується реалізація з багатьма імпульсами, які оббігли трубу по периметру (рис. 19). Таким чином, реалізація пакетного збудження в ЕМА приладах показує, що за своїми експлуатаційними характеристиками вони досягають рівня «мокрих» засобів НК.

Окрім дефектоскопії та товщинометрії ЕМА спосіб забезпечує високу ефективність при визначенні фізико-механічних властивостей металів. Це обумовлено низьким впливом ЕМАП на досліджувану ділянку матеріалу. Об'ємними ЛПК, орієнтованими у взаємно перпендикулярному напрямках, легко визначається анізотропія. Поверхневими хвилями, з використанням УЗ коливань різних частот, пошарово визначаються акустичні характеристики на різній глибині виробу, наприклад, міцність гартування. При цьому кореляційний аналіз пакетного імпульсу дозволяє отримувати вузький пік АКФ і визначати фізико-механічні властивості матеріалу з високою точністю.

У шостому розділі викладено результати досліджень особливостей використання метрологічного забезпечення ЕМА приладів та технологій їх використання.

При «мокрому» контролі загальну максимальну похибку визначають: товщина шару контактної рідини Δ_h , шорсткість поверхні виробу Δ_z , зміна тривалості і крутизни переднього фронту відлуння імпульсу Δ_t , зміна рівня вимірюваного сигналу Δ_A , похибка індикаторного пристрою Δ_i , невідповідність розмірів стандартного зразка Δ_r , зміна швидкості звуку Δ_c через неоднорідність хімічного складу матеріалу, зміна характеристик ПЕП, через зміну температури і старіння Δ_T , а також похибки, обумовлені зміною характеристик передавальних шарів ПЕП Δ_p . Значну добавку Δ_R в сумарну похибку вносить кривизна поверхні уведення-виведення УЗ хвиль і перекося положення ПЕП від заданого щодо поверхні ОК $\Delta_<$ положення. Тоді максимальна абсолютна похибка при контролі приладом з ПЕП складе

$$\Sigma \Delta_{\text{ПЕП}} = \Delta_h + \Delta_z + \Delta_t + \Delta_A + \Delta_i + \Delta_r + \Delta_c + \Delta_T + \Delta_p + \Delta_R + \Delta_<. \quad (8)$$

Використання ЕМА товщиномірів, що збуджують і приймають пакетні імпульси з їх подальшою оптимальною обробкою, приводить до виключення з перерахованих вище похибок, обумовлених впливом товщини шару контактної рідини (за її відсутністю), тривалістю і крутизною фронту УЗ імпульсу і рівнем сигналу - за рахунок використання кореляційних методів обробки реалізацій. Виключаються також похибки, що виникають через зміну характеристик перетворювача і його передавальних шарів за рахунок старіння і стирання.

Оскільки ЕМАП збуджує УЗ імпульси в металі за рахунок дії магнітного і електромагнітного полів, слід чекати формування похибок, обумовлених глибиною проникнення електромагнітних хвиль в метал Δ_e , впливом поляризуючого МП при контролі феромагнітних виробів Δ_m , властивостями поверхні матеріалу Δ_o . Експериментальні дослідження перерахованих чинників показали, що в діапазоні частот 1...5,5 МГц похибки, які виникають через їх вплив (в області використання ЕМА приладів), в більшості випадків можна не враховувати. Показано, що похибки, обумовлені кривизною поверхні та її корозією також незначні. Викладене дало підставу стверджувати, що при вимірюванні товщини ЕМА способом максимальна абсолютна похибка є значно меншою, ніж при контролі з допомогою ПЕП. Ці результати підтверджено експериментально.

Показано, що, на відміну від контактних приладів, калібровка ЕМА товщиномірів на задану товщину (швидкість розповсюдження УЗ коливань) може виконуватись на СЗП з плоскою поверхнею. Під час автоматичної товщинометрії на результати вимірювань не впливають перекося та зміщення ЕМАП відносно поверхні контролюваного виробу. Тому і автоматична товщинометрія ЕМА способом має меншу похибку вимірювань. Інші вимоги такі ж, як і для контактних товщиномірів.

Дослідження з виявлення плоскодонних відбивачів ПЗК показали, що принципіальних відмін від контактних дефектоскопів немає. При знаходженні моделей дефектів у вигляді зарубок SH коливаннями необхідно витримувати заданий напрямок вектора поляризації в межах ± 5 градусів. Це виключить появу імпульсів завад від трансформованих хвиль. У протилежному разі похибка вимірювань еквівалентних розмірів дефекту буде залежати від напрямку вектора поляризації. Аналогічні вимоги ставляться і до моделей дефектів, які не симетричні за формою. Калібровку дефектоскопів, як і у випадку контактної контролю, необхідно виконувати з допомогою СЗП з заданими моделями дефектів – плоскодонних, зарубок, циліндричних свердловин та інших.

На результати дефектоскопії можуть впливати випадкові зміни технологічних чинників: струму Δ_i в котушці індуктора ЕМАП, величини індукції Δ_B поляризуючого МП, розміру повітряного прошарку Δ_h між ЕМАП і металом, зміни орієнтації вектора поляризації Δ_n

$$\Sigma \Delta_{\text{ЕМАП}} = \Delta_i + \Delta_B + \Delta_h + \Delta_n . \quad (9)$$

При ручному контролі, з попередньою калібруванням дефектоскопа на СЗП, за високої стабільності сигналу вплив перерахованих чинників буде виключений. Тому похибка вимірювання амплітуди інформаційного сигналу зменшується в кілька десятків разів, що було підтверджено експериментально в розділі 3 роботи. При автоматичному ЕМА контролі можуть виникати випадкові коливання величин Δ_B і Δ_h . Тому механічне обладнання дефектоскопа повинне виключати або зменшувати вплив

наведених факторів. Крім того, ефективним є збільшення площі полюсного наконечника та розмірів котушки індуктивності індуктора ЕМАП а також використання електронних засобів компенсації впливу вказаних чинників.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення науково-практичної проблеми і її нове розв'язання, що полягає у створенні сучасних приладів на основі ЕМА способу збудження і прийому ультразвукових пакетних імпульсів. На базі узагальнення технологічних і технічних характеристик, конструкцій і дії ультразвукових приладів з ЕМА перетворювачами розвинуто концепцію створення дефектоскопів, товщиномірів та засобів для визначення фізико-механічних властивостей матеріалів. Досліджено взаємодію пакетних імпульсів з пружним середовищем виробу без зачистки його поверхні, в гарячому і холодному стані, з криволінійною поверхнею або з неелектропровідним покриттям. Встановлено особливості впливу основних характеристик пружних імпульсів, які збуджені ЕМАП, на знаходження дефектів та вимірювання товщини виробів. Узагальнено результати теоретичних і експериментальних досліджень, на основі яких розроблено і виготовлено прилади для ЕМА контролю, що доповнюють сукупність традиційних ультразвукових засобів НК.

1. На основі комп'ютерного моделювання та теоретичних досліджень розроблено і обґрунтовано основний принцип підвищення чутливості ЕМА приладів, що полягає в живленні ЕМАП пакетними імпульсами струму із заданими параметрами.

2. Розв'язано проблему створення нового класу ефективних приладів для ЕМА контролю виробів. Суть її розв'язання полягає в попередньому формуванні інформаційного імпульсу з регульованими індивідуальними відмітними ознаками, збудженні такого ж УЗ імпульсу в досліджуваному ОК, прийомі відбитих імпульсів з виробу, посиленні і виділенні одержаної інформації з урахуванням відмітних ознак сформованого сигналу. При цьому, залежно від акустичних і інших характеристик контрольованого матеріалу, а також наявності шумів і завад, інформаційний імпульс необхідно формувати або однополярним з регульованими тривалістю і амплітудою, або пакетним з тривалістю 1...10 періодів заданої частоти і встановленою амплітудою, або у вигляді складного пакетного сигналу, що відповідає умові $\tau_{\text{и}} \Delta f \gg 1$.

3. На основі теоретичних і експериментальних досліджень, для дефектоскопії виробів виготовлених за технологією витягування, розроблено методику контролю луна методом пакетними імпульсами пружних об'ємних зсувних лінійно-поляризованих коливань, яка дозволила підвищити чутливість контролю на 8 дБ. При цьому також можливо оцінювати форму знайденого дефекту.

4. Встановлено головну перевагу приладів з ЕМАП, в порівнянні з ПЕП, при контролі ділянок виробів з «чорною» поверхнею – висока стабільність амплітуди інформаційних сигналів. Випадкові коливання амплітуди прийнятого ЕМАП пакетного сигналу менші на 7...22 дБ, а при контролі ділянок виробів з шліфованою поверхнею - на 2...8 дБ, в порівнянні з контролем контактним методом.

5. Експериментально доведено, що використання результатів виконаних досліджень дозволило підвищити чутливість ЕМА контролю. При дефектоскопії луна методом об'ємними зсувними ЛПК, сформованими у вигляді пакетів з тривалістю 3...10 мкс і частотою заповнення 1,8...3 МГц, виявляються внутрішні дефекти, еквівалентні плоскодонному відбивачу діаметром 0,9 мм і більше на відстанях до 170 мм. При контролі луна методом імпульсами поверхневих коливань у вигляді пакетів з тривалістю 4...20 мкс і частотою заповнення 0,2...1,3 МГц виявляються поверхневі дефекти, еквівалентні канавці глибиною 0,2 мм і більше з розкриттям понад 0,01 мм. Встановлено широкі можливості знаходження поверхневих дефектів на відстанях до 7 м, на опуклій і увігнутій поверхнях з радіусом кривизни більше 6 мм, за зламом поверхні під кутом 90°. Визначено і оцінено чинники, які впливають на результати контролю, і розроблено підходи по зменшенню їх впливу. Результати досліджень і розробок використано в галузевому стандарті на ЕМА дефектоскопи для контролю залізничних рейок в колії і в методиці контролю зварних швів рейок УІС 60.

6. Розроблено методику ультразвукового контролю без «мертвої» зони на глибинах 0...30 мм від поверхні виробу. Проблему «мертвої» зони розв'язано шляхом збудження пакетів імпульсів об'ємних зсувних коливань прямим ЕМА перетворювачем, сканування виробу і фіксації хвиль Релея прийомним електромагнітно-акустичним перетворювачем при появі дефекту в акустичному полі прямого ЕМАП. Встановлено, що нова методика контролю базується на фізичному ефекті дифракції на дефекті і подальшій трансформації хвиль на поверхні об'єкта контролю.

7. Розвинуто принципи побудови ЕМА перетворювачів для збудження і прийому об'ємних ультразвукових зсувних і подовжніх хвиль, поверхневих хвиль Релея, нормальних хвиль, а також комбінацій цих хвиль в діапазоні частот від 0,2 до 6 МГц з можливістю збудження пружних коливань з лінійною, криволінійною, круговою поляризацією і поляризацією, що має обертовий характер. Розроблено принципи побудови джерел постійного і імпульсного поляризованого магнітного поля ЕМАП, що забезпечують концентрацію нормального компоненти індукції в заданому об'ємі поверхні ОК до 1,5...1,6 Тл на відстані 0,5...1 мм за рахунок витіснення і переорієнтації магнітних силових ліній. Новизна розробок захищена 8 авторськими свідоцтвами.

8. Розроблено транзисторні генератори пакетних імпульсів з піковою потужністю понад 10 кВт в діапазоні частот 0,2...6 МГц тривалістю 1...7 періодів заповнення і підсилувачі з рівнем шуму не більше 0,7...0,8 нВ/Гц^{0.5}.

9. Розроблено ЕМА товщиноміри, дефектоскопи і прилади для визначення фізико-механічних властивостей матеріалів. Прилади дозволяють контролювати якість виробів і матеріалів об'ємними зсувними і подовжніми хвилями, поверхневими хвилями, а також нормальними хвилями. За чутливістю та величиною "мертвої" зони вони не поступаються "мокрим" засобам, а за можливостями контролювати забруднені, нагріті або покриті ізоляцією вироби - вони перевершують їх.

10. Експериментально доведено, що для настройки і перевірки характеристик ЕМА товщиномірів, призначених для неруйнівного контролю виробів з різною формою поверхні, достатньо використовувати плоскопаралельні зразки з заданою товщиною. Встановлено зменшення похибок вимірювання товщини виробів ЕМА товщиномірами, порівняно з традиційними приладами. Воно обумовлено виключенням впливу на результати контролю властивостей і товщини шару контактної рідини, кривизни поверхні збудження/прийому, наявності неелектропровідних покриттів, використанням для вимірювань пакетів зсувних ультразвукових коливань, відсутністю впливу температури тощо. Визначено, що для настройки і перевірки ЕМА дефектоскопів доцільно використовувати стандартні зразки з такими ж моделями дефектів, як і для настройки і перевірки традиційних дефектоскопів, призначених для контролю об'ємними зсувними, подовжніми, поверхневими і нормальними хвилями.

11. Розроблені ЕМА дефектоскопи, товщиноміри і установки контролю впроваджені на підприємствах України і Росії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гарькавый В.В., Сучков Г.М., Катасонов Ю.А., Малахов А.В. Базовые установки неразрушающего контроля заготовок и рельсов // Сталь.- М., 1997. - № 4. - С. 48-49.

Здобувач взяв участь в розробці ЕМА перетворювачів, які котяться по поверхні виробу, та обґрунтував структуру побудови базових комплектів установок ультразвукового контролю заготовок.

2. Сучков Г.М., Катасонов Ю.А. О практической применимости ЭМА преобразователей для дефектоскопии поверхности изделий сложной формы эхометодом // Дефектоскопия. – Екатеринбург, 1999. - № 10. - С. 15-19.

Здобувач розробив ЕМА перетворювачі, високочутливий підсилувач. Він взяв участь в розробці і виготовленні макета ЕМА дефектоскопа. Виконав експериментальні дослідження луна методом. Довів високу ефективність використання пакетних поверхневих хвиль для знаходження дефектів на горизонтальній та криволінійній поверхнях.

3. Сучков Г.М., Катасонов Ю.А. Экспериментальные исследования нового способа бесконтактной ультразвуковой дефектоскопии труб эхо методом // Дефектоскопия. – Екатеринбург, 1999. - № 11. - С. 77-80.

Здобувач розробив ЕМА перетворювачі, високочутливий підсилювач. Він взяв участь в розробці і виготовленні макета ЕМА дефектоскопа. Виконав експериментальні дослідження луна методом. Довів високу ефективність одночасного використання об'ємних та поверхневих пакетних ультразвукових коливань для знаходження дефектів в тілі і на поверхнях труб різної товщини та діаметра.

4. Сучков Г.М. Определение сечения рассеяния сдвиговых линейно-поляризованных УЗК с произвольной ориентацией вектора поляризации на длинном круговом цилиндрическом дефекте // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – К., 2000. - № 2. - С. 3-9.

5. Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения поверхностных волн при контроле ЭМА способом // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – К., 2000. - № 3. - С. 33-35.

6. Сучков Г.М., Гарькавый В.В., Катасонов Ю.А. Экспериментальное исследование чувствительности ЭМА преобразователей при дефектоскопии эхометодом сдвиговыми объемными волнами // Дефектоскопия. - Екатеринбург, 2000. - № 2. - С. 12-16.

Здобувач розробив ЕМА перетворювачі для збудження об'ємних зсувних коливань нормально поверхні металу, високочутливий підсилювач. Він взяв участь в розробці і виготовленні макета ЕМА дефектоскопа. Виконав експериментальні дослідження луна методом. Довів високу ефективність поверхневих пакетних ультразвукових коливань для знаходження дефектів в тілі і на поверхнях труб різної товщини та діаметра.

7. Сучков Г.М. О главном преимуществе ЭМА способа // Дефектоскопия. - Екатеринбург, 2000. - № 10. - С. 67-70.

8. Сучков Г.М., Катасонов Ю.А., Гарькавый В.В. Ультразвуковой контроль труб // Газовая промышленность. – М., 2000. - № 12. - С. 49-50.

Здобувачем виконано дослідження з використанням макету ЕМА дефектоскопа газових труб та муфт, обґрунтовано побудову таких приладів та встановлені параметри ультразвукових імпульсів, що повинні використовуватися для дефектоскопії і товщинометрії.

9. Гарькавый В.В., Сучков Г.М., Катасонов Ю.А. Галузевий стандарт України ГСТУ 32.2.04.001-2000 “Дефектоскопи ультразвукові для контролю рейок при їх експлуатації. Технічні вимоги” / Затверджено та надано чинності наказом № 400 Міністерства транспорту України від 24.07.2000 р. Зареєстровано Українським науково-дослідним інститутом стандартизації, сертифікації та інформатики Держстандарту України 07.09.2000 р. За № 804/200444. - 16 с.

Здобувачем обґрунтовано вимоги до основних параметрів та характеристик ЕМА дефектоскопів для ультразвукового контролю залізничних рейок в колії луна та дзеркально-тіньовим методом.

10. Сучков Г.М., Михайлова И.В., Савон А. И., Гонжала А. Г. Исследование несплошностей в листах // Дефектоскопия. - Екатеринбург, 2001. - № 3. - С. 83-87.

Здобувачем розроблено макети ЕМА приладів, виконано експериментальні ультразвукові дослідження та аналіз отриманих результатів.

11. Сучков Г.М., Ваврив Д. М. Способ обработки информации при скоростном неразрушающем контроле // Дефектоскопия. - Екатеринбург, 2001. - № 8. - С. 50-52.

Здобувачем виконано теоретичні дослідження, на основі яких розроблено метод швидкісного ультразвукового контролю.

12. Сучков Г.М. Высокочувствительный электромагнитно-акустический преобразователь // Контроль. Диагностика. – М., 2001. - № 10. - С. 30-32.

13. Сучков Г.М. Разработка технологии и аппаратуры для ЭМА толщиномера // Контроль. Диагностика. – М., 2001. - № 11. - С.38-39.

14. Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения упругих волн, возбужденных ЭМА способом // Контроль. Диагностика. – М., 2001. - № 12. - С.36-39.

15. Сучков Г.М. Исследования ЭМА способом выявляемости плоскодонных отражателей в образцах из различных материалов // Контроль. Диагностика. – М., 2002. - № 5. - С. 50-51.

16. Сучков Г.М. Обработка информации. Возможности корреляционного анализа при толщинометрии ЭМА способом // Контроль. Диагностика. – М., 2002. - № 8. - С. 37-40.

17. Ваврив Д.М., Сучков Г.М., Виноградов В.В., Волков В.А., Кожин Р.В., Алексеев Е.А Создание электромагнитно-акустического толщиномера для контроля тонкостенных труб // Дефектоскопия. - Екатеринбург, 2002. - № 10. - С. 7-13.

Здобувачем обґрунтовано структуру автоматичного 4- канального товщиноміра з використанням обробки прийнятих ультразвукових пакетних імпульсів оптимальним фільтром.

18. Сучков Г.М., Себко В. П., Алексеев Е. А. Оптимизация параметров ЭМА толщиномеров для контроля тонкостенных изделий // Дефектоскопия. - Екатеринбург, 2002. - № 12. - С. 21-28.

Здобувачем теоретично, та з допомогою комп'ютерного моделювання обґрунтовано ефективність використання пакетних імпульсів для ультразвукового контролю ЕМА способом.

19. Себко В. П., Сучков Г.М., Горкунов Б. М. Новый способ обнаружения дефектов металлов с помощью электромагнитно – акустических преобразователей // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2003. - № 1. - С. 54-58.

Здобувачем запропоновано використовувати для дефектоскопії одночасно збудження зсувних коливань і прийом дифрагованих поверхневих хвиль.

Розроблено спосіб знаходження дефектів без “мертвої” зони. Спосіб підтверджено результатами експериментальних досліджень.

20. Себко В.П., Сучков Г.М. Электромагнитно - акустический способ неразрушающего контроля. Часть 1. Эффект электромагнитно-акустического преобразования // Український метрологічний журнал. - Харків, 2003. Вып. 1. - С. 35-38.

Здобувачем обґрунтовано переваги та недоліки ЕМА способу при його використанні для дефектоскопії та товщинометрії виробів в складних умовах. Визначено основні напрямки досліджень, спрямованих на підвищення чутливості ЕМА приладів.

21. Себко В.П., Сучков Г.М., Горкунов Б.М. Электромагнитно-акустический способ неразрушающего контроля. Часть 2. Электромагнитно-акустические преобразователи // Український метрологічний журнал. - Харків, 2003. - Вып. 2. - С. 20-25.

Здобувачем розроблено основні принципи побудови ЕМА перетворювачів різного типу і призначення.

22. Сучков Г.М., Себко В.П. Новые возможности дефектоскопии рельсов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2003. - № 9. - С. 87-90.

Здобувачем розроблено схеми виконання ультразвукового контролю залізничних рейок луна методом об'ємними та поверхневими хвилями, а також дзеркально-тіньовим методом.

23. Себко В. П., Сучков Г.М., Камардин В.М. Чувствительность ЭМА способа контроля железнодорожных рельсов ЗТМ // Дефектоскопия. - Екатеринбург, 2004. - № 3. - С. 31-42.

Здобувачем розроблено ЕМА перетворювачі та виконано експериментальні ультразвукові дослідження впливу технологічних та апаратних факторів на результати ультразвукового контролю пакетними імпульсами зсувних коливань дзеркально- тіньовим методом.

24. Себко В. П., Сучков Г.М., Малахов А.В. Ультразвуковой контроль головки рельсов ЭМА способом // Дефектоскопия. - Екатеринбург, 2004. - № 7. - С. 17-25.

Здобувачем теоретично обґрунтовано ефективність контролю виробів з складною поверхнею, отримано аналітичні вирази, на основі яких розроблено ЕМА перетворювачі та виконано експериментальні дослідження впливу технологічних факторів на результати ультразвукового контролю.

25. Сучков Г.М. Возможности линейной частотной фильтрации в ЭМА приборе // Контроль. Диагностика. – М., 2004. - № 10. - С. 20-21.

26. Себко В.П., Сучков Г.М., Ищенко В.Н. Исследование факторов, влияющих на результаты контроля горячего металла ЭМА способом // Дефектоскопия. - Екатеринбург, 2004. - № 11. - С. 40-49.

Здобувачем розроблено ЕМА перетворювачі та виконані експериментальні дослідження впливу технологічних факторів на результати ультразвукового контролю гарячого металу.

27. Сучков Г.М.. Возможности современных ЭМА толщиномеров // Дефектоскопия. - Екатеринбург, 2004. - № 12. - С. 16-25.

28. Сучков Г.М. Обработка информации. Повышение возможностей корреляционного анализа в ЭМА приборах // Контроль. Диагностика. – М., 2004. - № 12. - С. 13-16.

29. Сучков Г.М. Построение приборов для ультразвукового контроля и измерений с использованием ЭМА способа возбуждения и приема упругих импульсов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – К., 2005. - № 2 - С. 36-39.

30. Сучков Г.М. Новые методы ультразвукового контроля ЭМА способом на основе адаптации радиолокационных технологий // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – К., 2005. - № 3. - С. 38-42.

31. Сучков Г.М. Акустические характеристики материалов // Контроль. Диагностика.- М., 2005. - № 7. - С. 20-24.

32. Сучков Г.М. Принципы формирования поляризующего магнитного поля в рабочей зоне ЭМАП // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2005. № 36. - С. 123-130.

33. Сучков Г.М., Хомяк Ю.В. Построение эффективных источников магнитного поля для прямых ЭМАП // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2005. - № 44. - С. 103-106.

Здобувачем розроблено прямий ЕМА перетворювач з оригінальною конструкцією джерела магнітного поля відкритого типу.

34. Сучков Г.М. Способ и устройства для измерения параметров магнитного поля // Измерительная техника. - 2005. - № 3. - С. 35-38.

35. Устройство для электромагнитно-акустического контроля: А.с. 1558174 СССР, МКИ G 01 N 29/04 / Гарькавый В.В., Сучков Г.М., Малахов А.В., Катасонов Ю.А., Срокин В.И. (СССР). 1989. - 4 с. ДСК.

Здобувачем запропоновано виконати високочастотну котушку ЕМАП циліндричною та встановити її концентрично з робочими поверхнями полюсних наконечників.

36. Способ обнаружения дефектов макроструктуры в ферромагнитных изделиях: А.с. 1605772 СССР, МКИ G 01 N 29/04 / Гарькавый В.В., Ищенко В.Н., Сучков Г.М., Срокин В.И., Катасонов Ю.А., Малахов А.В. (СССР). 1990. - 4 с. ДСК.

Здобувачем запропоновано формувати магнітне поле з індукцією, яка зменшується до центра контуру вихрового струму.

37. Устройство для контроля качества проката: А.с. 1688674 СССР, МКИ G 01 N 29/04 / Гарькавый В.В., Фомин Н.А., Малахов А.В., Сучков Г.М., Катасонов Ю.А., Скороходов В.А., Царев В.Ф., Полосухина О.А., Срокин В.И. (СССР). 1991. - 3 с. ДСК.

Здобувачем запропоновано встановити осереддя електромагніту з кільцевими зазорами відносно зовнішньої та внутрішньої поверхнями.

38. Электромагнитно-акустический преобразователь: А.с. 1698745 СССР, МКИ G 01 N 29/04 / Сучков Г.М., Фомин Н.А., Гарькавый В.В., Чабан С.В., Катасонов Ю.А., Малахов А.В., Полосухина О.А. (СССР). - № 4721788/28; Заявлено 20.07.89 р.; Надрук. 15.12.91, Бюл. №46.

Здобувачем запропоновано доповнити перетворювач другою плоскою котушкою індуктивності та з'єднати кінці котушки першою котушкою та корпусом з допомогою електронних ключів.

39. Устройство для электромагнитно-акустического контроля: А.с. 1704558 СССР, МКИ G 01 N 29/04 / Сучков Г.М., Чабан С.В., Гарькавый В.В., Катасонов Ю.А., Малахов А.В., Шелгачев В.В., Шнаперман Л.Я. (СССР). 1991. - 5 с. ДСК.

Здобувачем запропоновано виконати котушку індуктивності з густиною розташування провідників, яка збільшується до її центра.

40. Способ настройки электромагнитно-акустического преобразователя: А.с. 1732257 СССР, МКИ G 01 N 29/04 / Сучков Г.М., Катасонов Ю.А., Малахов А.В., Гарькавый В.В., Сучкова Т.И., Чабан С.В. (СССР). - № 4656962/28; Заявлено 01.03.89 р.; Надрук. 07.05.92, Бюл. № 17.

Здобувачем запропоновано послідовність виконання операцій способу.

41. Устройство для электромагнитно-акустического контроля: А.с. 1784909 СССР, МКИ G 01 N 29/04 / Сучков Г.М., Чабан С.В., Гарькавый В.В., Катасонов Ю.А., Малахов А.В., Шелгачев В.В., Шишкин В.В. (СССР). - № 4915733/28; Заявлено 13.03. 90 р.; Надрук. 30.12.92, Бюл. № 48.

Здобувачем запропоновано виконати спряження внутрішніх частин котушок послідовно з внутрішніми частинами других котушок високочастотного індуктора.

42. Устройство для контроля качества головки рельса: А.с. 1834513 СССР, МКИ G 01 N 29/04 / Малахов А.В., Сучков Г.М., Гарькавый В.В., Чабан С.В., Шелгачев В.В., Фомин Н.А., Царев В.Ф., Соловьев В.М. (СССР). 1992. - 4 с. ДСК.

Здобувачем запропоновано закріпити електромагніт на осі, паралельній переміщенню рейки, і з'єднати його з віссю основного ролика з можливістю фіксованого переміщення.

АНОТАЦІЇ

Сучков Г.М.. Розвиток теорії і практики створення приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 - прилади і методи контролю та визначення складу речовин. - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, 2005 р.

Розв'язано проблему створення ефективних приладів на основі електромагнітно-акустичного способу збудження і прийому імпульсів ультразвукових коливань, які забезпечують виявлення дефектів, вимірювання товщини і визначення структурних параметрів електропровідних виробів широкого сортаменту. Розв'язання включає: перехід від збудження ЕМА перетворювача ударними імпульсами струму до живлення перетворювачів імпульсами струму в вигляді пакетів з регульованими частотою заповнення, тривалістю, амплітудою та фазою. Досліджено взаємодію пакетних імпульсів з пружним середовищем виробу без зачистки його поверхні, в гарячому або холодному стані, з криволінійною поверхнею або з неелектропровідними покриттями. Досліджено вплив основних характеристик пружних пакетних імпульсів, які збуджені ЕМАП, на знаходження дефектів та вимірювання товщини виробів. Узагальнено результати теоретичних і експериментальних досліджень, на основі яких розроблено і виготовлено прилади для ЕМА контролю якості, які за своїми основними характеристиками є близькими до традиційних контактних засобів, а за деякими експлуатаційними можливостями перевершують їх.

Ключові слова: електромагнітно-акустичний контроль, чутливість ультразвукового приладу, безконтактна дефектоскопія виробів, контроль товщини, акустичні властивості матеріалу, метод збудження акустичних сигналів, електромагнітне випромінювання.

Сучков Г.М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля и определения состава веществ. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, 2005 г.

Для повышения чувствительности ЭМА приборов предложено предварительно формировать информационный импульс с регулируемыми индивидуальными отличительными признаками. Возбудить такой УЗ импульс в исследуемом ОК. Принять отраженные импульсы из ОК, усилить их и выделить с учетом отличительных признаков. При этом, в зависимости от акустических и других характеристик контролируемого материала, а также наличия шумов и помех, УЗ импульс необходимо формировать либо однополярным с регулируемыми длительностью и амплитудой, либо с длительностью $1...10$ периодов заданной частоты и установленной амплитудой, либо в виде сложного пакетного сигнала, отвечающего условию $\tau_{и} \Delta f \gg 1$.

Теоретически и экспериментально доказана возможность повышения на 8 дБ чувствительности контроля изделий, изготовленных вытяжкой, эхо

методом пакетными импульсами упругих сдвиговых ЛПК.

Установлено главное преимущество ЭМАП в сравнении с ПЕП – высокая стабильность информационного сигнала. При контроле участков изделий с незачищенной поверхностью случайные колебания амплитуды принятого им информационного пакетного сигнала меньше на 7...22 дБ, а при контроле участков изделий со шлифованной поверхностью - на 2...8 дБ.

Повышена чувствительность ЭМА контроля до величины, эквивалентной плоскодонному отражателю диаметром 0,9 мм и более на расстоянии до 170 мм при дефектоскопии эхо методом объемными сдвиговыми ЛПК, сформированными в виде пакетов с длительностью 3...10 мкс и частотой заполнения 1,8...3 МГц. Повышена чувствительность до величины, эквивалентной канавке глубиной 0,2 мм и более с раскрытием более 0,01 мм, при дефектоскопии изделий с «черновой» поверхностью эхо методом импульсами поверхностных колебаний в виде пакетов с длительностью 4...20 мкс и частотой заполнения 0,2...1,3 МГц. Выявлены широкие возможности обнаружения дефектов за изломом поверхности до 90°, на расстояниях до 7 м на выпуклой и вогнутой поверхностях с радиусом кривизны более 6 мм. Определены и оценены факторы, которые влияют на результаты контроля, и разработаны подходы по уменьшению их влияния. Результаты исследований и разработок использованы в отраслевом стандарте на ЭМА дефектоскопы для контроля железнодорожных рельсов в пути.

Впервые решена проблема исключения «мертвой» зоны на расстояниях 0...30 мм от поверхности изделия, путем возбуждении пакетов импульсов объемных сдвиговых колебаний прямым ЭМА преобразователем, сканировании изделия и фиксации волн Релея приемным электромагнитно-акустическим преобразователем при появлении дефекта в акустическом поле прямого ЭМАП. Установлено, что основу действия нового метода контроля составляет физический механизм дифракции на дефекте и последующей трансформации волн на поверхности ОК.

Развиты принципы построения ЭМА преобразователей для возбуждения и приема волн различного типа в диапазоне частот 0,2...6 МГц с возможностью возбуждения упругих колебаний с линейной, криволинейной, круговой и вращающейся поляризацией. Разработаны концепции построения источников постоянного и импульсного поляризующего МП ЭМАП, реализация которых обеспечивает в заданном объеме поверхности ОК величину индукции 1,5...1,6 Тл на расстоянии 0,5...1 мм за счет вытеснения и переориентации магнитных силовых линий. Новизна разработок защищена 8 авторскими свидетельствами.

Разработаны ЭМА толщиномеры, дефектоскопы и приборы для определения физико-механических свойств материалов. Новые приборы позволяют контролировать качество изделий и материалов объемными

сдвиговыми и продольными, поверхностными и нормальными волнами. По чувствительности и величине "мертвой" зоны они сравнивались с "мокрыми" средствами, а по возможностям контролировать загрязненные, нагретые или покрытые изоляцией изделия - превосходят их.

Экспериментально доказано, что для настройки и проверки характеристик ЭМА толщиномеров, предназначенных для измерения толщины ОК с разной формой поверхности, достаточно использовать плоскопараллельные образцы. Установлено уменьшение погрешности измерений толщины изделий ЭМА толщиномерами, в сравнении с традиционными «мокрыми» приборами, которое обусловлено исключением влияния на результаты измерений свойств и толщины слоя контактной жидкости, кривизны поверхности возбуждения/приема, наличия отслоившихся и неотслоившихся неэлектропроводных покрытий, использованием для измерений УЗ сдвиговых колебаний, отсутствием влияния температуры и др. Определено, что для настройки и проверки ЭМА дефектоскопов целесообразно использовать стандартные образцы с такими же моделями дефектов, как и для настройки и проверки традиционных «мокрых» дефектоскопов, предназначенных для контроля объемными сдвиговыми, продольными, поверхностными и нормальными волнами.

Ключевые слова: электромагнитно-акустический контроль, чувствительность ультразвукового прибора, бесконтактная дефектоскопия изделий, контроль толщины, акустические свойства материалов, метод возбуждения акустических сигналов, электромагнитное излучение

Suchkov G.M.. Development of theory and practice of creation of devices for electromagnetic-acoustic testing of metal wares. - Manuscript.

Thesis for scientific degree of doctor of engineering sciences by specialty 05.11.13 - devices and methods testing and determination of composition of materials. - National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, 2005.

The problem of creation of effective devices based on a EMA method of excitation and reception of impulses of ultrasonic vibrations, which provide the exposure of defects, measuring of thickness and determination of structural parameters of electroconductive wares of wide assortment is solved. The decision includes: transition from shock excitation of EMAP to the feed of transformers by the impulses of current like a packages with managed frequency of filling, duration, amplitude and phase. The co-operation of package impulses with the resilient environment of wares without stripping of its surface, when it is hot or cold, with a curvilinear surface or with nonelectroconductive coverages is explored. Influence of basic descriptions of resilient package impulses which excited by EMAP on finding of defects and measuring of thickness of wares is explored. The results of theoretical and experimental researches on the basis of

which the devices for EMA quality control are developed and are made are generalized. On the main characteristics new control devices are near to the traditional contact devices, and on some operating possibilities are exceed them.

Keywords: electromagnetic-acoustic testing, sensitiveness of ultrasonic device, nonconductor fault detection of wares, testing of thickness, acoustic properties of materials, method of excitation of acoustic signals, electromagnetic radiation

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АКФ	- автокореляційна функція;
АЦП	- аналого-цифровий перетворювач;
ВКФ	- взаємно кореляційна функція;
ВЧ	- високочастотний;
ГЗІ	- генератор зондуючих імпульсів;
ЕМА	- електромагнітно-акустичний;
ЕМАП	- електромагнітно-акустичний перетворювач;
МП	- магнітне поле;
ЛПК	- лінійно-поляризовані коливання;
ЛЧМ	- лінійно-частотномодульований;
НК	- неруйнівний контроль;
ОК	- об'єкт контролю;
ПЕП	- п'єзоелектричний перетворювач;
ПІ	- пакетні імпульси;
ПІЗК	- пакетні імпульси зсувних коливань;
СЗП	- стандартний зразок підприємства;
УЗ	- ультразвуковий;
УЗК	- ультразвуковий контроль;
DSP	- сигнальний процесор;
FIFO	- проміжна електронна пам'ять;
IGBT	- біполярний транзистор з польовим входом;
PC	- персональний комп'ютер;
SV	- вертикально поляризований;
SH	- горизонтально поляризований.