

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**БОГДАН ГАЛИНА АНАТОЛІЇВНА**

УДК 620.179.16

**ВДОСКОНАЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ  
КОНТРОЛЮ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі приладів і систем неруйнівного контролю в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент

**ГАЛАГАН Роман Михайлович**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

доцент кафедри приладів і систем неруйнівного контролю

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**Сучков Григорій Михайлович,**

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",  
завідувач кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики;

кандидат технічних наук, доцент

**Монченко Олена Володимирівна,**

Національний авіаційний університет, доцент кафедри інформаційно-вимірjuвальних систем.

Захист дисертації відбудеться **«23» січня 2018 р. о 15:00** на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.18 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37, корпус №1, ауд. 293.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці КПІ ім. Ігоря Сікорського за адресою: 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37.

Автореферат розіслано **грудня 2017 р.**

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук



Н. І. Бурау

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В даний час розширюється сфера застосування порошкових конструкційних матеріалів (ПКМ), виготовлених методами порошкової металургії, в різних галузях промисловості, техніки, медицини. Її важливими відмінними рисами є отримання речовин в порошкоподібному стані та проведення операції нагріву (спікання) заготовок з порошків при температурі нижче точки плавлення відповідного металу або, в разі суміші різнорідних порошків, нижче температури плавлення найменш тугоплавкого компонента основи.

Ця галузь металургії використовується як для створення добре відомих матеріалів загального призначення, так і для виготовлення принципово нових матеріалів та виробів з комплексом прогнозованих фізико-механічних характеристик (ФМХ). Оскільки виникнення дефектів і зміна структури матеріалу може відбуватися на будь-якій стадії процесу виготовлення виробу, то особливе значення має розробка оперативних методів контролю, які дозволять оцінити зміну ФМХ ПКМ з високою точністю на будь-якому етапі виготовлення матеріалу і встановити ефективні технологічні режими процесу виробництва.

Проблеми та можливості використання ультразвукових методів неруйнівного контролю для визначення таких ФМХ ПКМ, як модулі пружності, пористість, твердість, тріщиностійкість досліджували у своїх роботах Вайншток І.С., Ермолов І.Н., Романова О.В., Назарчук З.Д., Сухоруков В.В. та інші.

На сьогодні існуючі методи, що використовуються для контролю ФМХ ПКМ, не дають можливості оцінити вплив окремо взятого технологічного процесу на формування внутрішньої структури матеріалу, а отже їх не можливо використовувати при розробці оперативних систем контролю.

В дисертаційній роботі таку задачу пропонується вирішити за допомогою розробки системи оперативного контролю ФМХ ПКМ на основі ультразвукових методів неруйнівного контролю. Актуальність роботи полягає в науковому обґрунтуванні та вдосконаленні засобів і методів визначення ФМХ ПКМ з використанням ультразвукового методу неруйнівного контролю, вирішення задачі корегування параметрів технологічних режимів виготовлення ПКМ та вибору співвідношення вихідних компонентів матеріалу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі приладів та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до ініціативних науково-дослідних робіт «Дослідження фізико-механічних характеристик багатофазних порошкових матеріалів з використанням ультразвукових методів неруйнівного контролю» (№ДР 0115U005689); «Дослідження можливостей застосування факторного експерименту при ультразвуковому контролі фізико-механічних характеристик багатофазних порошкових матеріалів» (№ДР 0115U005659), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення точності неруйнівного контролю фізико-механічних характеристик порошкових

композиційних матеріалів шляхом вдосконалення методу та схеми вимірювання швидкості поширення ультразвукових хвиль (УЗХ).

Для досягнення мети дослідження в дисертаційній роботі поставлені та розв'язані наступні задачі:

1. Провести аналіз та обґрунтувати шляхи вдосконалення існуючих методів та технічних засобів вимірювання фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів в умовах розробки нових технологій їх виготовлення.

2. Обґрунтувати шляхи зменшення сумарної похибки вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі при контролі порошкових конструкційних матеріалів.

3. Обґрунтувати вибір дискретного ортогонального методу для вимірювання фазового часу проходження ультразвукових сигналів та розробити на його основі прецизійний метод вимірювання часу затримки ультразвукової хвилі в порошкових конструкційних матеріалах.

4. Виконати комп'ютерне моделювання дискретного ортогонального методу вимірювання фазового часу проходження ультразвукових сигналів, оцінити залежність похибки вимірювання фазового зсуву від обраного інтервалу ортогональності, від кратності обсягу вибірки періоду сигналу, від частоти дискретизації та рівнів квантування аналогово-цифрового перетворення та від співвідношення сигнал/завада.

5. Розробити ультразвукову систему діагностики фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів на основі ортогонального методу вимірювання фазового часу проходження та провести експериментальні дослідження.

6. Розробити методики використання отриманих експериментальних даних для формування рекомендацій по оптимізації параметрів технологічних режимів виготовлення порошкових конструкційних матеріалів та вибору співвідношення вихідних компонентів матеріалу.

7. Впровадити результати досліджень та розробок в практику використання для виробничих та навчальних задач.

*Об'єктом дослідження* є процес ультразвукового контролю ФМХ ПКМ на стадії відпрацювання технології виготовлення ПКМ.

*Предметом дослідження* є методи та засоби підвищення точності вимірювання швидкості поширення УЗХ при контролі ФМХ ПКМ.

**Методи дослідження** базуються на використанні: методів технічної діагностики та неруйнівного контролю; теорії вимірювань; теорії ймовірностей та математичної статистики; методів обробки сигналів; комп'ютерного та математичного моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

1. На основі проведеної класифікації факторів, що впливають на сумарну похибку вимірювання швидкості поширення ультразвукових хвиль в порошкових конструкційних матеріалах, виявлені її критичні складові та отримані їх аналітичні вирази;

2. Набув подальшого розвитку дискретний ортогональний фазовий метод вимірювання часової затримки на основі розділення процесів накопичення та

обробки даних на частоті, меншій від частоти дискретизації аналогово-цифрового перетворення, та синхронізації процесів формування і аналізу інформаційних сигналів, що дозволило проводити вимірювання фазового часу поширення високочастотних радіосигналів з похибкою, меншою за 0,5%;

3. Удосконалено метод вимірювання швидкості поширення ультразвукових хвиль в порошкових конструкційних матеріалах на основі комплексного застосування автоматизації процесу отримання вимірювальної інформації, методів статистичної обробки даних, удосконаленого ортогонального дискретного фазового методу вимірювання часової затримки та сукупності структурно-параметричних рішень, що дозволило підвищити швидкість та точність визначення фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів.

***Практичне значення одержаних результатів*** полягає в тому, що:

Розроблено систему і методику ультразвукового контролю ФМХ ПКМ з використанням фазових прецизійних методів вимірювання часу затримки поширення в об'єкті контролю (ОК) радіоімпульсних сигналів. Запропоновано методики використання отриманих експериментальних даних для формування рекомендацій по корегуванню параметрів технологічних режимів виготовлення ПКМ та вибору співвідношення вихідних компонентів матеріалу. Розроблена конструкція блоку фіксації первинних перетворювачів та ОК для забезпечення співвісності ультразвукових перетворювачів, акустичної осі та бази геометричних вимірювань, що дозволило на порядок зменшити суб'єктивну та методичну похибки. Виконана апаратурна реалізація дискретного ортогонального методу вимірювання фазового часу поширення радіоімпульсного сигналу. За рахунок схемотехнічних рішень розширений частотний діапазон вимірювань

***Впровадження результатів роботи.*** Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені в ТОВ НВФ «Діагностичні прилади» (м. Київ), ТОВ «Інженерно-будівельна компанія «Укрспецбуд»» (м. Київ), у навчальний процес кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського при викладанні курсів «Ультразвукові методи неруйнівного контролю» та «Автоматизовані засоби акустичного неруйнівного контролю».

***Особистий внесок здобувача.*** [1, 2, 5] - проаналізовано суб'єктивні, методичні та інструментальні похибки, що виникають при вимірюваннях швидкості поширення ультразвукової хвилі в ПКМ; [3] - досліджено можливість використання дискретного ортогонального методу вимірювання фази для визначення характеристик матеріалів ультразвуковим методом; [4, 6-12, 14] - проведено теоретичне обґрунтування способу вимірювання фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів та розроблена система для вимірювання фазових зсувів радіоімпульсних сигналів; [13] - проведено аналітичне дослідження методу визначення коефіцієнту згасання звуку; [15] - запропонований стробоскопічний спосіб для вимірювання фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів; [16] - досліджено можливість використання методів акустичної інтроскопії для контролю нерівномірності розподілу властивостей порошкових виробів; [17] - запропоновані методи підвищення точності вимірювання швидкості поширення ультразвукових хвиль в багатофазних порошкових матеріалах; [18] - запропоновані рекомендації по оптимізації існуючих методик контролю пружних та структурних характеристик

ПКМ; [19] - досліджена можливість використання факторного експерименту при контролі фізико-механічних характеристик ПКМ; [20, 21] - запропоновано систему, що дозволяє проводити вимірювання фазового часу проходження ультразвукових сигналів з високою точністю.

**Апробація результатів дисертації** Основні матеріали дисертації доповідались та обговорювались на XI міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування 2012: стан і перспективи», м. Київ, 2012р.; XII міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування 2013: стан і перспективи», м. Київ, 2013р.; 7-й Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання» м. Івано-Франківськ, 2014р.; XIV міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2015р.; XV міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2016р.; XVI міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2017р.; 8-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2015», г. Минск, Республика Беларусь; Международной конференции «Дни неразрушающего контроля 2016», г. Созополь, Болгария.

**Публікації.** За темою дисертаційних досліджень опубліковано 21 наукова праця, у тому числі з них: 6 – статей у фахових виданнях (4 – статті у вітчизняних фахових виданнях (всі входять до наукометричних баз даних), 2 – статті у закордонних виданнях), 3 патенти України на корисну модель, 3 патенти України на винахід, 9 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 178 сторінок, з яких основний міст виконано на 151 сторінках, містить 40 рисунки, 13 таблиць. Список використаних джерел складається з 133 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведено дані щодо апробації, публікацій й впровадження результатів роботи.

У **першому розділі** дисертаційної роботи розглянуті ФМХ ПКМ, які незалежно від області застосування матеріалів підлягають обов'язковому контролю, як на різних етапах виготовлення, так й при експлуатації готового виробу. Проаналізовано вплив технологічних процесів виробництва та їх режимів на формування внутрішньої структури ПКМ. Встановлено, що для отримання ефективної технології виготовлення та оптимізації співвідношення вихідних компонентів ПКМ необхідно проводити оцінку зміни ФМХ після кожного етапу технологічного процесу. В результаті аналізу методів дослідження ФМХ ПКМ, що регламентовані ДСТУ та використовуються на сьогоднішній день при розробці нових матеріалів, встановлено, що більшість з них є руйнівними та потребують

наявності спеціального обладнання й не дозволяють проводити серію експериментів з одним і тим самим зразком. Тобто їх неможливо застосовувати при побудові оперативної системи контролю ФМХ ПКМ, на відміну від методів неруйнівного контролю (НК).

До методів та засобів НК виробів з ПКМ висувають наступні вимоги: методична простота реалізації, ефективність (можливість оцінки максимальної кількості ФМХ за результатами вимірювання), можливість застосування на будь-якій стадії виготовлення ПКМ, точність, завадо захищеність тощо. Обґрунтовано, що серед неруйнівних методів, які застосовуються для контролю ФМХ ПКМ (вібраційний, радіаційний, магнітний, вихрострумний, ультразвуковий), перерахованим вимогам відповідає ультразвуковий метод. В порівнянні з іншими методами він простий в апаратурній реалізації; інформативні параметри акустичних сигналів мають кореляційні або аналітичні залежності з більшістю ФМХ ПКМ, що підлягають обов'язковому контролю; дозволяє проводити дослідження при односторонньому доступі до об'єкту; може бути застосований на будь-якому етапі технологічного процесу виготовлення. В ультразвуковому методі інформативним параметром для оцінки ФМХ ПКМ обрано швидкість поширення УЗХ, яка має аналітичні або кореляційні залежності з модулями пружності, твердістю, густиною, пористістю та іншими фізико-механічними параметрами. Недоліком існуючих систем ультразвукового контролю ФМХ ПКМ є недостатня точність вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі в ПКМ, неможливість проведення статистичної обробки отриманих даних для відсіювання результатів, що містять грубі похибки, відсутність вбудованої системи обробки та запису інформації. Відомо, що при використанні ультразвукового методу безпосередньо вимірюється час проходження УЗХ в ОК та геометричні розміри бази прозвучування, а розрахунок ФМХ проводиться окремо, тобто точність оцінки зміни ФМХ ПКМ буде напряму залежати від точності вимірювання зазначених інформативних параметрів. Тому виникає потреба в розробці системи, яка б дозволила оперативно отримувати інформацію про зміну ФМХ ПКМ.

Обґрунтовано, що для підвищення достовірності оцінки зміни ФМХ ПКМ необхідно підвищити точність вимірювання швидкості ультразвуку, яка напряму залежить від точності вимірювання часу проходження УЗХ в ПКМ і геометричного розміру бази прозвучування. Показана необхідність проведення комплексного аналізу факторів, що чинять вплив на формування сумарної похибки вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі в ПКМ. З метою зменшення похибки вимірювання часу затримки в роботі запропоновано використовувати фазові методи, оскільки амплітудний метод, що використовується в існуючих системах, відзначається низькою завадозахищеністю та значною похибкою.

За результатами порівняльного аналізу існуючих методів та систем діагностики ФМХ ПКМ, а також аналізу залежності швидкості УЗХ від технологічних процесів та параметрів технологічних режимів виготовлення ПКМ, сформульовані завдання дисертаційного дослідження.

**У другому розділі** проведена класифікація факторів, що впливають на формування сумарної похибки вимірювання швидкості поширення ультразвукових

хвиль в порошкових конструкційних матеріалах, виявлені її критичні складові та отримані їх аналітичні вирази.

Показано, що на результат контролю впливає значна кількість випадкових незалежних факторів, які умовно поділено на дві групи: технологічні та вимірювальні. До технологічних факторів віднесено: технологію виготовлення ПКМ (технологічні режими та їх робочі параметри); кількісний склад та якість сировинних компонентів, що використовується для виготовлення ПКМ; методи формування зразка, допоміжні компоненти, які дозволяють впливати на ФМХ ПКМ. Вплив вимірювальних факторів обумовлений недосконалістю апаратури, яка використовується для вимірювання часу поширення ультразвукової хвилі в об'єкті та його геометричних параметрів, методики проведення вимірювань швидкості УЗХ та суб'єктивної складової.

Вплив похибки вимірювання швидкості УЗХ в ПКМ на формування результуючого діапазону швидкостей схематично показано на рис. 1.

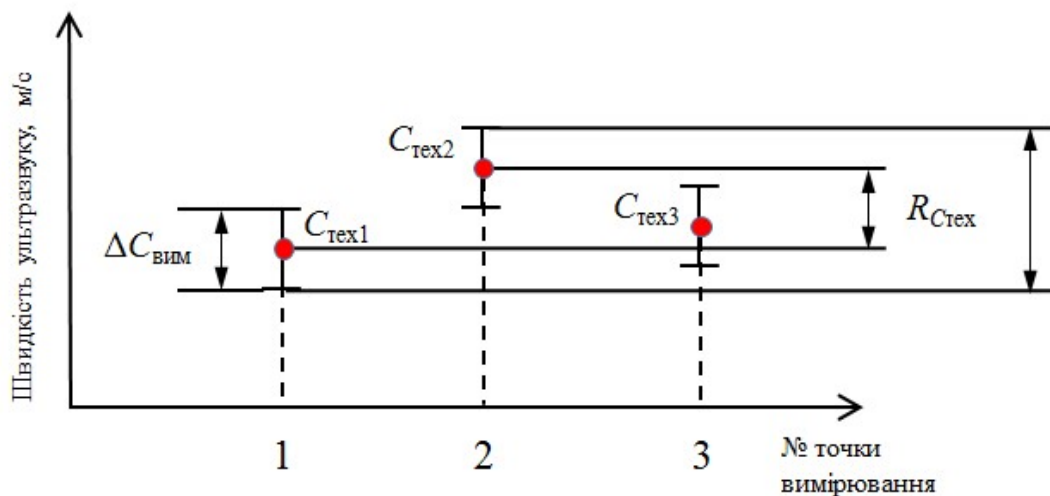


Рис. 1 Схематичне зображення впливу похибки вимірювання на формування результуючого діапазону швидкостей:  $C_{\text{тех}}$  - значення швидкості УЗХ в ПКМ, обумовлене впливом технологічних чинників;  $R_{C_{\text{тех}}}$  - варіація швидкості;  $\Delta C_{\text{вим}}$  - загальна похибка вимірювання

З рис. 1 видно, що результуючий діапазон швидкостей  $\Delta C_{\text{рез}}$  буде визначатися варіацією швидкості  $R_{C_{\text{тех}}}$ , зумовленої технологічними факторами і вихідними компонентами, та довірчими межами загальної похибки вимірювання  $\Delta C_{\text{вим}}$ , що залежить від середньоквадратичного відхилення, виду закону розподілу і довірчої ймовірності. Таким чином для вирішення поставленого завдання необхідно провести комплексний аналіз похибок, які виникають в процесі вимірювань швидкості ультразвуку в тому чи іншому виробі з ПКМ, що дозволить дати рекомендації щодо способів їх зменшення.

На основі власних експериментальних досліджень та проведеного аналізу публікацій інших авторів, по оцінці впливу зміни процентного співвідношення кількісного складу вихідних компонентів ПКМ та технологічних параметрів їх виготовлення на зміну швидкості поширення УЗХ встановлено:



- зміна кількісного складу вихідних компонентів ПКМ та введення допоміжних речовин призводить до відносної зміни швидкості поширення УЗХ, що обумовлено впливом технологічних факторів, в межах 10%;
- зміна параметрів технологічних режимів виготовлення ПКМ призводить до відносної зміни швидкості поширення УЗХ в межах 2%;
- анізотропність внутрішньої структури ПКМ в межах одного зразка призводить до відносної зміни швидкості поширення УЗХ в межах 1%.

Встановлено, що при проведенні ультразвукових вимірювань необхідно визначати не лише абсолютне значення швидкості поширення УЗХ в різних точках ОК, але й проводити оцінку відносної зміни цієї швидкості у всьому об'ємі зразка. Доведено, що для забезпечення достовірності отриманих даних необхідно щоб похибка вимірювання в межах кожної з баз прозвучування була на порядок менша за розкид значень швидкості поширення УЗХ, що обумовлена зміною ФМХ ПКМ.

Автором проаналізовані та виділені фактори, що чинять суттєвий вплив на формування сумарної похибки вимірювання швидкості поширення УЗХ в ПКМ, до яких віднесено: кваліфікація оператора, неспіввісність встановлення та відсутність стабільності зусилля притискання блоку перетворювачів до площини ОК, невідповідність розміру бази геометричних вимірювань акустичній осі, стан поверхні ОК, а також спосіб вимірювання часової затримки.

Встановлено, що при проведенні вимірювань інформативних параметрів без використання автоматизованої системи кваліфікація оператора чинить значний вплив на отримані результати.

Для оцінки впливу сили притискання блоку перетворювачів на виміряне значення швидкості поширення УЗХ, було проведено експериментальні дослідження. В якості ОК використані зразки, чкі виготовлені з органічного скла товщиною 5 мм з відомою повздовжньою швидкістю поширення УЗХ. Вимірювання проводили в одній і тій самій точці зразка, зі зміною сили притискання блоку перетворювачів до ОК. Експеримент показав, що варіація сили притискання блока перетворювачів до поверхні об'єкту контролю викликає розкид виміряних значень швидкості поширення УЗХ до 10%.

Для оцінки відносної похибки вимірювання швидкості поширення УЗХ в ПКМ, яка викликана неспіввісністю блоку перетворювачів на площині ОК був отриманий аналітичний вираз:

$$\delta C = \frac{\Delta t}{t} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1}{\cos \alpha}\right) \cdot 100\%,$$

де  $\Delta t = |t - t_x|$  - різниця між дійсним значенням часу проходження ультразвукового імпульсу вздовж бази вимірювання  $t$  і отриманим часом в результаті зсуву перетворювачів  $t_x$ ;  $\alpha$  - кут зміщення осі приймача УЗХ відносно осі випромінювача.

Графіки залежності відносної похибки вимірювання швидкості поширення УЗХ від величини неспіввісності УЗ датчиків представлені на рис. 2 отримані за наведеною формулою при різних товщині досліджуваних зразків. Тобто при контролі зразків товщиною близько 5 мм неспіввісність встановлення блоку перетворювачів на ОК в 1 мм призводить до похибки вимірювання швидкості поширення УЗХ в 2%.

Для оцінки відносної похибки вимірювання швидкості поширення УЗХ в ПКМ, яка викликана невідповідністю розміру бази геометричних вимірювань акустичній осі було отримане аналітичне рівняння:

$$\delta C = \left[ 1 - \frac{h}{h + \Delta h} \right] \cdot 100\% = \left[ 1 - \frac{h}{h + L \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right] \cdot 100\%$$

де  $\Delta h = |h - h_1|$  - різниця між дійсним значенням геометричного розміру ОК при

поширенні акустичного імпульсу вздовж бази вимірювання та отриманим в результаті зсуву перетворювача;  $h$  - дійсне значення геометричного розміру ОК,  $L$  - відстань на яку зміщена база вимірювання товщини ОК відносно акустичної осі.

На рис. 3 представлені графіки залежності відносної похибки вимірювання швидкості поширення УЗХ від величини неспівпадиння геометричної та акустичної вісей при різних товщинах досліджуваних зразків для випадку зміщення бази вимірювання геометричного розміру ОК щодо акустичної осі на 3 мм. Можемо зробити висновок, що невідповідність бази вимірювання розміру акустичної осі в 0,2 мм при товщині зразка 5 мм призводить

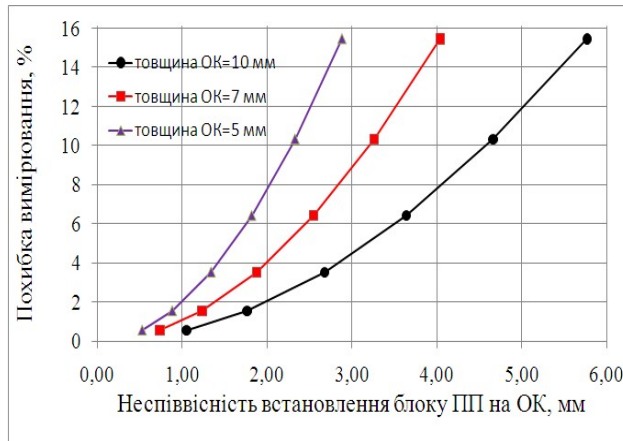


Рис. 2 Графік залежності відносної похибки вимірювань  $\delta C$  від неспіввідповідності перетворювачів для товщин ОК – 5; 7 и 10 мм.

до виникнення похибки вимірювання швидкості поширення УЗХ - 4%, а різниця розмірів у 0,5 мм - 9%.

З метою виявлення ступеня впливу вимірювальних і технологічних факторів на результат вимірювання швидкості поширення УЗХ в ПКМ були проведені експериментальні дослідження, виконані за існуючими методиками з використанням однофазного (органічне скло: швидкість поширення поздовжньої УЗХ 2700 м/с) матеріалу у формі прямокутної призми з довжиною 50 мм, шириною і товщиною - 3 мм., та композитного матеріалу LaB6-TiB2 зразок в формі прямокутної призми розміром в 3 мм.

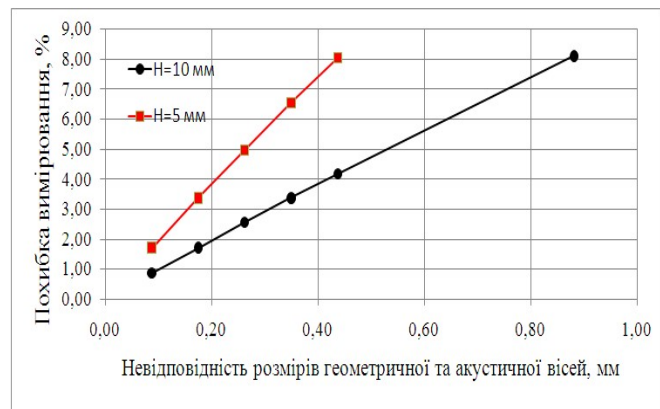


Рис. 3 Графік залежності відносної похибки вимірювань  $\delta C$  від неспівпадиння геометричної та акустичної осей вимірювань.

Структурна схема стенду для експериментальних досліджень наведена на рис. 4. До її складу увійшли: Г - двоканальний генератор сигналів прямого цифрового синтезу (DDS) MHS-5200, ZQ<sub>1</sub> та ZQ<sub>2</sub> – випромінюючий та приймаючий ультразвукові перетворювачі П111-2,5-K12-003, О – двоканальний осцилограф RIGOL DS5102 MA, ПК - персональний комп'ютер (для математичної і статистичної обробки отриманих даних).

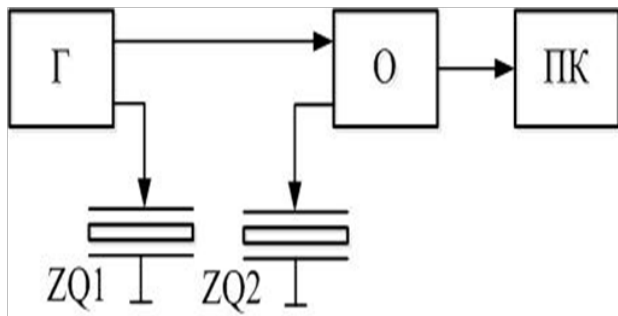


Рис. 4 Структурна схема експериментального стенду

Щоб зіставити вплив вимірювального та технологічного факторів на результат контролю ФМХ ПКМ було проведено дисперсійний аналіз експериментальних даних, який дозволяє оцінити вплив різних факторів на мінливість ознаки, що вивчається. У випадку, коли кілька повністю незалежних факторів діють одночасно й

зумовлюють загальну зміну ознаки, то сума окремих розсіювань, які характеризують їх вплив, дорівнює загальному розсіюванню:

$$Q_{\Sigma}^2 = Q_i^2 + Q_n^2,$$

де  $Q_i^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (C_{ij} - \bar{C}_i)^2$  – розсіювання, яке визначається впливом випадкових

вимірювальних факторів;  $Q_n^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (\bar{C}_i - \bar{C})^2$  – розсіювання, в основному

зумовлене впливом ФМХ та технологією виготовлення ПКМ;  $C_{ij}$  – вимірне значення швидкості в  $i$ -тій точці в  $j$ -тий момент часу;  $\bar{C}_i$  – середнє значення швидкості УЗХ в кожній окремій точці вимірювання;  $\bar{C}$  – генеральне середнє всіх вимірювань по всіх точках.

Обрахунок експериментальних даних показав, що співвідношення вимірювального та технологічного розсіювання  $Q_i^2/Q_n^2$  у органічному склі становить 3,7, у порошковому матеріалі - LaB6-TiB2 - 13,3. Це означає, що вплив вимірювального фактору значно більший, ніж технологічного, і не дозволяє достовірно виявляти розкид фізико-механічних характеристик, оскільки для достовірної оцінки ФМХ ПКМ, при їх виготовленні, з використанням ультразвукових методів неруйнівного контролю необхідно, щоб вплив вимірювальних факторів на результат контролю був істотно менший впливу технологічних факторів.

У розділі сформульовані основні вимоги до методу вимірювання швидкості поширення УЗХ в ПКМ та показано, що для вирішення поставленої задачі необхідно застосовувати комплексний підхід із застосуванням схемотехнічних та конструктивних рішень.

У третьому розділі на основі проведеного аналізу фазових методів вимірювання часової затримки обґрунтовано вибір дискретного ортогонального

фазового методу для вирішення задачі розробки оперативної системи контролю ФМХ ПКМ на базі УЗ методів НК. Цей метод дозволяє проводити вимірювання часового інтервалу з похибкою меншою за 0,5 %, є завадостійким, швидкодійним та підлягає автоматизації.

Розроблена структурна схема фазового вимірювача часових інтервалів представлена на рис. 5.

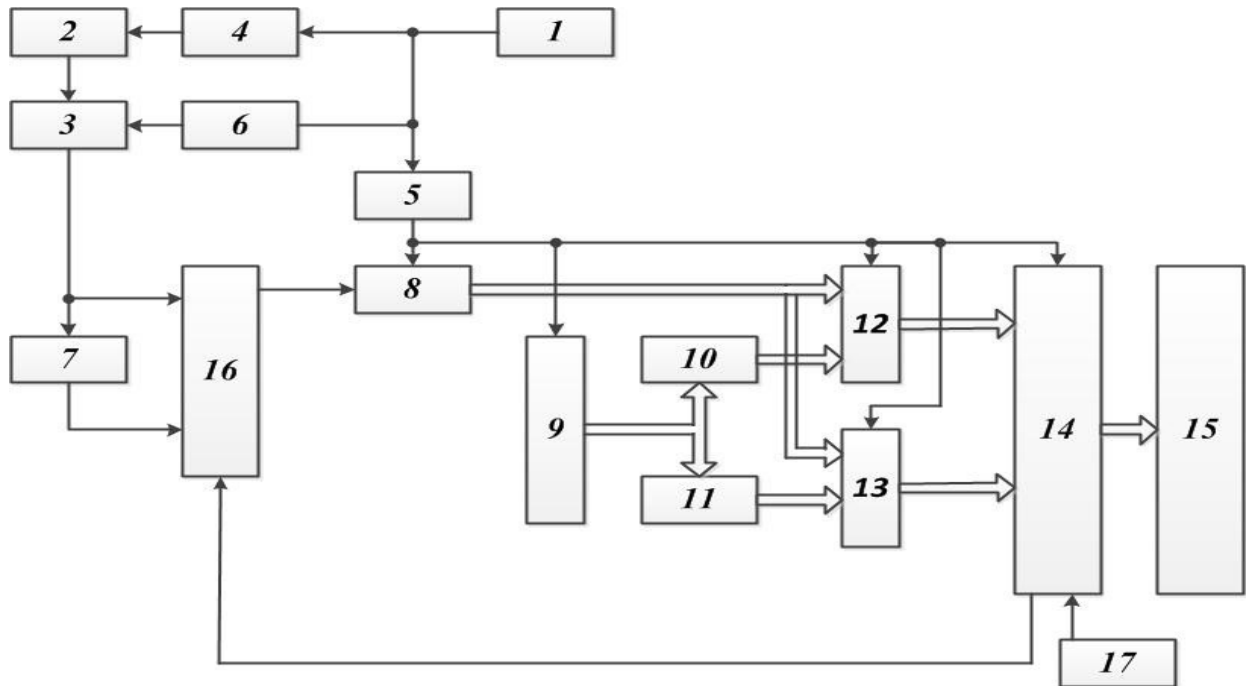


Рис. 5 Структурна схема пристрою для вимірювання фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів: 1 – генератор синхросигналів, 2 – формувач імпульсів, 3 – модулятор, 4,5 - подільники частоти, 6 – синтезатор частоти, 7 – блок первинних перетворювачів (ПП), 8 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП), 9 – лічильник імпульсів, 10 і 11 - постійні запам'ятовуючі пристрої (ПЗП) синусоїдального та косинусоїдального сигналів відповідно, 12 і 13 – помножувачі цифрових сигналів, 14 – блок обчислення, 15 – цифровий відліковий пристрій, 16 – аналоговий мультиплексор, 17 – блок керування.

Запропонований метод вимірювання фазового часу затримки включає в себе дискретизацію вимірюваного сигналу, його перетворення в цифровий код і обчислення часу проходження радіоімпульсних сигналів. Для виключення методичної похибки вимірювання, що пов'язана з некратністю часу інтегрування періоду сигналу, частоту, тривалість імпульсів, період посилок випромінюваного радіоімпульсного сигналу формують від одного генератора синхросигналів. Для підвищення точності та розширення верхньої межі частот вимірювальних сигналів визначення фазового часу затримки випромінюваний радіоімпульс і вимірюваний сигнал подають на один вхід АЦП для перетворення в цифровий код в два етапи:

- на першому етапі, для швидкого накопичення даних, на вхід АЦП одноразово подають випромінюваний радіоімпульс для визначення його початкової фази;

- на другому етапі проводять поступову обробку накопичених даних для визначення фази вимірюваних сигналів, що перевищують поріг чутливості.

Час проходження радіоімпульсних сигналів обчислюють відповідно до виразу  $\tau_{\varphi} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\omega}$ , де  $\varphi_1$  - значення фази випромінюваного сигналу в межах  $[0, 2\pi)$ ;  $\varphi_2$  - абсолютне вимірне значення фази вимірюваного сигналу в межах  $[0, 2\pi)$  в момент часу, коли значення коду з АЦП перевищить поріг його знаходження;  $\omega$  - частота сигналу.

Для розширення частотного діапазону вимірюваних сигналів частоту сигналів дискретизації  $f_d$  АЦП і зчитування ПЗП, в якому зберігаються коди значень синуса та косинуса опорного сигналу, отримують шляхом ділення частоти генератора синхросигналів і визначають за виразом:

$$f_d = \frac{K}{T_n \cdot K \cdot P + T_0},$$

де  $K$  - число віртуальних ступенів вихідного сигналу на період після стробоскопічного перетворення на виході АЦП;  $P$  - ціле число від 1, 2, 3 ...;  $T_n$  - період посилок випромінюваного сигналу;  $T_0$  - період випромінюваного сигналу.

За допомогою математичного моделювання в середовищі Matlab була проведена оцінка залежності точності вимірювання фазового зсуву від:

- обраного інтервалу ортогональності;
- кратності обсягу вибірки періоду сигналу;
- відсіювання результатів вимірювання з грубими похибками, що виникають через зашумленість сигналу;
- частоти дискретизації і рівнів квантування аналогово-цифрового перетворення;
- наявності адитивних шумових складових в вимірювальних сигналах

Фазовий зсув  $\Delta\varphi$  між випроміненим та вимірювальним сигналами, при проведенні математичного моделювання дискретного ортогонального методу визначався за формулою:

$$\Delta\varphi = \arctg \frac{\sum_{j=1}^{M_{ad}} ((u_{вим}[j] + u_{ш}[j]) \cdot u_s[j])}{\sum_{j=1}^{M_{ad}} ((u_{вим}[j] + u_{ш}[j]) \cdot u_c[j])} - \arctg \frac{\sum_{j=1}^{M_{ad}} (u_{вин}[j] \cdot u_s[j])}{\sum_{j=1}^{M_{ad}} (u_{вин}[j] \cdot u_c[j])},$$

де  $M_{ad}$  - кількість елементів вибірки сигналу;  $u_{вим}[j] + u_{ш}[j]$  - вибірка вимірювального сигналу з додаванням завади;  $u_{вин}[j]$  - вибірка випроміненого

сигналу;  $u_s[j]$  та  $u_c[j]$  - синусна та косинусна складова опорного ортогонального сигналу.

В якості завади було використано Гаусівський шум з нульовим математичним сподіванням.

На рис. 6 представлені результати проведеного моделювання для сигналів частотою 2,5 і 0,5 МГц. Частота дискретизації АЦП змінювалася в межах від 50 до 150 МГц, а його розрядність від 8 до 16. Дослідження проводилися на одному періоді сигналу, кількість вибірок на період обиралося кратною частоті дискретизації АЦП. Співвідношення сигнал-завада варіювалося від 1 до 10. Результати комп'ютерного моделювання для випадку фазового зсуву  $\varphi=90^\circ$  представлені на рис. 6а і рис. 6б.

Як показало проведене моделювання для забезпечення інструментальної похибки вимірювання менше 0,5%, при роботі з сигналами вищими за 1 МГц необхідно обирати як мінімум 12-ти розрядний АЦП з частотою дискретизації 100 МГц.

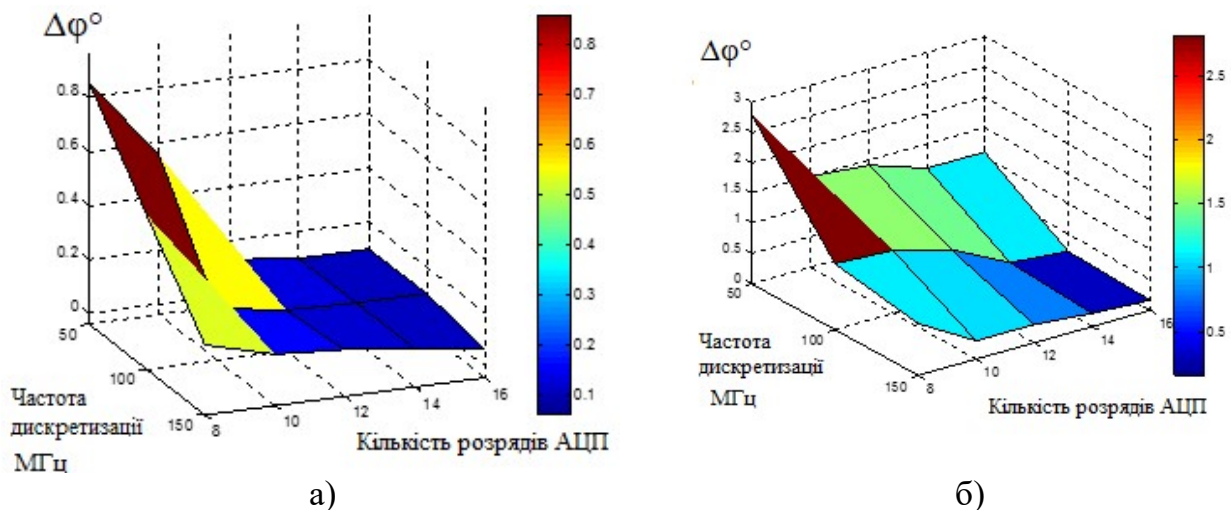


Рис. 6 Залежність похибки вимірювання фазового зсуву від параметрів АЦП для:  
а)  $\varphi=90^\circ$  та  $f=0,5$  МГц, б)  $\varphi=90^\circ$  та  $f=2,5$  МГц

Для оцінки працездатності дискретного ортогонального методу визначення фазовий зсув, при наявності адитивних шумових складових в вимірювальних сигналах, проводилося моделювання для сигналів частотою 5 МГц, частота дискретизації АЦП обиралась рівною 100 МГц, а його розрядність 12. Дослідження проводилися для вибірки  $M_{ad}=40$ , кількість вибірок на період обиралося кратним частоті дискретизації АЦП. Для підвищення точності та достовірності отриманих результатів проводилася статистична обробка даних. Вибірка складалась з 50 вимірювань. Співвідношення сигнал-перешкода варіювалося від 1 до 20 з кроком 5.

Результати проведеного моделювання показали, що реалізація ортогонального методу вимірювання в цифровому вигляді так само ефективна, як і в аналоговому. Були отримані результати моделювання в середині інтервалу ( $45^\circ$  і  $60^\circ$ ), а саме залежність відносної похибки вимірювання фазового часу поширення сигналу від величини співвідношення сигнал/завада (рис.7).

Як видно з рис.7 дискретний ортогональний метод вимірювання ФЗ

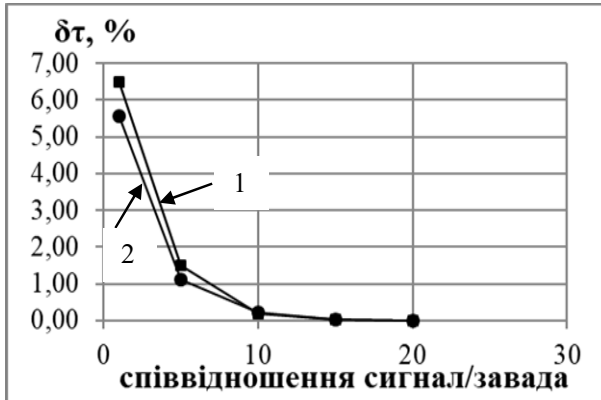


Рис. 7 Графік залежності відносної похибки вимірювання часового інтервалу ( $\delta\tau$ ) від співвідношення сигнал/завада: 1 -  $\varphi=60^\circ$ ; 2 -  $\varphi=45^\circ$

високочастотних сигналів дозволяє проводити вимірювання фазового часу поширення сигналу з похибкою менше 1% при співвідношенні сигнал/завада рівному 10 без використання спеціальних алгоритмів обробки даних.

У четвертому розділі розроблена структурна схема (рис.8), апаратна частина та макет системи (рис.9) для діагностики ФМХ ПКМ.

Запропонована система відповідає наступним вимогам: забезпечення відповідності акустичного тракту геометричній базі прозвучування; автоматизація процесу вимірювання часу поширення УЗХ в ОК та його геометричних розмірів; реалізація різних ультразвукових методів

вимірювання швидкості поширення УЗХ; використання як стандартних ультразвукових перетворювачів, так і спеціалізованих з точковою контактною поверхнею введення УЗХ; статистична обробка даних; повторюваність експерименту; автоматизація процесу оцінки зміни ФМХ ПКМ між зразками.

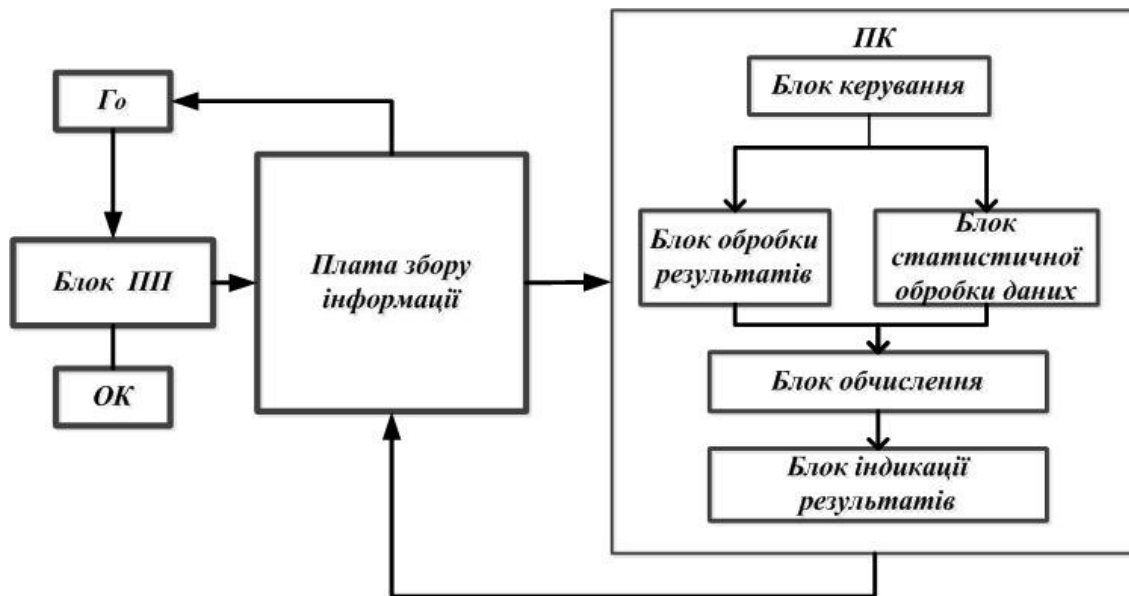
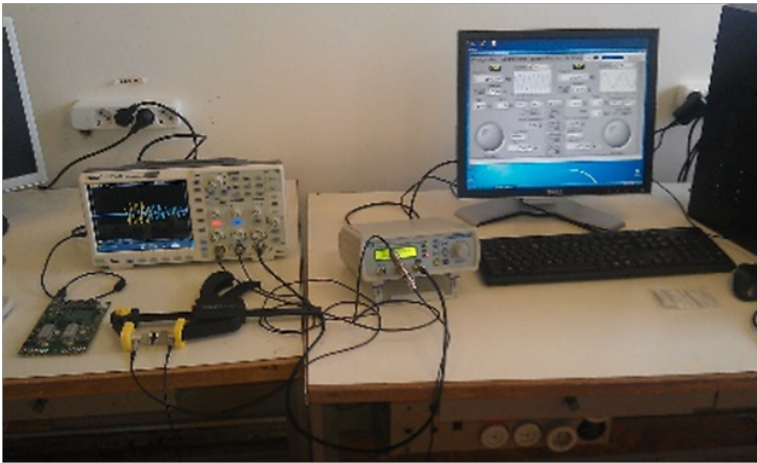


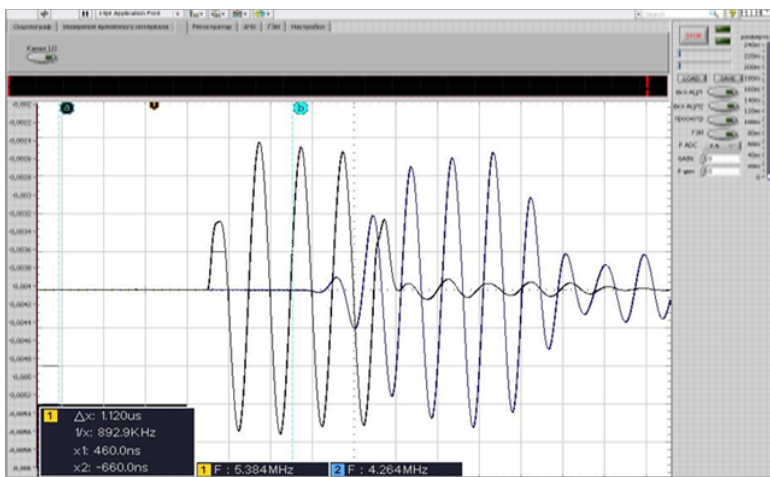
Рис. 8 Структурна схема системи діагностики фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів:

$G_0$  – високостабільний генератор сигналів; блок ПП – блок фіксації п'єзоперетворювачів та ОК; плату збору інформації; ПК - персональний комп'ютер.





a)



6)

Рис. 9 Елементи макету: а) експериментальна система; б) інтерфейс програми

Блок фіксації ПП - це конструкція, яка дозволяє жорстко фіксувати перетворювачі на поверхні ОК, що призводить до зменшення методичної та суб'єктивної похибки за рахунок забезпечення відповідності геометричної бази контролю та акустичної осі вимірювань.

Завдяки запропонованій конструкції та використанню електронного штангенциркуля в системі, база прозвучування вимірюється автоматично, що зменшує суб'єктивну похибку вимірювання швидкості поширення УЗХ. За рахунок наявності спеціальних змінних вкладок у системі можливо використовувати різні типи ультразвукових датчиків в залежності від обраного методу контролю. Наявність динамометричного ключа в конструкції блоку фіксації забезпечує стабільність сили притискання блоку первинних перетворювачів до ОК, що

дозволило зменшити суб'єктивну похибку вимірювання.

На базі плати збору інформації реалізовано пристрій для вимірювання фазового зсуву радіоімпульсних сигналів дискретним ортогональним методом (рис.5) та вимірювання геометричних розмірів ОК. Плата збору інформації складається з двох швидкодіючих 14-розрядних мікросхем АЦП з частотою дискретизації 100 МГц. Збір і попередня обробка інформації з цих АЦП здійснюється за допомогою мікросхеми ПЛІС. Діапазон частот вхідних сигналів АЦП обмежено інтервалом 0-50 МГц. Частота дискретизації вхідного сигналу обирається по команді з ПК з ряду 100 МГц, 75 МГц, 62,5 МГц, 10 МГц, 7,5 МГц, 6,25 МГц, 62,5 кГц. В залежності від поставленої задачі, частота дискретизації змінюється шляхом перепрограмування ПЛІС. Оперативний запам'ятовуючий пристрій, вбудований в плату збору інформації, дозволяє проводити накопичення масиву даних до 256000 вибірок по кожному з каналів. Запуск АЦП, синхронізація роботи ПЛІС, робота опорного генератора відбувається від високостабільного



опорного генератора, що дозволило реалізувати вимірювання фазового часового інтервалу дискретним ортогональним методом з похибкою меншою за 0,5%. Відцифровані дані із плати збору інформації через порт USB передаються на ПК.

У ПК програмно реалізовано блок управління, який здійснює управління роботою всієї системи, блок обробки результатів, блок статистичної обробки даних, блок обчислення і блок індикації. На ПК покладено функцію організації синхронізації роботи всієї системи, накопичення первинної інформації, формування бази отриманих даних.

У блоці статистичної обробки результатів відбувається оцінка отриманого масиву даних відносно відхилення від нормального закону розподілу, розрахунок математичного сподівання та дисперсії. Відбувається пошук грубих похибок вимірювання (в залежності від заданої кількості повторюваності експерименту використовують критерії Романовського, трьох сигм, Шарльє або Диксона) та їх виключення.

У блоці обробки результатів розраховують швидкість поширення УЗХ в ПКМ для кожного зразка по всім точкам прозвучування, за отриманими усередненими значеннями часу проходження УЗХ та товщині ОК.

В блоці обчислення, проводять розрахунок ФМХ ПКМ використовуючи відомі аналітичні або кореляційні їх залежності від швидкості поширення УЗХ в ПКМ.

Блок індикації інформації, по запропонованим методикам використання отриманих експериментальних даних, формує рекомендації по корегуванню параметрів технологічних режимів виготовлення ПКМ та вибору співвідношення вихідних компонентів матеріалу.

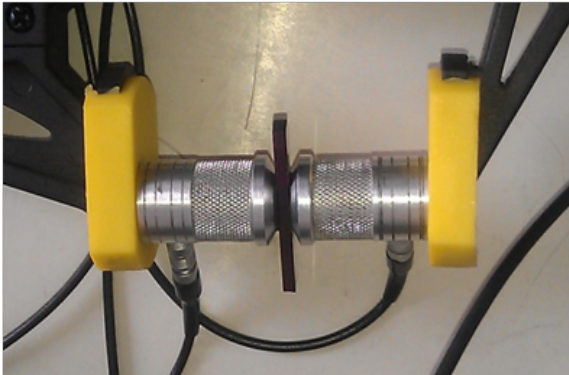


Рис. 10 Досліджуваний зразок LaB6-TiB2 з блоком ПП

Експериментальні результати визначення швидкості поширення пружної хвилі, в напрямку пресування в різних точках зразків моно- та полікристалу

(рис. 11) за усередненими значеннями для зразків вирізаних з різних ділянок технологічної заготовки та виготовлених в різних плавках при різних

технологічних режимах представлені на рис. 11а, результати визначення модуля пружності представлені на рис. 11б. Результати визначення швидкості поширення УЗХ та розраховані значення модуля пружності в досліджуваних зразках отримані з використанням розробленої системи корелюють з даними отриманими руйнівними методами контролю.

Для того, щоб зіставити вплив вимірювального та технологічного факторів на результат контролю ФМХ ПКМ було проведено дисперсійний аналіз отриманих даних з використанням розробленої системи за методикою описаною в розділі 2. Для проведення досліджень були використані зразки з композитного матеріалу типу

LaB6-TiB2 та однофазного матеріалу виконаних з органічного склав форми прямокутної призми з розміром сторони 3 мм.

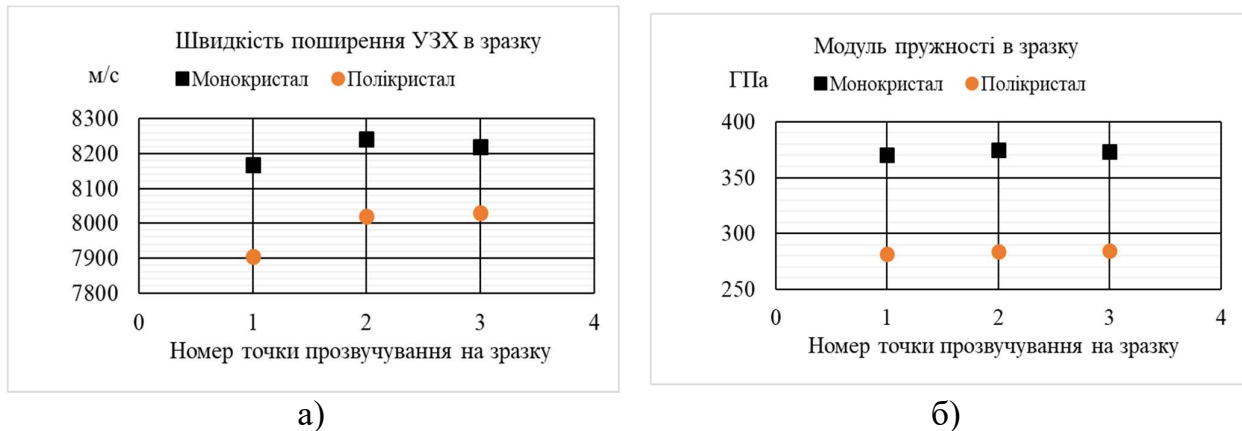


Рис. 11 Результати визначення а) швидкості поширення ультразвукової хвилі; б) модуля пружності

Вимірювання проводилися по одній площині. Обчислення фазового зсуву та відповідно часового інтервалу відбувається автоматично за заданим алгоритмом в розробленому додатку. Розраховані значення відповідних розсіювань наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Розраховані складові загального розсіювання  
результатів контролю ФМХ ПКМ

Матеріал контролю	об'єкту	Розсіювання, (м/с) <sup>2</sup>		
		$Q_{\Sigma}^2$	$Q_i^2$	$Q_n^2$
Орг.скло		3339,16	143,2	3195,96
LaB6-TiB2		686248,9	10437,9	675811

Аналіз наведених даних показує, що співвідношення вимірювального та технологічного розсіювання  $Q_i^2/Q_n^2$  в органічному склі становить 0,045, у LaB6-TiB2 – 0,015. Це означає, що вплив вимірювального чинника на результат контролю значно менший за вплив технологічного фактору, який призводить до розкиду фізико-механічних характеристик ПКМ. А отже запропонована методика визначення ФМХ у ПКМ, що базується на використанні ультразвукових методів НК, може однозначно дати відповідь на питання ступеня впливу технології виготовлення ПКМ на формування його ФМХ. Співвідношення складових розсіювання та загального розсіювання показує ступінь участі факторних ознак у формуванні загальної мінливості результативної ознаки. Вплив фізико-механічних характеристик в органічному склі  $Q_n^2/Q_{\Sigma}^2=95\%$ , вплив фізико-механічних характеристик LaB6-TiB2  $Q_n^2/Q_{\Sigma}^2=96\%$ .

Запропонований ультразвуковий метод вимірювання ФМХ ПКМ та створений засіб, який його реалізує, дозволили забезпечити вимірювання швидкості розповсюдження УЗХ в ПКМ з похибкою меншою за 1%. Зменшення сумарної похибки вимірювання швидкості поширення УЗХ було досягнуто за рахунок комплексного застосування автоматизації процесу отримання вимірювальної інформації, методів статистичної обробки даних, удосконаленого ортогонального дискретного фазового методу вимірювання часової затримки та сукупності структурно-параметричних рішень.

В дисертації розроблені методики оцінки зміни ФМХ ПКМ, які дозволяють проводити відпрацювання технології виготовлення ПКМ та оптимізацію вихідних компонентів за результатами ультразвукових методів НК.

**У додатках** наведені акти впровадження результатів досліджень, та програмний код.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень в дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу, яка полягає в розробці методів та засобів підвищення точності ультразвукового неруйнівного контролю ФМХ ПКМ.

При цьому одержано такі основні результати:

1. На основі проведеного аналізу сучасного стану методів та технічних засобів вимірювання фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів, обґрунтовано вибір ультразвукового методу неруйнівного контролю. Обґрунтовано шляхи вдосконалення даного методу для дослідження фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів, а саме: використання фазових методів для визначення часу поширення ультразвукової хвилі в матеріалі, забезпечення співвісності акустичної та геометричної осей вимірювання. Встановлено, що підвищення точності вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі в матеріалі дозволить проводити, по отриманим даним, оцінку впливу технологічних факторів на формування властивостей матеріалу та корегування технології і параметрів технологічних режимів виготовлення порошкових конструкційних матеріалів.

2. Обґрунтовано необхідність комплексної оцінки похибок, що виникають у результаті вимірювання швидкості поширення ультразвукових хвиль в порошкових конструкційних матеріалах. На основі запропонованої класифікації похибок проведена оцінка ступеня їх впливу на результат контролю. Обґрунтовано способи зменшення сумарної похибки за рахунок: автоматизації процесу вимірювання; впровадження конструктивних рішень, які забезпечують співвісність акустичної та геометричної осей; використання фазового методу для визначення часу проходження ультразвукової хвилі в об'єкті контролю; використання статистичних методів аналізу даних. Розроблені вимоги до методу і системи вимірювань фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів.

3. Вдосконалено дискретний ортогональний метод для вимірювання фазового часу проходження ультразвукових сигналів в порошкових конструкційних

матеріалах за рахунок розділення процесів накопичення та обробки даних на частоті, меншій від частоти дискретизації аналогово-цифрового перетворення, та синхронізації процесів формування і аналізу інформаційних сигналів.

4. Проведено комп'ютерне моделювання дискретного ортогонального методу вимірювання фазового часу проходження ультразвукових сигналів та встановлена залежність похибки вимірювання часу проходження ультразвукової хвилі від обраного інтервалу ортогональності, від кратності обсягу вибірки періоду сигналу, від частоти дискретизації та рівнів квантування аналогово-цифрового перетворення, від співвідношення сигнал/завада. Фізично реалізовано пристрій, який забезпечує вимірювання часу проходження ультразвукової хвилі з похибкою меншою за 0,5%.

5. Створено і досліджено експериментальний зразок ультразвукової системи діагностики фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів, в основу роботи якого покладено розроблений дискретний ортогональний метод вимірювання часу поширення ультразвукової хвилі та статистичні методи аналізу отриманих даних. Використання розробленої системи для контролю фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів дозволяє забезпечити вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі з похибкою меншою за 1%. Зменшення похибки досягається за рахунок комплексного застосування автоматизації процесу отримання вимірювальної інформації, методів статистичної обробки даних, удосконаленого ортогонального дискретного фазового методу вимірювання часової затримки та сукупності структурно-параметричних рішень.

6. Розроблено методики використання отриманих експериментальних даних для формування рекомендацій по оптимізації параметрів технологічних режимів виготовлення порошкових конструкційних матеріалів та вибору співвідношення вихідних компонентів матеріалу.

7. Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені в ТОВ НВФ «Діагностичні прилади» (м. Київ), ТОВ «Інженерно-будівельна компанія «Укрспецбуд»» (м. Київ), у навчальний процес кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПП ім. Ігоря Сікорського при викладанні курсів «Ультразвукові методи неруйнівного контролю» та «Автоматизовані засоби акустичного неруйнівного контролю».

## **СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Богдан Г.А. Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 1: Влияние субъективной погрешности / Г.А. Богдан, Р.М. Галаган // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – Київ, 2015. – Вип. 49. – С. 53-60 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших). *Здобувачем проаналізовані суб'єктивні похибки, що виникають при вимірюваннях швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі в ПКМ.*
2. Богдан Г.А. Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 2: Влияние

інструментальної і методическої погрешностей / Г.А. Богдан, Р.М. Галаган // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – Київ, 2016. – Вип. 51(1). – С. 52-57 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших). *Здобувачем проаналізовані методичні та інструментальні похибки, що виникають при вимірюваннях швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі в ПКМ.*

3. Богдан Г.А. Застосування дискретного ортогонального методу вимірювання фази для визначення характеристик матеріалів ультразвуковим методом/ Г.А. Богдан, А.Г. Протасов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». Серія Технічні науки. – Київ, 2016. – Вип. 2. – С. 87-93 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, BASE, OpenAIRE та інших). *Здобувачем досліджена можливість використання дискретного ортогонального методу вимірювання фази для визначення характеристик матеріалів ультразвуковим методом.*

4. Богдан Г.А. Цифровая система измерения фазовых сдвигов радиоимпульсных сигналов / Г.А. Богдан, В.Г. Баженов, М.В. Кравченко // Международный научно-исследовательский журнал - Екатеринбург - 2016 - №4(46) Часть 2 - С. 36-39 (Входить до WorldCat, РИНЦ, Google Scholar, та інших). *Здобувачем розроблена система для вимірювання фазових зсувів радіоімпульсних сигналів.*

5. Богдан Г.А. Анализ влияния позиционирования ультразвуковых датчиков на точность измерения скорости распространения ультразвуковой волны / Г.А. Богдан // Вісник Інженерної академії України. – Київ, 2016. – №2. – С. 69-71 (Входить до Google Scholar).

6. Богдан Г.А. Прецизионный способ и устройство для измерения фазового времени распространения ультразвуковых сигналов в объекте контроля / Г.А. Богдан, В.Г. Баженов // Научни Известия НТСМ. – 2016. – № 187. – С. 235-237. (Входить до Google Scholar). *Здобувачем запропоновано спосіб та пристрій для вимірювання фазового часу розповсюдження ультразвукового сигналу в ПКМ.*

7. Пат. на кор. модель 70199 Україна, МПК G04 F 10/00. Спосіб для вимірювання фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів / Баженов В.Г., Богдан Г.А.; заявник і патентовласник Баженов В.Г. – №U201115469; заявл. 27.12.11; опубліковано 25.05.2012, Бюл. № 10. – 4 с.: іл. *Здобувачем проведено теоретичне обґрунтування способу вимірювання фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів.*

8. Пат. на кор. модель 75746 Україна, МПК G04 F 10/00. Цифровий спосіб для вимірювання фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів / Баженов В.Г., Богдан Г.А., Грузін С.В.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – №U201206916; заявл. 06.06.12; опубліковано 10.12.2012, Бюл. № 23. – 5 с.: іл. *Здобувачем проведено теоретичне обґрунтування цифрового способу фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів.*

9. Пат. на кор. модель 77120 Україна, МПК G04 F 10/00. Пристрій для вимірювання фазового часу затримки радіоімпульсних сигналів у широкому діапазоні частот / Баженов В.Г., Богдан Г.А., Грузін С.В.; заявник і патентовласник Баженов В.Г. – №U201209730; заявл. 10.08.12; опубліковано 25.01.2013, Бюл. № 2. – 4 с.: іл. *Здобувачем обґрунтовано принципи роботи пристрою.*

10. Пат. на винахід 103094 Україна, МПК G04 F 10/00. Спосіб для вимірювання фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів / Баженов В.Г., Богдан Г.А.;

заявник і патентовласник Баженов В.Г. – №а201115467; заявл. 27.12.11; опубліковано 10.09.2013, Бюл. № 17. – 3 с.: іл. *Здобувачем обґрунтовано принципи роботи способу для вимірювання фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів.*

11. . Пат. на винахід 105074 Україна, МПК G04 F 10/00. Цифровий спосіб вимірювання фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів / Баженов В.Г., Богдан Г.А., Грузін С.В.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – №а201206917; заявл. 06.06.12; опубліковано 10.04.2014, Бюл. № 7. – 4 с.: іл. *Здобувачем проведено теоретичне обґрунтування цифрового способу фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів.*

12. Пат. на винахід 105412 Україна, МПК G04 F 10/00, G01R 25/00. Пристрій для вимірювання фазового часу затримки радіоімпульсних сигналів у широкому діапазоні частот/ Баженов В.Г., Богдан Г.А., Грузін С.В.; заявник і патентовласник Баженов В.Г. – №а201209729; заявл. 10.08.12; опубліковано 12.05.2014, Бюл. № 9. – 3 с.: іл. *Здобувачем обґрунтовано принципи роботи пристрою.*

13. Богдан Г.А. Метод определения коэффициентов затухания звука / В.Ф. Двиденко, В.Г. Баженов, Г.А. Богдан // X міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2011: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2011. – С. 206-207. *Здобувачем проведено аналітичне дослідження методу визначення коефіцієнту згасання звуку.*

14. Богдан Г.А. Цифровий вимірювач фазового часу проходження ультразвукових сигналів / С.В. Грузин, В.Г. Баженов, Г.А. Богдан // XI міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2012: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2012. – С. 214-215. *Здобувачем запропонований цифровий метод вимірювання фазового часу проходження ультразвукових сигналів.*

15. Богдан Г.А. Стробоскопічний спосіб вимірювання фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів / С.В. Грузин, В.Г. Баженов, Г.А. Богдан // XII міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2013: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2013. – С. 234. *Здобувачем запропонований стробоскопічний спосіб для вимірювання фазового часу проходження радіоімпульсних сигналів.*

16. Богдан Г.А. Разработка рекомендаций по повышению точности измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах / Р.М. Галаган, Ж.А. Павленко, Г.А. Богдан // XIV міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2015: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2015. – С. 187. *Здобувачем запропоновані методи підвищення точності вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в порошкових матеріалах.*

17. Богдан Г.А. Исследование упругих и микроструктурных характеристик порошковых конструкционных материалов с использованием ультразвуковых методов неразрушающего контроля / Р.М. Галаган, Г.А. Богдан // 7 Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання". Збірник тез доповідей. – Івано-Франківськ,

2014. – С. 81-85. *Здобувачем запропоновані методики контролю пружних та структурних характеристик ПКМ.*

18. Богдан Г.А. Разработка рекомендаций по оптимизации существующих методик контроля физико-механических характеристик порошковых конструкционных материалов / Р.М. Галаган, Г.А. Богдан // 8-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2015» (25-27 ноября 2015р. г. Минск, Республика Беларусь). Материалы конференции / БНТУ. – Минск, 2015. – С. 220-222. *Здобувачем запропоновані рекомендації по оптимізації існуючих методик контролю пружних та структурних характеристик ПКМ.*

19. Богдан Г.А. Применение факторного эксперимента при проведении ультразвуковой структуроскопии порошковых материалов / Р.М. Галаган, Г.А. Богдан // XV міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (17-18 травня 2016р. м. Київ, Україна). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2016. – С. 150. *Здобувачем досліджена можливість використання факторного експерименту при контролі фізико-механічних характеристик ПКМ.*

20. Богдан Г.А. Реконфигурируемая универсальная измерительная система / Баженов В.Г., Богдан Г.А., Грузин С.В. // 9-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2016» (23-25 ноября 2016р. г. Минск, Республика Беларусь). Материалы конференции / БНТУ. – Минск, 2016. – С. 21-22. *Здобувачем запропоновано систему, що дозволяє проводити вимірювання фазового часу проходження ультразвукових сигналів з високою точністю.*

21. Богдан Г.А. Ультразвуковая системы диагностики изменения физико-механических характеристик конструкционных материалов / Г.А. Богдан // XVI міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2017: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2017. – С. 145.

## АНОТАЦІЯ

**Богдан Г.А. . Вдосконалення ультразвукового методу контролю фізико-механічних характеристик порошкових матеріалів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2017.

Дисертація присвячена питанням підвищення точності вимірювання фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів за допомогою ультразвукового методу неруйнівного контролю та розробці спеціалізованої системи. Доведено, що для підвищення достовірності оцінки зміни фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів необхідно підвищити точність вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі, яка напряму залежить від точності вимірювання часу її проходження в досліджуваному матеріалі і геометричного розміру бази прозвучування.

Проведена класифікація факторів, що впливають на формування сумарної похибки вимірювання швидкості поширення ультразвукових хвиль в порошкових конструкційних матеріалах, виявлені її критичні складові та отримані їх аналітичні вирази.

Створено і досліджено експериментальний зразок ультразвукової системи діагностики фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів, в основу роботи якого покладено розроблені методи та засоби вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі та опрацювання результатів вимірювання. Запропонований ультразвуковий метод вимірювання фізико-механічних характеристик порошкових конструкційних матеріалів та створений засіб, який його реалізує, дозволили забезпечити вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі в матеріалах з похибкою меншою за 1%.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені в ТОВ НВФ «Діагностичні прилади» (м. Київ), ТОВ «Інженерно-будівельна компанія «Укрспецбуд»» (м. Київ), у навчальний процес кафедри приладів та систем неруйнівного контролю КПП ім. Ігоря Сікорського при викладанні курсів «Ультразвукові методи неруйнівного контролю» та «Автоматизовані засоби акустичного неруйнівного контролю».

*Ключові слова:* порошкові конструкційні матеріали, статистична діагностика, ультразвукові методи, неруйнівний контроль.

## АННОТАЦИЯ

Богдан Г.А. **Усовершенствование ультразвукового метода контроля физико-механических характеристик порошковых материалов.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы, методы контроля и определения состава веществ. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». – Киев, 2017.

Диссертация посвящена вопросам повышения точности измерения физико-механических характеристик порошковых конструкционных материалов с помощью ультразвукового метода неразрушающего контроля и разработке специализированной системы, в основу работы которой положен метод обработки результатов измерения скорости распространения акустической волны в порошковых конструкционных материалах, позволяющий уменьшить влияние случайных факторов на результат контроля. Проведенный анализ существующих методов оценки физико-механических характеристик порошковых конструкционных материалов при отработке технологии их изготовления показал, что для получения эффективной технологии производства и оптимизации исходного компонентного состава материала необходимо производить оценку изменений физико-механических характеристик после каждого технологического процесса. Показана необходимость существенного уменьшения погрешности измерения для выявления истинной вариации скорости ультразвука (как в партии, так и отдельных образцах, выполненных из многофазных порошковых материалов), обусловленной изменением технологических режимов изготовления.



В диссертационной работе рассмотрены методы измерения и преобразования фазы и фазовых сдвигов гармонических сигналов, показаны их достоинства и недостатки при необходимости выполнения прецизионных измерений скорости распространения ультразвуковой волны в порошковых конструкционных материалах. Разработаны высокоточные методы измерения фазового времени задержки акустического сигнала на основе дискретного ортогонального метода. Предложены структурные схемы устройств, позволяющих осуществлять прецизионные измерения скорости распространения радиоимпульсных сигналов в объекте контроля. Проведено математическое моделирование дискретного ортогонального метода измерения фазового сдвига сигналов для оценки погрешности метода.

Разработана структурная схема, аппаратная часть и конструкция системы для оценки изменения физико-механических характеристик по результатам акустического неразрушающего контроля. Уменьшение суммарной погрешности измерения скорости распространения ультразвуковой волны в порошковых конструкционных материалах было достигнуто за счет комплексного применения автоматизации процесса получения измерительной информации, методов статистической обработки данных, усовершенствованного ортогонального дискретного фазового метода измерения временной задержки и совокупности структурно-параметрических решений. Предложена методика проведения контроля физико-механических параметров порошковых конструкционных материалов по полученным результатам скорости распространения ультразвуковой волны и методика отработки технологии изготовления порошковых конструкционных материалов по результатам акустического неразрушающего контроля.

*Ключевые слова:* порошковые конструкционные материалы, статистическая диагностика, акустические методы, неразрушающий контроль

## ABSTRACT

Bogdan G.A. Improvement of ultrasonic testing method of physical and mechanical characteristics of powder materials. - On rights for a manuscript.

Dissertation is on the receipt of scientific degree of candidate of technical Sciences , specialty 05.11.13 – devices and methods of control and determination of substances composition. The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", MES Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to the problems of increasing the accuracy of measurement of physical and mechanical characteristics of powder structural materials with the help of acoustic methods of nondestructive testing and the development of a specialized system. The system based on the method of processing the results of measuring the velocity of an acoustic wave propagation in powdered structural materials that allows to reduce the influence of random factors on the testing result.

The analysis of the existing methods for evaluating the physico-mechanical characteristics of powdered structural materials during the development of the production technology showed that in order to obtain an efficient production technology and optimize the initial composition component of the material, it is necessary to evaluate the changes

in the physics-mechanical characteristics after each technological process. It is shown that the measurement error must be significantly reduced in order to detect the true variation in ultrasound velocity (both in batch and in individual samples made from multiphase powder materials) due to a change in technological manufacturing regimes. In the thesis, the factors that make a significant contribution to the total error formation in measuring the ultrasonic wave propagation velocity are considered. In the paper, techniques and methods are proposed to reduce their effect on the measurement result. They consist of the use of special blocks of primary converters, the system for mounting the transducer block on the surface of the monitoring object, and the use of special software that allows us to filter out the results with gross errors.

The structural scheme, hardware and system design for the estimation of the change in physical and mechanical characteristics based on the results of acoustic nondestructive testing are developed. Reduction of the total error in measuring the propagation velocity of ultrasonic waves in powdered structural materials was received due to the complex application of automation of the obtaining measurement information process, statistical data processing methods, an improved orthogonal discrete phase method for measuring time delay, and a set of structural-parametric solutions. A technique is proposed for monitoring physical and mechanical parameters of powder structural materials based on the obtained results of the ultrasonic wave propagation velocity and the technique for development the technology for manufacturing powder structural materials based on the results of acoustic nondestructive testing.

*Keywords:* powder structural materials, statistical diagnostics, acoustic methods, non-destructive testing.