

ПРИЛАДИ

УДК 620.179

Богдан Г.А.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Филиппова М.В.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

В статье рассмотрены вопросы создания лабораторного стенда для высокоточных измерений скорости распространения ультразвуковых волн для определения физико-механических характеристик порошковых материалов. Особенное внимание уделено способам уменьшения суммарной погрешности измерения за счет автоматизации процесса, использования методов статистической обработки данных и совокупности структурно-параметрических решений.

Ключевые слова: ультразвук, неразрушающий контроль, скорость распространения, точность, погрешность.

Постановка проблемы. Сегодня широкое распространение получили методы неразрушающего контроля (НК) для определения как дефектов, так и физико-механических характеристик различных порошковых материалов, особенно на стадии их изготовления [1].

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [2; 3] рассмотрены достоинства и недостатки различных методов, и показано, что для лабораторных измерений характеристик порошковых материалов наиболее рационально использовать ультразвуковые методы НК.

Из [4–6] известно, что ультразвуковые методы НК относятся к косвенным и позволяют оценить искомую величину по существующим корреляционным или аналитическим зависимостям скорости распространения ультразвуковой волны в исследуемом материале. При этом информативным параметром диагностики является скорость ультразвуковых колебаний прохождения сигналов в контролируемом объекте. Особенности отработки технологии изготовления порошковых конструкционных материалов (ПКМ) требуют обеспечения погрешности измерения информационного параметра УЗВ не более чем 1% [4], что является актуальной задачей. Примеры установок комплексного измерения акустических параметров волны приведены в [8; 9].

Однако наличие методических и случайных погрешностей в результатах измерения не позволяет обеспечить погрешность измерений 1% при контроле порошковых материалов. Поставленную задачу можно решить с помощью лабораторного стенда для измерения скорости распространения ультразвуковой волны (УЗВ) в объекте контроля, что позволит снизить погрешность определения ФМХ порошковых материалов.

Для обеспечения требуемой точности определения ФМХ порошковых материалов также необходимо провести анализ суммарной погрешности измерения скорости распространения УЗВ в порошковых материалах, выделить области, которые обуславливают возникновение максимальных погрешностей результатов измерения, и минимизировать их влияние на итоговый результат [4; 6; 10].

Постановка задания. Цель статьи – разработка лабораторного стенда, который позволит обеспечить погрешность измерения скорости распространения ультразвуковой волны в ПКМ не более 1%.

Изложение основного материала исследования. Как известно, измерение скорости относится к непрямым методам измерения [4; 6], при которых искомый информационный параметр находят из известных арифметических зависимостей

на основе измерения других величин. При реализации метода прохождения скорость распространения УЗВ рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{h}{t - t_0}, \quad (1)$$

где h – геометрическая база объекта контроля в точке измерения, t – время прохождения УЗВ вдоль базы измерения, t_0 – систематическая временная поправка, вызванная прохождением ультразвукового импульса в проводах.

Анализ ультразвуковых методов прохождения УЗВ показал, что на формирование скорости распространения УЗВ в ПКМ влияют две группы факторов: технологические и измерительные (рис. 1).

Для обеспечения объективности полученных результатов измерения необходимо, чтобы влияние измерительных факторов на результирующее значение скорости распространения УЗВ в ПКМ было существенно меньше влияния технологических факторов. Таким образом, необходимо провести комплексный анализ погрешностей, возникающих в процессе измерений скорости ультразвука в ПКМ, для повышения точности измерений, производимых на лабораторном стенде.

Рассмотрим составляющие суммарной неопределенности измерения скорости ультразвука. Согласно формуле (1), суммарная неопределенность, обусловленная неточностью измерения скорости распространения упругой волны в объекте контроля, имеет вид:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial h}\right)^2 \cdot u_h^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)^2 \cdot u_t^2}, \quad (2)$$

где u_h – неопределенность измерения геометрических параметров объекта контроля; u_t – неопределенность измерения времени распространения упругой волны в объекте контроля.

Уменьшение общей погрешности измерения скорости УЗВ должно решаться комплексно, с одновременным уменьшением погрешности измерения, толщины контролируемого материала и временного интервала прохождения УЗВ в нем. Для этого необходимо теоретически или экспериментально оценить и просуммировать все составляющие погрешности и суммировать с учетом законов их распределения.

К факторам, оказывающим наибольшее влияние на формирование суммарной погрешности при измерении скорости распространения УЗВ в ПКМ, относятся: квалификация оператора, сила прижатия блока ультразвуковых преобразователей к объекту контроля (ОК), несоосность установки датчиков на поверхности ОК, непараллельность поверхности исследуемого объекта, несовпадение акустической и геометрической базы измерения [4; 6]. Суммарная погрешность перечисленных факторов при измерении скорости прохождения УЗВ может составлять до 10%, что существенно превышает разброс информативного параметра, вызванный влиянием технологических факторов на процесс измерения.

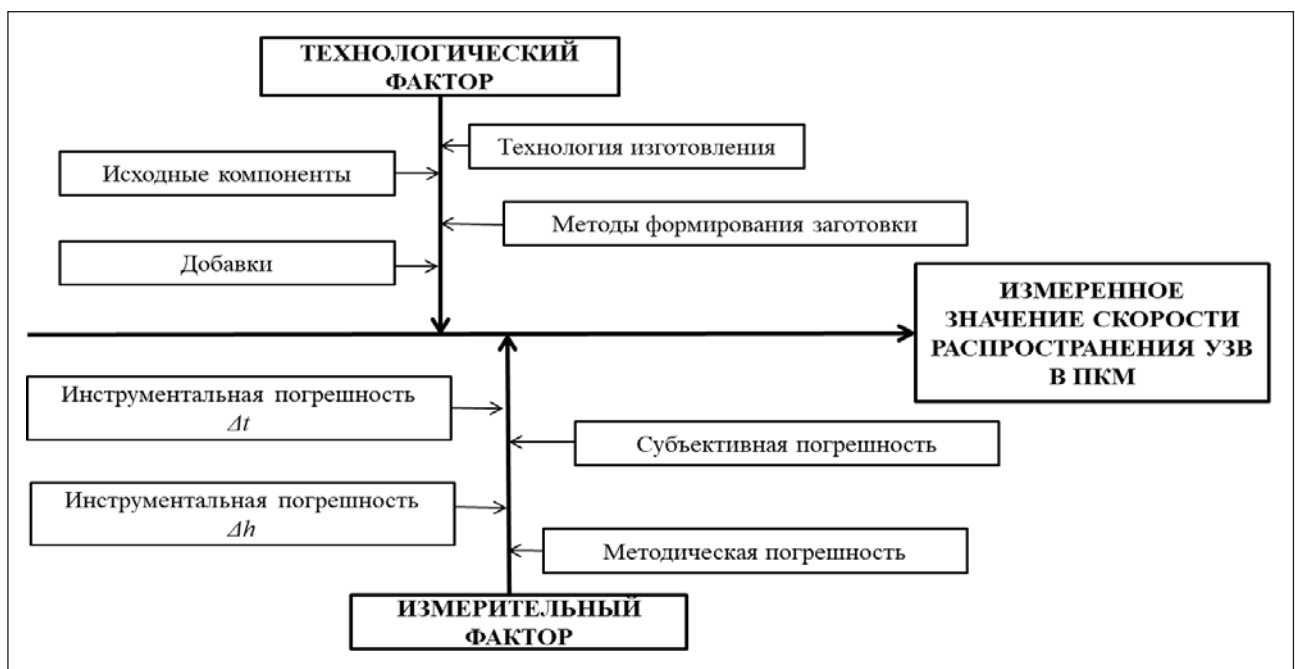


Рис. 1. Факторы, влияющие на результат измерения скорости распространения ультразвуковой волны в порошковых конструкционных материалах

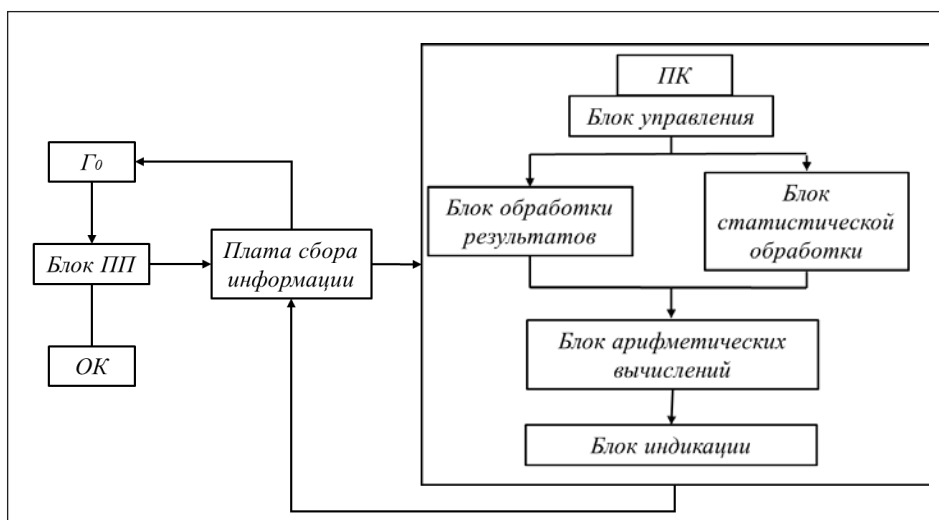


Рис. 2. Структурная схема лабораторного стенда для измерения скорости распространения УЗВ в ПКМ

G_0 – высокостабильный генератор сигналов частоты дискретизации;
 ПП – блок фиксации ультразвуковых преобразователей на поверхности ОК;
 ПК – персональный компьютер

Для уменьшения погрешности и повышения точности результатов измерения разработан лабораторный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 2.

Рассмотрим более подробно назначение отдельных блоков лабораторного стенда.

Блок ПП предназначен для жесткой фиксации ОК- и УЗ-пьезопреобразователей друг относительно друга, обеспечения соответствия геометрической и акустической осей друг другу, стабильности и повторяемости силы прижатия УЗ-преобразователей к поверхности ОК и соосности УЗ-датчиков. Это позволяет уменьшить методическую и субъективную составляющую суммарной погрешности измерения скорости распространения УЗВ в ОК. Блок ПП (рис. 3.) состоит из неподвижной нижней платформы, в которой закрепляется принимающий УЗ-датчик (в случае реализации УЗ-метода прохождения), подвижной верхней платформы с закрепленным на ней излучающим датчиком и винта, по которому происходит перемещение верхней платформы. Такая конструкция блока ПП позволяет производить контроль объектов различных геометрических размеров.

За счет использования динамометрического механизма в винтовой конструкции разработанного блока выполняется обеспечение постоянной силы прижатия датчиков к поверхности ОК. Использование специальных сменных вкладышей позволяет производить измерения с различными ультразвуковыми датчиками.



Рис. 3. Внешний вид блока фиксации ультразвуковых преобразователей на поверхности ОК

Данная конструкция лабораторного стенда позволяет реализовать два ультразвуковых метода измерения скорости прохождения упругой волны: метод прохождения и эхо-метод. В случае реализации эхо-метода используется другой алгоритм расчета скорости распространения УЗВ.

Для уменьшения субъективной погрешности измерения расчет геометрических размеров базы прозвучивания производится автоматически с использованием электронного штангенциркуля [11].

На базе платы сбора информации реализовано устройство, позволяющее одновременно производить измерения времени прохождения ультразвуковой волны в ОК и геометрических параметров ОК. Данное устройство реализует как амплитудный метод измерения времени задержки, так и фазовый, обеспечивая при этом работу в широком частотном диапазоне. Также плата сбора информации осуществляет формирование зондирующего импульса и сбор измерительной информации.

Основные технические характеристики платы сбора информации:

1. Частота зондирующих импульсов изменяется в пределах от 2,5 МГц до 10 (выбирается в зависимости от материала ОК).
2. Динамический диапазон усиления приемного тракта – 48 дБ.
3. Частота дискретизации – 100 МГц.
4. Разрядность АЦП – 14 бит.

В ПК реализованы функции: управления и синхронизации работы всей системы, обработки результатов измерений, статистической обработки данных, вычисления времени прохождения УЗВ в ОК и индикации результатов измерения и математического вычисления.

Информационное и программное обеспечение для выполнения совместной работы разработанной платы сбора информации и компьютера, реализации алгоритмов статистической и математической обработки полученных результатов измерений реализовано в среде разработки и платформы для выполнения программ, созданной на графическом языке программирования LabView (National Instruments, USA). По сигналу с ПК осуществляется работа всего лабораторного стенда, то есть измерения толщины ОК, времени задержки, обработка полученных массивов данных, расчет искомых характеристик ПКМ и вывода полученных результатов на экран монитора. В настройках стенда есть возможность задания количества необходимых измерений.

Для проведения исследований были использованы образцы в форме прямоугольной призмы с размером стороны 3 мм из многофазного материала (композитный материал типа LaB6-TiB2) и однофазного материала (органическое стекло). Измерения проводились по одной плоскости.

Использовался ультразвуковой метод прохождения на частоте 2,5 МГц. Скорость распространения ультразвуковой волны в ОК при использовании метода прохождения рассчитывается по формуле (1).

Для каждой точки прозвучивание измерения информационных параметров проводилось 100 раз с последующим усреднением полученных результатов. В табл. 1 приведены основные статистические характеристики выборок измеренных значений скорости УЗХ в образцах.

Анализ приведенных в табл. 1 данных показал, что полученные результаты измеренных значений скорости распространения УЗВ имеют незначительный разброс данных как в однофазном материале, так и в многофазном. Использование разработанного лабораторного стенда позволяет обеспечить погрешность измерения скорости распространения УЗВ для однофазных материалов на уровне 0,4%, для многофазных – 1%.

Выводы. Лабораторный стенд позволяет реализовать различные ультразвуковые методы неразрушающего контроля, проводить диагностику физико-механических характеристик порошковых конструкционных материалов. Использование разработанной системы для оценки физико-механических характеристик порошковых конструкционных материалов позволяет обеспечить измерение скорости распространения ультразвуковой волны с погрешностью менее 1%. Уменьшение погрешности достигается за счет комплексного применения автоматизации процесса получения измерительной информации, методов статистической обработки данных и совокупности структурно-параметрических решений.

Таблица 1

Статистические характеристики измеренных значений скорости распространения УЗВ в исследуемых образцах по выборкам объема N = 100

Материал ОК	Скорость распространения УЗВ, (м/с)				
	min	max	Размах	Математическое ожидание	Среднее квадратическое отклонение
Орг. стекло	2659	2683	24	2672,72	6,076
LaB6-TiB2	8356	8645	259	8514	10,81

Список литературы:

1. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / под ред. В.В. Клюева. Москва : Машиностроение, 2003. 656 с.
2. Барынин В.А., Будадин О.Н., Кульков А.А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. Москва : Спектр, 2013. 242 с.
3. Щербинский В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия: вчера, сегодня, завтра. *В мире неразрушающего контроля*. 2002. № 4(18). С. 6–9.
4. Богдан Г.А., Галаган Р.М. Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 1: Влияние субъективной погрешности. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування»*. 2015. Вип. 49. С. 53–60.
5. Panakkal J.P. Ultrasonic velocity as a predictor of Young's modulus in porous materials. *Materials Evaluation*. 1997. V.55. № 12. P. 1367–1371.
6. Богдан Г.А., Галаган Р.М. Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 2: Влияние инструментальной и методической погрешностей. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Приладобудування»*. 2016. Вип. 51(1). С. 52–57.
7. Балдев Р., Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. Москва : Техносфера, 2006. 576 с.
8. Кондратьев А.И. Прецизионные методы и средства измерения акустических величин твердых сред. Хабаровск : ДВГУПС, 2006. 152 с.
9. Базылев П.В., Кондратьев А.И., Луговой В.А. Эталонная установка для комплексного измерения акустических параметров в конденсированных средах. *III Российская научно-техническая конференция «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций»*. Хабаровск, 2007. С. 229–233.
10. Demchenko M., Tymchik G., Filippova M. Analysis of acoustic diagnostics errors of stress state for shaped profiles of metal structures. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2016. № 5(6). P. 50–57.
11. Галаган Р. М., Кащич М.В. Ультразвуковой штангенциркуль. *Методи та прилади контролю якості*. 2008. № 20. С. 18–20.

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ТОЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

У статті розглянуто питання створення лабораторного стенду високоточних вимірювань швидкості поширення ультразвукових хвиль для визначення фізико-механічних характеристик порошкових матеріалів. Особливу увагу приділено способам зменшення сумарної похибки вимірювання за рахунок автоматизації процесу, використання методів статистичної обробки даних та сукупності структурно-параметричних рішень.

Ключові слова: *ультразвук, неруйнівний контроль, швидкість поширення, точність, похибка.*

THE LABORATORY BENCH FOR HIGH-PRECISION MEASUREMENTS OF ULTRASONIC WAVES PROPAGATION VELOCITY

The article deals with the laboratory test bench creation for high-precision measurements of the ultrasonic wave velocity propagation to determine the powder materials physic mechanical characteristics. Particular attention is paid to ways to reduce the total measurement error by automating the process, using statistical data processing methods, and a set of structural and parametric solutions.

Key words: *ultrasound, non-destructive control, rate of distribution, accuracy, error.*