

## **КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 620.179.16

### **АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В МНОГОФАЗНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ. ЧАСТЬ 1: ВЛИЯНИЕ СУБЪЕКТИВНОЙ ПОГРЕШНОСТИ**

*Галаган Р. М., Богдан Г. А.*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
г. Киев, Украина*

*Статья посвящена анализу субъективной погрешности измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Проведён анализ методики измерений и выделены области, обуславливающие возникновение погрешностей. Показана необходимость существенного уменьшения погрешности измерения для выявления истинной вариации скорости ультразвука (как в партии, так и отдельных образцах из многофазных порошковых материалов), которая является следствием технологических режимов изготовления. В работе показано, что автоматизация процесса в совокупности с использованием схемотехнических, методических, конструкционных и других способов устранения влияния человеческого фактора на результат позволяет значительно повысить достоверность за счёт сокращения доли участия человека в процессе проведения и обработки результатов контроля. Проведённый анализ субъективной составляющей общей погрешности измерения позволил предложить рекомендации по её уменьшению.*

***Ключевые слова:** субъективная погрешность, скорость ультразвука, порошковые материалы.*

#### **Введение**

В настоящее время расширяется сфера применения многофазных порошковых конструкционных материалов (ПКМ), изготовленных методами порошковой металлургии, в различных областях промышленности, техники, медицины. Данная отрасль металлургии используется как для создания хорошо известных материалов общего назначения, так и для изготовления принципиально новых материалов и изделий из них с комплексом прогнозируемых физико-механических характеристик. Одним из основных направлений развития технологии машиностроения является совершенствование существующих и разработка новых безотходных, материалосберегающих производственных процессов [1].

Поскольку возникновение дефектов и изменение структуры материала может происходить на любой стадии процесса изготовления изделия, то имеет особое значение разработка оперативных методов неразрушающего контроля (НК), которые позволяют оценить изменение физико-механических характеристик ПКМ с высокой точностью на любом этапе исследования и установления эффективных технологических режимов процесса производства.

Широкое распространение для целей диагностики процессов формирования получили ультразвуковые методы, которые обладают наибольшей методической простотой и универсальностью, позволяя непосредственно определять с помощью известных соотношений характеристики материала по измеренным значениям скорости распространения и коэффициента затухания ультразвука [2].

### **Постановка задачи**

Решение задачи получения многофазных порошковых материалов с наперед заданными физико-механическими характеристиками состоит из двух этапов:

1. Последовательный поиск методом перебора процентного соотношения и размера частиц исходных компонентов в образце.

2. Отработка технологии изготовления путем изменения комбинаций технологических режимов.

На каждой из этих стадий проводится ультразвуковой контроль. В первом случае относительное изменение скорости распространения ультразвуковой (УЗ) волны, обусловленное влиянием технологических факторов, между образцами может достигать 10%, во втором – не превышает 2%. Также необходимо учитывать, что в связи с неоднородностью внутренней структуры исследуемых материалов, скорость распространения УЗ волны в пределах одного образца может колебаться в пределах 1% [3]. Это означает, что при значении скорости распространения ультразвуковой волны 6000 м/с в объекте контроля (ОК), изменение скорости в пределах партии образцов будет достигать 600 м/с в первом случае и 100-120 м/с – во втором. При этом в пределах одного образца, при прозвучивании в одной плоскости, размах изменения скорости распространения УЗ волны достигает 50 м/с.

Известно, что связь между измеряемыми параметрами упругой волны и исследуемыми характеристиками материалов имеет корреляционную или аналитическую зависимость [4].

На вариацию скорости УЗ волны в конструкционных материалах влияют как исходные компоненты изделия, так и технологические режимы изготовления [4, 5], что приводит к значительным изменениям физико-механических параметров как в пределах одной партии образцов, так и в объеме отдельной заготовки. Поэтому при ультразвуковой структуроскопии необходимо измерять не только абсолютные значения скорости распространения упругой волны в различных точках контролируемого объекта, но и оценивать относительные изменения этой скорости по всему объему образца. При этом для обеспечения достоверности анализируемых данных необходимо, чтобы погрешность измерения в каждой отдельно взятой точке была на порядок меньше, чем разброс значений скорости ультразвука, который обусловлен разбросом физико-механических характеристик. В таком случае появится возможность эффективно использовать методы статистического анализа данных для разработки критериев диагностики.

Цель работы – провести комплексный анализ погрешностей, которые возникают в процессе измерений скорости ультразвука в том или ином изделии из

ПКМ, что позволит дать рекомендации по способам их уменьшения. В данной части работы рассматривается составляющая общей погрешности, обусловленная влиянием субъективных факторов.

### Методика измерения скорости ультразвука

В качестве объекта контроля (ОК) выступают заготовки в форме параллелепипеда с длиной порядка 20 мм, шириной и высотой порядка 4-5 мм. Толщина по длине образца колеблется в пределах 1,5 мм. Согласно существующей методике измерения скорости ультразвука проводится по длине образца на перпендикулярных гранях по трем точкам.

Результирующий диапазон скоростей  $\Delta C_{рез}$  будет определяться вариацией скорости  $R_{Стех}$ , обусловленной технологическими факторами и исходными компонентами, и доверительными границами общей измерительной погрешности  $\Delta C_{изм}$ , зависящей от среднеквадратического отклонения, вида закона распределения и доверительной вероятности (рис. 1).

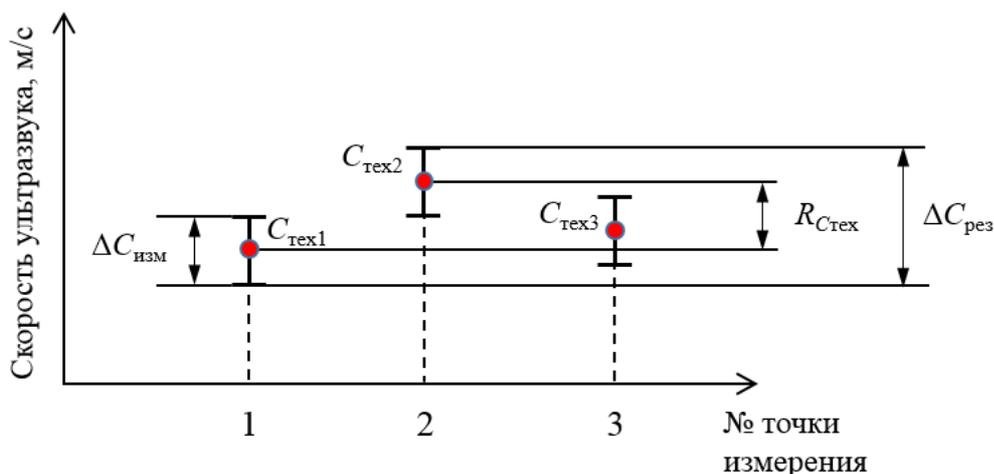


Рис. 1. Влияние погрешности измерения на формирование результирующего диапазона скоростей:  $C_{тех}$  – значение скорости, обусловленное влиянием технологических факторов

На рис. 1 схематически представлен случай соизмеримости вариации скорости  $R_{Стех}$  и интервала изменения скорости  $\Delta C_{изм}$ , определяемого доверительными границами общей измерительной погрешности. Очевидно, что в такой ситуации на основании полученного результирующего значения скорости ультразвука в каждой точке измерения невозможно объективно судить о физико-механических характеристиках изделия (другими словами, результаты таких измерений не могут вызывать доверия), поскольку непонятно, чем именно обусловлен результат – влиянием погрешности или физико-механических свойств. С учётом написанного в предыдущем разделе, данная ситуация вполне реальна в рамках решаемой задачи, например, если общая погрешность измерения будет находиться в пределах 1%. Поэтому поиск путей уменьшения общей погрешности является важной задачей.

Необходимо учитывать, что измерение скорости является косвенным, при котором искомое значение величины находят расчетом на основе измерения других величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью. Скорость распространения ультразвуковой волны  $C$  в ОК при использовании метода прохождения рассчитывается по формуле (рис. 2):

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

где  $h$  – база измерения (толщина изделия в точке измерения);  $t$  – измеренное с помощью ультразвукового прибора время прохождения акустического импульса вдоль базы измерения;  $t_0$  – систематическая временная поправка.

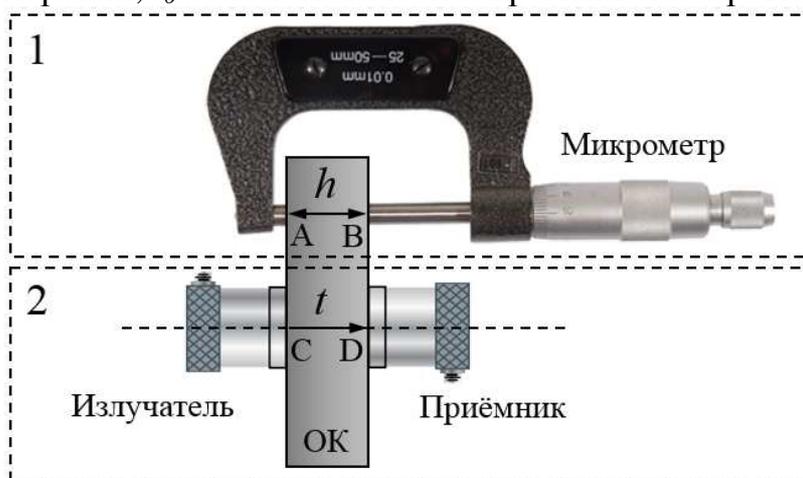


Рис. 2. Упрощённая схема определения скорости ультразвука в образце из ПКМ при использовании метода прохождения: 1 – измерение геометрических размеров (базы прозвучивания); 2 – измерение времени прохождения ультразвукового импульса вдоль базы прозвучивания

На рис. 1 для удобства представления база прозвучивания АВ и длина акустического тракта CD разнесены, тогда как при реальных измерениях точка А должна совпадать с точкой С, точка В – с D.

Исходя из формулы (1) и рис. 2 очевидно, что имеется две области возникновения погрешностей: 1) измерение геометрических характеристик изделия и 2) измерение времени распространения упругой волны в ОК. Для оценки достоверности полученных результатов измерения необходимо теоретически или экспериментально оценить все составляющие погрешности и просуммировать их по определенному закону [6, 7]. Примеры оценки составляющих общей погрешности, влияющей на результат контроля физико-механических характеристик различных объектов приведены в работах [8, 9, 10]. Комплексная оценка всех факторов, обуславливающих результат измерений, является первой итерацией, на основе которой возможно будет выделить значимые и незначимые (которыми возможно пренебречь в силу их малости) факторы. С другой стороны, такая оценка позволит выявить факторы, на которые можно влиять различными схемотехническими, методическими, конструкционными и другими способами

и факторы, которые преодолеть в силу тех или иных причин невозможно (или невозможно оценить их вклад в результат измерения).

### **Анализ влияния субъективных факторов**

Влияние человеческого фактора может существенно снизить потенциальную надежность и эффективность системы, что показано в работах [11, 12], где авторами рассматривается предложенная ими концептуальная формула надёжности, впоследствии ставшая частью модульной модели надёжности, в которой учитывается влияние и субъективных факторов. Там же приведены некоторые результаты исследования этого влияния на результат УЗ дефектоскопии, а также проанализированы причины его проявления.

В табл. 1 приведены факторы, влияющие на субъективную погрешность измерения скорости ультразвука в образцах ПКМ при проведении т.н. ручного контроля (в первую очередь классификация приведена относительно специфики решаемой задачи, хотя в целом она носит обобщённый характер и может быть применима для решения и других задач).

Таблица 1. Факторы, влияющие на субъективную погрешность

Область возникновения	Фактор	Область возникновения
Измерение времени прохождения УЗ волны в ОК	Квалификация оператора	Измерение геометрических размеров ОК
	Зрительное восприятие оператора	
	Обеспечение условий контроля	
	Степень ответственности оператора и соблюдение технологии контроля	
	Психофизиологическое состояние оператора	
	Усилие прижатия блока преобразователей к ОК	
	Неточность установки первичных преобразователей	

Влияние квалификации оператора – это неустранимый фактор при проведении ручного контроля, который выражается в самых разных непредсказуемых проявлениях, например: понимание оператором основ акустического контроля; умение настроить прибор (т.е. квалифицированное использование средства измерения); способность оценить состояние поверхности изделия и подготовить образец к контролю; умение измерить геометрические параметры ОК; правильно выбрать точки для измерения и т.д. При проведении акустического контроля одной из наиважнейших подготовительных операций является калибровка средства измерения – процесс, всецело зависящий от квалификации и компетентности оператора. Результат калибровки непосредственно влияет на погрешность последующего измерения скорости ультразвука.

Под обеспечением условий контроля подразумевается влияние освещённости, удобство рабочего места, качество подготовки изделия к контролю и т.п.

При проведении ручного контроля возможны значительные вариации усилия прижатия блока датчиков к ОК, что приводит к изменению толщины слоя контактной жидкости, а также амплитуды акустического импульса, излучаемого в ОК. К тому же толщина контактного слоя будет определяться вязкостью и капиллярными свойствами используемой для обеспечения акустического контакта вещества. Таким образом, в различных точках измерения на поверхности ОК в разные моменты времени толщина слоя контактной жидкости будет варьироваться в определённых пределах; даже в одной и той же точке на поверхности ОК при многократном измерении в разные моменты времени невозможно обеспечить стабильность толщины слоя контактной жидкости в режиме ручного контроля. Очевидно, что данная составляющая погрешности носит случайный характер, для учёта которой необходимо знать закон её распределения и граничные отклонения, что весьма проблематично. Радикальным способом устранения этой погрешности является изъятие из измерительного интервала времени пробега сигнала в шаре контактной жидкости. Для этого интервал времени измеряется не между зондирующим и первым донным импульсом, а между соседними донными импульсами в эхо-режиме [13]. Другим подходом к минимизации влияния нестабильности акустического контакта является стабилизация усилия прижатия, вследствие чего данная погрешность по характеру проявления становится систематической, что позволяет легко её компенсировать за счет введения соответствующих поправок при калибровке прибора.

Под точностью установки первичных преобразователей на контролируемом изделии понимают соосность излучающего и принимающего датчика (при использовании методов прохождения). При неправильной установке датчиков (не соблюдается соосность) увеличивается путь, вдоль которого распространяется акустический импульс (рис. 3), по отношению к истинному размеру базы измерения (толщины изделия в точке контроля).

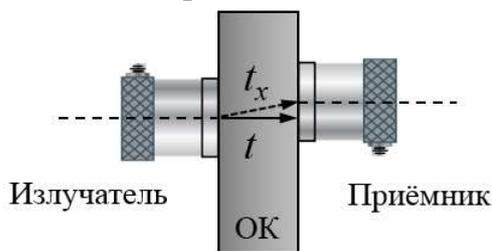


Рис. 3. Влияние несоосности установки датчиков на результат измерения времени прохождения УЗ импульса

Соответственно увеличивается время пробега импульса, что приводит к возникновению погрешности.

По нашему мнению при существующей на сегодняшний день методике контроля субъективная погрешность вносит существенный (доминирующий) вклад в общую погрешность измерения. При этом значительным ограничением явля-

ется то, что субъективная погрешность практически не поддается расчету. Более того, именно данный вид погрешности в рамках решаемой задачи может приводить к возникновению грубых погрешностей.

### **Рекомендации по уменьшению субъективной погрешности**

Основными направлениями в борьбе с субъективной погрешностью является разработка и внедрение методологических и системотехнических решений [14]. В совокупности они позволяют разработать специализированные методики контроля с использованием автоматизированных систем при условии обеспечения требуемой чувствительности контроля.

Одним из подходов к уменьшению влияния субъективной погрешности при измерении скорости ультразвука в образцах из ПКМ может стать замена двух последовательных измерительных операций (геометрические размеры и время), выполняемых оператором, на параллельное измерение этих параметров с помощью специализированной автоматизированной системы. Данная система должна обеспечивать возможность одновременно в одной и той же точке контролировать оба измеряемых параметра без участия оператора, проводить необходимое количество измерений, обеспечивая воспроизводимость и сходимость измерения, а также выдавать первичную оценку результатов контроля. Это позволит избежать ошибочного толкования полученных значений измерений и появления грубых ошибок, которые могут приводить к значительному искажению полученных результатов.

Автоматизированная система и специальная конструкция позволит контролировать усилие прижатия блока преобразователей к ОК, что приведёт к стабилизации толщины слоя контактной жидкости и, соответственно, более точному учёту его влияния на результат измерений.

С использованием автоматизированной системы некоторые составляющие субъективной погрешности впоследствии можно будет отнести по источнику возникновения к методическим, а по характеру проявления – к систематическим погрешностям, что значительно облегчит их учёт и компенсацию.

### **Выводы**

Повышение достоверности ультразвукового контроля в значительной мере зависит от степени автоматизации процесса измерения. Использование схемотехнических, методических, конструкционных и других способов устранения влияния человеческого фактора на результат позволяет значительно повысить достоверность за счёт сокращения доли участия человека в процессе проведения и обработки результатов контроля.

Проведённый анализ субъективной составляющей общей погрешности измерения позволил предложить два ключевых подхода к её уменьшению: 1) конструкционный, который заключается в разработке специальной конструкции, согласовывающей измерения геометрических размеров и времени прохождения точно вдоль одной базы с одновременным обеспечением стабильности усилия

прижатию первичных преобразователей к изделию, и 2) методологический, заменяющий выполнение двух измерительных операций, выполняемых последовательно, на параллельные измерения.

Однако общая погрешность не ограничивается влиянием субъективных факторов. Необходимо также провести анализ инструментальной и методической составляющих общей погрешности, чему и будут посвящены дальнейшие исследования.

### **Литература**

1. Гращенков Д. В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов / Д. В. Гращенков, Л. В. Чурсова // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 231 – 242.
2. Ермолов И. Н. *Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Том 3. Ультразвуковой контроль* / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге; под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
3. Безымянный Ю. Г. Использование ультразвука при отработке технологии получения порошкового материала / Ю. Г. Безымянный, Г. А. Богдан, А. Н. Колесников, А. В. Лаптев, А. И. Толочин, Е. В. Хоменко // *КОНСОНАНС-2011. Акустический симпозиум*. – 2011. – С. 28 – 33.
4. Муравьев В.В. *Скорость звука и структура сталей и сплавов*/ В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
5. Роман О. В. *Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии* / О. В. Роман, В. В. Скороход, Г. Р. Фридман. – Мн.: Выш. шк., 1989. – 182 с.
6. Бурдун Г. Д. *Основы метрологии* / Г. Д. Бурдун, Б. Н. Марков М. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 226 с.
7. Грановский В. А. *Методы обработки экспериментальных данных при измерениях*/ В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 228 с.
8. Еременко В.С. *Определение требований к метрологическим характеристикам приборов и методик при проведении ультразвуковой структуроскопии материалов* / В. С. Еременко, Р. М. Галаган // *Научни известия на НТСМ. – Созополь (Болгария)*. – 2012. – №1 (133). – С. 71 – 75.
9. Еременко В. С. *Шляхи мінімізації сумарної похибки вимірювання швидкості ультразвуку в матеріалах з неоднорідною структурою* / В. С. Еременко, Р. М. Галаган // *Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал*. – Одеса. – 2012. – № 06 (82). – С. 39 – 45.
10. EN 14127:2004 (E). *Non-Destructive Testing – Ultrasonic Thickness Measurement*
11. Müller, C., Bertovic, M., Gaal, M., Heidt, H., Pavlovic, M., Rosenthal, M., Takahashi, K., Pitkänen, J. and Ronneteg, U. “Progress in Evaluating the Reliability of NDE. Systems – Paradigm Shift”. *Proceedings of the 4th European-American Workshop on Reliability of NDE, Berlin, June 24-26, 2009 DGZfP Proceedings BB 116-CD*.
12. Mueller, C., Bertovic, M., Kanzler, D., Heckel, T., Holstein, R., Ronneteg, U., Pitkänen, J., Rosenthal, M. “Assessment of the Reliability of NDE: A Novel Insight on Influencing factors on POD and Human Factors in an organizational Context”. *Proceedings of the 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic, Vol. 1, pp. 2-19*.
13. Цапенко В. К. *Основы ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник* / В. К. Цапенко, Ю. В. Куц. – К.: НТУУ “КПІ”, 2010. – 448 с.
14. Водзик П. И. *Влияние субъективного фактора на достоверность результатов неразрушающего контроля* / П. И. Водзик, Ж. А. Павленко, Д. П. Водзик // *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ*. – 2013. – № 46. – С. 42 – 48.

*Надійшла до редакції  
24 лютого 2015 року*

© Галаган Р. М., Богдан Г. А., 2015