

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

УДК 620.179.16

**АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ В МНОГОФАЗНЫХ
ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ. ЧАСТЬ 2: ВЛИЯНИЕ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ И МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ***Галаган Р. М., Богдан Г. А.**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»**г. Киев, Украина**E-mail: rgalagan@ukr.net; psnk@kpi.ua*

Статья посвящена анализу инструментальной и методической погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Показана необходимость существенного уменьшения погрешности измерения для выявления истинной вариации скорости ультразвука (как в партии, так и отдельных образцах из многофазных порошковых материалов), зависящей от технологических режимов изготовления.

Предложены рекомендации по уменьшению влияния некоторых факторов, обуславливающих возникновение инструментальной и методической погрешностей измерения.

Ключевые слова: *инструментальная погрешность, методическая погрешность, скорость ультразвука, порошковые материалы.*

Введение

В первой части данного цикла статей (см. [1]) был проведён подробный анализ субъективной составляющей общей погрешности измерения скорости ультразвука в многофазных порошковых материалах. По результатам анализа были сформулированы рекомендации по уменьшению влияния человеческого фактора на результат контроля.

Данная статья посвящена анализу инструментальной и методической погрешности измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах.

Постановка задачи

На формирование физико-механических характеристик порошковых материалов значительное влияние оказывают как исходные компоненты изделия, так и технологические режимы изготовления [2, 3]. Вследствие неидеальности технологии изготовления физико-механические параметры как в пределах одной партии образцов, так и в объеме отдельной заготовки могут варьироваться в некоторых пределах [4].

По результатам измерения скорости ультразвука рассчитываются (или определяются из корреляционных зависимостей) требуемые физико-

механические характеристики исследуемой заготовки.

В процессе измерения возникают погрешности, вследствие чего измеренные значения скорости в разных точках образца (или партии изделий) будут отличаться. Соответственно, для обеспечения достоверности анализируемых данных необходимо, чтобы влияние погрешности измерения в каждой отдельно взятой точке было меньшим, чем разброс значений скорости ультразвука, обусловленный разбросом физико-механических характеристик.

Для разработки рекомендаций по уменьшению суммарной погрешности измерения необходимо провести анализ её составляющих и причин возникновения. Определив количественные параметры всех составляющих погрешности и зная способы их суммирования, можно правильно оценить погрешность результата измерений и при возможности скорректировать его с помощью введения поправок.

Цель работы – провести комплексный анализ методической и инструментальной погрешностей, которые возникают в процессе измерений скорости ультразвука в заготовке из порошкового материала, и дать рекомендации по способам их уменьшения.

Анализ влияния инструментальной погрешности

Инструментальная погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, обусловленная несовершенством применяемого средства измерения: отличием реальной функции преобразования прибора от его калибровочной зависимости, неустранимыми шумами в измерительной цепи, запаздыванием измерительного сигнала при его прохождении в электрических цепях, неточностями, допущенными при изготовлении и регулировке прибора, изменениями параметров элементов конструкции и

схемы вследствие старения и др. Инструментальная погрешность измерений разделяется на основную (погрешность измерений при применении средства измерения в нормальных условиях) и дополнительную (составляющая погрешности измерений, возникающая вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от ее номинального значения или ее выхода за пределы нормальной области значений).

В табл. 1 приведены факторы, влияющие на инструментальную погрешность измерения скорости ультразвука.

Таблица 1. Факторы, влияющие на инструментальную погрешность

Область возникновения	Фактор
Измерение геометрических размеров ОК	Цена деления шкалы прибора
Измерение времени прохождения УЗ волны в ОК	Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) блока преобразователей
	Наличие соединительных кабелей
	Погрешность квантования и дискретизации аналогово-цифрового преобразователя (АЦП)
	Погрешность усилителя принятого сигнала
	Погрешность дискретности устройства отображения

При проведении ручного контроля используемая на сегодняшний день методика подразумевает измерение геометрических размеров изделия в точке прозвучивания с помощью механического штангенциркуля или микрометра.

Инструментальная погрешность приборов для измерения линейных размеров указана на самом приборе в виде абсолютной погрешности или в виде цены деления. Пределы приборной погрешности штангенциркуля равны цене деления нониуса и для современных механических образцов составляют $\pm 0,05$ мм или $\pm 0,1$ мм, а для микрометров $\pm 0,01$ мм. Измеряемая толщина образцов находится в пределах 4-5 мм, отсюда пределы относительной погрешности измерения толщины при цене деления 0,1 мм составят $\pm(2-2,5)\%$, 0,05 мм – $\pm(1-1,25)\%$, 0,01 мм – $\pm(0,2-0,25)\%$. Это означает, что применение штангенциркуля не целесообразно для решения поставленных задач, поскольку обуславливаемая им погрешность превышает 1%. Более того, при работе с механическими измерителями размеров сильное влияние может оказать человеческий фактор.

Погрешность измерителя временных интервалов (дефектоскопа) определяется качеством усилительного и измерительного трактов. На нее влияют частотная полоса пропускания усилителя, линейность и стабильность измерения временных интервалов, разрядность и частота дискретизации аналого-цифрового преобразования и т.д. Случайная погрешность АЦП в настоящее время за счёт увеличения разрядности (12-16 бит) и частоты дискретизации (сотни мегагерц) может быть сведена к минимуму (менее 0,1%), а систематическая кор-

ректируется программной калибровкой.

На результат измерения оказывает влияние физико-механические характеристики пьезокерамических преобразователей, а также качество изготовления и сборки самого датчика. Такое влияние проявляется за счёт искажения формы регистрируемых импульсных сигналов. Известно, что пьезокерамические преобразователи характеризуются диссипацией энергии в материале и собственными акустическими нелинейными искажениями [5, 6]. В рамках поставленной задачи преобразователи должны быть широкополосными и иметь равномерную АЧХ.

К погрешностям усилителей можно отнести: нестабильность коэффициента передачи, дрейф нуля, влияние АЧХ усилителя на форму сигнала и пр. Более детально эти погрешности рассмотрены в специализированной литературе [7].

Подведя итог, можно отметить, что традиционные микрометрические инструменты для измерения геометрических размеров и средства измерения временных интервалов позволяют обеспечить высокую точность измерений. Поэтому влияние инструментальной погрешности на результат контроля будет минимальным из рассматриваемых.

Анализ влияния методической погрешности

Методическая погрешность – составляющая погрешности измерений, обусловленная несовершенством метода измерений, а также упрощениями, положенными в основу методики. К ней относятся погрешности, обусловленные несовершенством способа воплощения принципа измерений, не

учитываемое взаимное влияние объекта контроля (ОК) и измерительных приборов или недостаточная точность такого учета, неточностью формул, применяемых при нахождении результата измерений, и другими факторами, не связанными со свойствами средства измерения. Сюда же можно

отнести погрешности, связанные с неполным учетом условий опыта.

В таблице 2 представлены факторы, оказывающие влияние на возникновение методической погрешности измерения скорости ультразвука.

Таблица 2. Факторы, влияющие на методическую погрешность

Область возникновения	Фактор	Область возникновения
Измерение времени прохождения УЗ волны в ОК	Неплоскопараллельность поверхностей	Измерение геометрических размеров ОК
	Шероховатость поверхности	
	Наличие сколов и внешних дефектов	
	Внешние условия контроля (температура, влажность и т.п.)	
	Несоответствие размера базы измерения размеру акустического тракта	
	Рабочая частота контроля	
	Внутренняя структура ОК	
	Реализуемый способ измерения времени прохождения	
	Выбранный метод акустического контроля	
	Калибровка средства измерения	
	Искажение переднего фронта принятого сигнала	

Неплоскопараллельность, шероховатость поверхностей, а также наличие сколов и внешних дефектов оказывает влияние как при измерении геометрических размеров, так и времени прохождения ультразвука. При использовании систем измерения необходимо учитывать состояние поверхности ОК, так как наиболее точные результаты измерений могут быть получены, если поверхность ввода и донная поверхность ОК являются гладкими и параллельными, без внешних дефектов. При наличии грубой поверхности минимальная контролируемая толщина возрастает из-за реверберации ультразвука в более толстом слое контактной жидкости. Неточность результатов измерения может быть вызвана колебаниями толщины слоя контактной жидкости под пьезоэлектрическим преобразователем, вызванной значительной шероховатостью ОК. Влияние сколов и внешних дефектов может быть сведено к нулю за счёт качества подготовки изделия к контролю, что частично пересекается с влиянием субъективного фактора.

Неплоскопараллельность поверхностей ОК влияет таким образом при установке излучающего и принимающего преобразователей, что их акустические оси будут находиться под некоторым углом друг к другу. Это означает, что принятый сигнал будет формироваться не основным лучом, а боковым, что влияет как на амплитуду принятого сигнала, так и на длину пути, проходимого акустическим импульсом. Рассчитать данную погрешность не представляется возможным в силу трудоёмкости определения угла наклона поверхностей введения и приёма ультразвука, единственный способ её устранения – технология изготовле-

ния и формования (или отрезания от большей части) отдельного образца, гарантирующая неплоскопараллельность поверхностей не более 2° .

Под погрешностями, возникающими вследствие внешних влияний, обычно понимают изменение показаний приборов под воздействием температуры, влажности и давления, влияние вибраций, постоянных и переменных ускорений, влияние электромагнитного поля и различных излучений [8]. Наиболее часто они приводят к появлению систематических погрешностей.

Про несоответствие размера базы измерения размеру акустического тракта частично было сказано при рассмотрении субъективной погрешности, когда речь шла про точность установки первичных преобразователей [1]. Здесь только можно добавить, что точки контакта измерителя геометрических размеров не соответствуют точкам контакта поверхности преобразователя, т.е. могут быть смещены на некоторое расстояние. Учитывая, что колебания толщины образца могут достигать 0,5 - 1 мм вдоль его длины, то могут возникнуть серьёзные отклонения размера базы измерения от размера акустического тракта.

Под влиянием внутренней структуры подразумевается наличие дефектов в объёме ОК, что приводит к невозможности точного измерения времени прохождения импульса, поскольку в случае эхо-метода он отразится раньше и может быть воспринят как первый донный, а в случае использования метода прохождения основной сигнал вообще может не попасть на приёмник (при этом сам приёмник может регистрировать другие реверберационные сигналы, неизбежно появляющиеся в

изделиях с малыми геометрическими размерами).

Калибровка средства измерения (СИ) – совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного СИ и соответствующим значением величины, определенной с помощью эталона, с целью определения действительных метрологических характеристик этого СИ [9]. Результаты калибровки позволяют определять: действительные значения измеряемой величины, поправки к показаниям СИ, погрешность СИ.

Калибровка дефектоскопа-толщиномера позволяет устранить время прохождения сигнала в протекторе, а также учесть степень истирания протектора. Данная погрешность частично зависит и от субъективного влияния, поскольку калибровка – это процесс настройки, сильно зависящий от квалификации оператора.

Особенности внутренней структуры порошковых многофазных материалов, химический состав исходных компонентов оказывают косвенное влияние на погрешность измерений временного интервала. Так наличие крупных фазовых включений приводит к увеличению рассеивания и затухания ультразвуковой волны в ОК, что препятствует (делает невозможным) выделение информативного сигнала в процессе измерения. Также рассматриваемые факторы накладывают ограничения при выборе метода акустического контроля, рабочей частоты и реализуемого способа измерения.

Рекомендации по уменьшению общей погрешности измерения

Известно, что измерение скорости ультразвука относится к косвенным, поскольку скорость C рассчитывается по результатам прямого измерения толщины h и времени прохождения ультразвуковых колебаний t и связана с измеряемыми величинами следующей функциональной зависимостью при использовании метода прохождения:

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

Если искомая величина y определяется в результате косвенных измерений и является функцией нескольких переменных $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, то в качестве результата измерения используют значение, получающееся при подстановке в формулу расчета средних значений аргументов, полученных при обработке их прямых измерений. Методика и формула для расчета абсолютной и относительной погрешностей величин, получаемых при косвенных измерениях, приведены в соответствующей литературе [10]. Для зависимостей вида (1) выведена формула упрощенного расчета относительной погрешности:

$$\delta_c = \delta_h + \delta_t = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta t}{t}, \quad (2)$$

Зависимость (2) представляет интерес с прак-

тической точки зрения при разработке методики и средства измерения скорости ультразвука в заготовках из порошковых материалов. Задача уменьшения общей погрешности измерения скорости ультразвука должна решаться одновременным уменьшением погрешности измерения толщины и временного интервала. Например, нет смысла уменьшать погрешность измерения временного интервала до сотых долей процента, если, как было показано выше, относительная погрешность измерения толщины с помощью микрометра составляет более 0,2%. Т.е. нет смысла усложнять аппаратные средства и внедрять сложные способы обработки ультразвуковых импульсов, если не решить задачу уменьшения погрешности измерения толщины. Единственным способом уменьшения погрешности измерения толщины является замена механических микрометров на другие средства измерения. Более того, наиболее эффективным вариантом будет замена двух последовательных измерительных операций (толщины и времени) на одновременные их измерения, причём с использованием автоматизированной системы.

Составляющие погрешности, возникающие за счёт влияния элементов электронного тракта, должны быть минимизированы за счёт подбора самой элементной базы. Также они могут быть уменьшены за счёт предварительной настройки средства измерения. Необходимо использовать прецизионные усилители с автоматической регулировкой усиления, а также коррекцией нуля.

Однако более важным является выбор способа измерения временной задержки. В используемых современных средствах измерения временной задержки чаще всего применяется амплитудный пороговый способ. Для решения рассматриваемой задачи необходимо применять фазовые методы измерения, обладающие большей точностью и помехоустойчивостью по сравнению с амплитудными. Однако выбор данного метода измерения будет эффективным лишь в случае применения автоматизированной системы, когда устранено значительное влияние субъективных и методических факторов.

Использование дистанционных способов снятия информативных параметров позволит избежать погрешности связанной с наличием соединительных кабелей.

Для уменьшения методической погрешности необходимо:

- увеличить требования к чистоте и внешнему виду поверхности ОК;
- проводить измерения в специальной акустической камере со стабильными внешними условиями;
- обеспечить эквивалентность геометрического и акустического трактов;
- при выборе метода, способа контроля и рабочей частоты учитывать особенности структу-

ры исследуемых изделий.

Также здесь можно сказать несколько слов и о выборе конструкции датчика. Использование жидкостей для обеспечения контакта между датчиком и поверхностью заготовки из пористого материала может приводить к их впитыванию, что обусловит некоторое изменение скорости ультразвука, поскольку поры будут заполнены не воздухом, а жидкостью. Соответственно, использование жидкости необходимо свести к минимуму, поскольку обеспечить сухой контакт на высокой частотах практически невозможно. В таком случае можно рекомендовать использование способа измерения через тонкую полиэтиленовую плёнку [3] или с помощью гидравлической подушки [11]. Хотя оба этих способа позволяют избежать проникновения жидкости внутрь пористого изделия, однако при этом они вносят дополнительные погрешности. Ещё одним решением может быть применение специальной конструкции датчиков, обеспечивающих минимальную площадь поверхности соприкосновения и фокусировку ультразвукового луча в точке контакта [12].

Как отмечалось ранее [1], одним из подходов к минимизации субъективной погрешности является разработка блока прижатия датчиков к поверхности изделия с автоматической регулировкой силы прижатия. Однако эта сила должна быть отрегулирована, поскольку чрезмерное усилие на образцах небольшой толщины (4-5 мм) может приводить к местным напряжениям и деформациям, что будет обуславливать изменение модулей упругости, а соответственно и измеренных значений скорости ультразвука.

Выводы

Разработка автоматизированного средства для измерения скорости ультразвука в заготовках из пористых конструкционных материалов в процессе отработки технологии их изготовления является актуальной задачей. Проведённый комплексный анализ погрешностей позволил дать рекомендации по их уменьшению или устранению.

Продолжением работы являются следующие направления:

- анализ влияния силы прижатия преобразователя к образцу на результат измерения и выбор наиболее оптимальной силы для изделия заданной геометрической формы и параметров;
- проведение факторного эксперимента с детальным ранжированием рассмотренных погрешностей и отсеиванием несущественных;
- разработка алгоритма работы системы и программных средств, позволяющих проводить статистический анализ результатов измерений (в т.ч. проводить усреднение в каждой точке,

анализировать закон распределения, рассчитывать статистические характеристики, отсеивать грубые погрешности и т.п.).

Литература

1. Галаган Р. М. Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 1: влияние субъективной погрешности / Р. М. Галаган, Г. А. Богдан // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2015. – № 49(1). – С. 53 – 60.
2. Муравьев В. В. Скорость звука и структура сталей и сплавов / В. В. Муравьев, Л. Б. Зуев, К. Л. Комаров. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
3. 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.
4. Безьямный Ю. Г. Использование ультразвука при отработке технологии получения порошкового материала / Ю. Г. Безьямный, Г. А. Богдан, А. Н. Колесников, А. В. Лаптев, А. И. Толочин, Е. В. Хоменко // КОНСОНАНС-2011. Акустический симпозиум. – 2011. – С. 28 – 33.
5. Пьезокерамические преобразователи. Справочник / В. В. Ганопольский, Б. А. Касаткин, Ф. Ф. Легуша [и др.]. – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с.
6. Шарапов В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шаропова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
7. Хоровиц П. Искусство схемотехники: Пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – Изд. 2-е. – М.: Издательство БИНОМ, 2014. – 704 с.
8. Гончаров А. А. Метрология, стандартизация и сертификация / А. А. Гончаров, В. Д. Копылов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 240 с.
9. Мокров Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация: учебное пособие / Ю. В. Мокров. – Дубна, 2007. – 132 с.
10. Кравченко Н. С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие / Н. С. Кравченко, О. Г. Ревинская; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 86 с.
11. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М.: Иностран. лит., 1957. – 726 с.
12. Галаган Р. М. Ультразвукова система діагностики технічного стану порцелянових ізоляторів / Р. М. Галаган, В. С. Єременко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2011. – № 42. – С. 62 – 70.

УДК 620.179.16

Р. М. Галаган, Г. А. Богдан

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна*

**АНАЛІЗ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ
УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ХВИЛІ В БАГАТОФАЗНИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛАХ.
ЧАСТИНА 2: ВПЛИВ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ТА МЕТОДИЧНОЇ ПОХИБОК**

Стаття присвячена аналізу інструментальної та методичної похибки вимірювання швидкості поширення ультразвукової хвилі в багатофазних порошкових матеріалах.

Показана необхідність істотного зменшення похибки вимірювання для виявлення справжньої варіації швидкості ультразвуку (як в партії, так і окремих зразках з багатофазних порошкових матеріалів), яка є наслідком технологічних режимів виготовлення.

В роботі показано, що автоматизація процесу в сукупності з використанням схематехнічних, методичних, конструкційних методів зменшення похибки вимірювання дозволяє значно підвищити достовірність контролю.

Проведений аналіз інструментальної та методичної складової загальної похибки вимірювання дозволив запропонувати рекомендації по їх зменшенню.

Ключові слова: інструментальна похибка, методична похибка, швидкість ультразвуку, порошкові матеріали.

R. M. Galagan, G. A. Bogdan

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

**ERROR ANALYSIS MEASURING THE PROPAGATION VELOCITY OF ULTRASONIC
WAVES IN POLYPHASE POWDER MATERIALS. PART 2: THE INFLUENCE OF
INSTRUMENTAL AND METHODOLOGICAL ERRORS**

This article is devoted to analysis of the instrumental and methodical errors of the spreading ultrasound wave measurement in polyphase powder materials.

It is carried out analysis of the measuring technique and selected zones which provide for error appearance. It is indicated the necessity of the error essential decrease for detecting of the ultrasound velocity real variation (both the lot and the singular specimen made of polyphase powder materials) which is an effect of the manufacturing technological modes.

It the article is shown that process automation, utilization of circuit, methodological, constructive and other ways reduce the measurement uncertainty can significantly improve the accuracy of control.

Analysis of the instrumental and methodical component of general measuring error allowed to propos recommendations for its decreasing.

Keywords: instrumental error, methodical error, ultrasound velocity, powder materials.

*Надійшла до редакції
18 лютого 2016 року*

*Рецензовано
03 березня 2016 року*

© Галаган Р. М., Богдан Г. А., 2016