



DETERMINING THE REQUIREMENTS FOR METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF DEVICES AND PROCEDURES FOR THE CONDUCT OF ULTRASOUND STRUCTURESCOPE OF MATERIALS

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПРИБОРОВ И МЕТОДИК ПРИ ПРОВЕДЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ МАТЕРИАЛОВ

Проф., к.т.н. Еременко В.С.¹, ассист., к.т.н. Галаган Р.М.²

¹ Кафедра информационно-измерительных систем, Национальный авиационный университет – Киев, Украина

² Кафедра приборов и систем неразрушающего контроля, Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт” – Киев, Украина

e-mail: rgalagan@ukr.net

Abstract: *The article is devoted to defining the requirements for the metrological characteristics of instruments and techniques for conducting ultrasound structurescopy of powder materials. The possibility of applying for this purpose of variance analysis is shown. This article is an example of calculating the measurement error and resolution for the specific conditions of non-destructive testing. Also, conducting the analysis of components of the measurement error of ultrasonic velocity in powder materials.*

KEY WORDS: ULTRASONIC INSPECTION, POWDER MATERIAL, NONDESTRUCTIVE TESTING, VARIANCE ANALYSIS.

1. Введение

Порошковые конструкционные материалы в последнее время находят широкое распространение не только в технике, но и в медицине (например, в стоматологии при изготовлении имплантатов). Порошковые материалы изготавливаются путем прессования металлических порошков в изделия необходимой формы и размеров и последующего спекания сформированных изделий в вакууме или защитной атмосфере при заданной температуре. Итоговые физико-механические характеристики таких материалов зависят от таких факторов, как процентное содержание включений, пористость и др.

Спечённые материалы всегда имеют некоторую остаточную пористость, получаемую либо намеренно (как желательная пористая структура в спечённом железе), либо вследствие неизбежного несовершенства процесса изготовления (вольфрам, твёрдые сплавы) или вследствие неправильных режимов изготовления (фарфор) [1].

Для оценки физико-механических характеристик полученных порошковых материалов используют ультразвуковую структуроскопию, которая заключается в прецизионном измерении скорости ультразвука в изделии. В связи с этим важной задачей является повышение точности измерения скорости ультразвука в материале. Решение данной задачи заключается не только в улучшении метрологических характеристик приборов, используемых для проведения ультразвуковой структуроскопии, но также затрагивает и саму методику контроля.

2. Постановка задачи

Контроль физико-механических свойств материалов ультразвуковыми методами основан на аналитических или корреляционных связях измеренных акустических параметров с оцениваемыми свойствами материала. Например, все три упругих постоянных материала (модуль Юнга E , модуль сдвига G и коэффициент Пуассона ν) однозначно определяются по измеренным значениям скоростей распространения продольной и поперечной волн в объекте контроля. Однако

большинство физико-механических свойств связаны с акустическими параметрами лишь корреляционными зависимостями [2].

Технологические факторы (неоднородность температуры спекания, нарушение состава массы, временные режимы спекания и др.) изготовления изделий из порошковых материалов являются доминирующими при формировании их свойств. Скорость ультразвука в различных спечённых материалах, при разных условиях изготовления и различном исходном сырье может сильно отличаться, поэтому судить о изменении физико-механических характеристик по скорости ультразвука можно только в пределах одной партии [1]. Специфика технологии изготовления порошковых материалов приводит также к тому, что физико-механические характеристики могут незначительно изменяться в пределах одной заготовки. А это означает, что скорость ультразвука будет отличаться при измерениях как в разных точках на поверхности, так и при прозвучивании с разных поверхностей (в разных направлениях (рис. 1)).

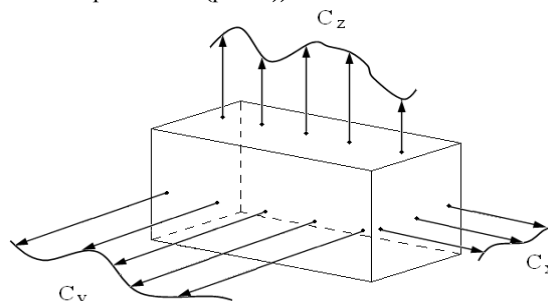


Рис. 1 Схематическое распределение скорости ультразвука в образце, изготовленном из порошковых материалов

Поэтому важной задачей ультразвуковой структуроскопии порошковых материалов является не только измерение абсолютных значений скорости ультразвука в каждой отдельной точке, но и анализ изменения этой скорости от точки к точке. Заданная достоверность данного анализа может быть обеспечена только в том случае, если общая

погрешность измерения в каждой отдельной точке будет значительно меньше разброса значений скорости, который обусловлен изменением физико-механических характеристик. Таким образом, выбор аппаратуры для проведения контроля и самой методики должен быть осуществлён с учётом вышесказанного.

На сегодняшний день методика определения скорости ультразвука реализуется следующим образом: геометрическое расстояние h между двумя точками объекта контроля (ОК) измеряется механическим способом, а временной интервал распространения ультразвука t между этими же точками измеряется акустическим способом. Тогда неизвестная скорость ультразвука C рассчитывается по формуле (для эхо-импульсного метода):

$$(1) \quad C = \frac{2h}{t}.$$

Таким образом, для достоверного определения изменения скорости ультразвука в объёме образца (что обусловлено технологическими факторами) необходимо обеспечить заданную точность измерения этой скорости в каждой отдельной точке на поверхности ОК (что обусловлено методической, инструментальной и субъективной погрешностями) по описанному выше алгоритму.

Рассмотрим составляющие суммарной погрешности измерения скорости ультразвука:

1. Инструментальная:

1.1. Погрешность ультразвукового дефектоскопа при измерении временной задержки, которая включает:

- погрешность, обусловленная амплитудным способом измерения;
- погрешность, обусловленная изменением длины переднего фронта отражённого импульса [3];
- погрешность, обусловленная неидеальностью характеристик пьезопреобразователя и др.;

1.2. Погрешность измерителя геометрического размера (например, штангенциркуля);

2. Методическая:

- 2.1. Погрешность, обусловленная шероховатостью поверхности ОК;
- 2.2. Погрешность, обусловленная неплоскопараллельностью поверхностей введения и отражения ультразвука;
- 2.3. Погрешность, обусловленная нестабильностью акустического контакта;
- 2.4. Погрешность, обусловленная несоответствием размера базы измерения размеру акустического тракта;
- 2.5. Погрешность, обусловленная условиями проведения измерений (температура, влажность и др.);
- 2.6. Погрешность, обусловленная площадью контактной поверхности пьезопреобразователя по отношению к размеру поверхности ввода ультразвука.

3. Субъективная:

- 3.1. Погрешность, обусловленная компетентностью оператора;
- 3.2. Погрешность, обусловленная зрительным восприятием оператора и др.

Ещё один важный фактор, который необходимо учитывать при контроле продольными волнами методом сквозного прозвучивания (для избежания дополнительной методической погрешности): соотношение между длиной волны и размерами поперечного сечения образцов и ОК должно удовлетворять условиям для неограниченной среды. В противном случае следует пользоваться формулами и графиками для ультразвуковых волн в пластинах и стержнях [2].

Анализ вышеприведённых погрешностей с учётом центральной граничной теоремы теории вероятностей позволяет предположить, что закон распределения измеренных значений скорости ультразвука в каждой отдельной точке не будет противоречить нормальному закону. Это позволяет использовать для анализа результатов измерений параметрические статистические критерии.

Второе важное следствие, вытекающее из анализа описанных выше погрешностей, заключается в том, что недостаточно лишь обеспечить высокую точность средств измерений, поскольку вклад в общую погрешность методической и субъективной может значительно превышать инструментальную. Влияние методической и субъективной погрешностей можно оценить в каждой отдельной точке на поверхности исследуемого ОК путём отрыва пьезопреобразователя от поверхности и последующего его контакта с ОК для проведения измерения. Тогда как инструментальную погрешность ультразвукового дефектоскопа можно оценить без отрыва датчика от поверхности ОК, используя при этом стандартные образцы типа СО-1, СО-2 и СО-3. Для статистической обработки результатов контроля необходимо проводить N измерений скорости ультразвука в каждой отдельной точке.

Таким образом, результат j -го измерения скорости ультразвука в i -й точке на поверхности заготовки из порошковых материалов можно представить:

$$(2) \quad C_{i,j} = C_i(Tf) \pm \varepsilon_{i,j},$$

где $\varepsilon_{i,j}$ – значение суммарной случайной погрешности j -го измерения в i -й точке, которая характеризуется среднеквадратичным отклонением (СКО), $C_i(Tf)$ – истинное значение скорости ультразвука, которое в принципе является случайной функцией, зависящей от влияния технологических факторов (Tf).

Если не обеспечить заданную точность измерений, то полученный в результате разброс измеренных значений скорости ультразвука может быть обусловлен не изменением физико-механических характеристик в ОК, а погрешностью измерений. Таким образом, увеличение погрешности измерения приводит к ухудшению разрешающей способности определения изменения скорости ультразвука в материале.

3. Результаты теоретических исследований

Для определения требований к метрологическим характеристикам приборов и методик при проведении ультразвуковой структуроскопии порошковых материалов можно воспользоваться математическим аппаратом дисперсионного анализа. Исходя из формулы (2) можно полагать, что на результат измерений будут влиять два независимых фактора: измерительный и технологический.

Дисперсионный анализ позволяет оценить влияние разных факторов на изменение исследуемого признака [4]. В случае, когда несколько полностью независимых факторов действуют одновременно и предопределяют общую изменчивость признака, то сумма отдельных рассеяний, которые характеризуют их влияние, равняется общему рассеянию:

$$(3) \quad Q_{\Sigma}^2 = Q_i^2 + Q_n^2.$$

В формуле (3) Q_i^2 представляет рассеивание, определяемое влиянием случайных измерительных факторов (внутригрупповое рассеивание):

$$(4) \quad Q_i^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N (C_{ij} - \bar{C}_i)^2,$$

а Q_n^2 представляет рассеивание, в основном определяемое изменением физико-механических характеристик (межгрупповое рассеивание):

$$(5) \quad Q_n^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^N (\bar{C}_i - \bar{C})^2,$$

где C_{ij} – измеренное значение скорости в i -той точке в j -тый момент времени; $\bar{C}_i$ – среднее значение скорости ультразвука в каждой отдельной точке измерения; $\bar{C}$ – генеральное среднее всех измерений во всех точках, m – количество точек измерения, N – количество измерений в каждой точке.

Применительно к решаемой задаче необходимо использовать однофакторный дисперсионный анализ для

несвязанных выборок. Метод однофакторного дисперсионного анализа применяется в тех случаях, когда исследуются изменения результативного признака (зависимой переменной) под влиянием изменяющихся условий или градаций какого-либо фактора. Влиянию каждой из градаций фактора подвержены разные выборки. При этом должно быть не менее трех градаций фактора и не менее двух наблюдений в каждой градации. Это означает, что необходимо для применения данного анализа проводить не менее двух измерений скорости ультразвука в трёх точках на поверхности ОК, что схематически показано на рисунке 2. Дисперсионный анализ позволяет определить, что преобладает: влияние фактора или случайная вариативность внутри групп (тенденция, выраженная кривой или размах отрезков, ограниченных кружками).

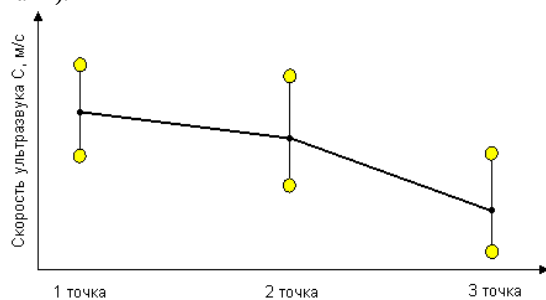


Рис. 2 Схематическая кривая, поясняющая суть дисперсионного анализа

Критерием достоверности влияния технологического фактора на результирующее рассеивание является отношение его девиаты к девиате измерительного фактора. Девиатой называют дисперсию, которая приходится на одну степень свободы [5]:

$$(6) \quad \sigma_i^2 = \frac{Q_i^2}{N - m},$$

$$(7) \quad \sigma_n^2 = \frac{Q_n^2}{m - 1}.$$

Тогда критерий рассчитывается как:

$$(8) \quad F = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_i^2}.$$

Если рассчитанное соотношение F равно или больше табличного значения критерия Фишера $F_{кр}$ при заданном количестве степеней свободы и уровне значимости, то влияние технологических факторов можно считать достоверным с определённой степенью вероятности.

На практике специалист оперирует не дисперсией, обусловленной изменением физико-механических характеристик σ_n^2 , а ожидаемым разбросом значений скорости ультразвука в материале $\Delta C = C_{\max} - C_{\min}$. Тогда в предположении нормального закона распределения скорости в материале технологическую дисперсию можно определить по так называемому правилу «трёх сигм»:

$$(9) \quad \sigma_n = \frac{\Delta C}{3}.$$

Подставив (9) в (8) запишем выражение для определения измерительной дисперсии:

$$(10) \quad \sigma_i^2 \leq \frac{\Delta C^2}{9 \cdot F_{кр}}.$$

Рассчитав по формуле (10) измерительную дисперсию, можно определить разрешающую способность измерений скорости ультразвука между двумя разными точками. Для этого используется критерий Стьюдента (в предположении равенства измерительной дисперсии σ_i^2 в каждой точке, а также одинакового количества измерений N в каждой точке):

$$(11) \quad \Delta C_{12} = |\bar{C}_1 - \bar{C}_2| = \sigma_i \cdot t_{кр} \cdot \sqrt{\frac{2}{N}},$$

где $t_{кр}$ – критическое значение критерия Стьюдента при заданном уровне значимости и степени свободы, $\bar{C}_1$ и $\bar{C}_2$ – средние значения измеренной скорости в точке 1 и 2 соответственно, σ_i – среднеквадратическое отклонение результатов измерений скорости ультразвука в каждой отдельной точке.

Определить требования к метрологическим характеристикам аппаратуры и методики контроля можно, задав следующие исходные параметры: количество точек измерения m , количество измерений в точке N и разброс значений скорости в материале ΔC . Рассмотрим следующий пример: $N=100$, $m=5$, $\Delta C=100$ м/с. Из таблиц критерия Фишера F при уровне значимости $\alpha=0,05$ находим, что для степеней свободы $f_1=95$ и $f_2=4$ значение $F_{кр}=2,49$ [6]. По формуле (10) рассчитываем измерительную дисперсию $\sigma_i^2=446,2$ (м/с)². Соответственно среднеквадратическое отклонение погрешности измерений должно быть не более $\sigma_i=21,1$ м/с. Разрешающую способность определим по формуле (11) для уровня значимости $\alpha=0,05$ и количества степеней свободы 100 ($t_{кр}=1,99$): $\Delta C_{12} \approx 6$ м/с.

4. Выводы

Таким образом, задача определения требований к метрологическим характеристикам приборов и методик проведения ультразвуковой структуроскопии порошковых материалов является очень важной. Показана возможность применения математического аппарата дисперсионного анализа для этих целей. При проведении ультразвуковой структуроскопии особое внимание стоит уделять методике проведения контроля, например, обеспечивая эквивалентность геометрического и акустического трактов, а также постоянную силу прижатия пьезопреобразователя к ОК. Также необходимо использовать датчики специальной конструкции с небольшой контактной поверхностью [7]. Это позволит минимизировать методическую погрешность. Для уменьшения субъективной погрешности вместо механического штангенциркуля необходимо использовать как минимум штангенциркуль с электронной шкалой, также использовать специализированный блок для автоматического позиционирования датчика и ОК, который бы обеспечивал постоянную силу прижатия. Для минимизации инструментальной погрешности использовать специализированные дефектоскопы и программное обеспечение [8], позволяющие реализовывать разные способы обработки полезного сигнала для измерения временного интервала (например, амплитудный способ, корреляционный, способ пересечения нуля, способ центра тяжести и т.п.), а также статистическую обработку всего массива полученных данных.

5. Литература

1. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд.: пер. с нем. / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
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. Труэлл Р. Ультразвуковые методы в физике твёрдого тела / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик; пер. с англ. И.Г. Михайлов, В.В. Леманов. – М.: Мир, 1972. – 307 с.
4. Игуменцева Н.В. Статистический анализ результатов экспериментов и наблюдений: Учеб. пособие / Н.В. Игуменцева, В.И. Пахомов. – Х.: «Компания СМІТ», 2005. – 236 с.
5. Опря А.Т. Статистика: Навч. посібник / А.Т. Опря. – К.: Центр навчальної літератури, 2005. – 468 с.
6. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
7. Пат. №47248 України, МПК (2009) B06B 3/00. Ультразвуковой концентратор / Галаган Р.М., Цапенко В.К., Протасов А.Г., Василенко О.С.; Укр. - №u2009 07366; Заявл. 13.07.2009. Опубл. 25.01.2010. Бюл. №2
8. Галаган Р.М. Ультразвукова система діагностики технічного стану порцелянових ізоляторів / Р.М. Галаган, В.С. Єременко // Вісник Національного Технічного Університету України «КПІ». Серія приладобудування. – Київ. – 2011. – № 42. – С. 62-70.