



УВЕЛИЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОХОЖДЕНИЯ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИСТЕМАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ С ВОЗДУШНО-АКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ

В. В. ГОРОДНИЧИЙ, М. А. СЕРЬГА

Рассмотрена возможность увеличения коэффициента прозрачности системы воздух – твердое тело при УЗ контроле с воздушно-акустической связью. Представлены результаты экспериментальных исследований.

The paper analyses the possibility for increasing the coefficient of transparency of air- solid system in UT with an air-acoustic coupling. Results of experimental studies are given.

В настоящее время актуальной задачей является разработка бесконтактных систем УЗ контроля [1], в частности, УЗ систем НК с воздушно-акустической связью [1]. Трудности использования последних объясняются большим ослаблением сигнала при переходе УЗ волн из воздуха в твердое тело. При контроле изделий на частотах, используемых в обычных контактных или иммерсионных дефектоскопах, уровни сигналов, принятых приемным пьезопреобразователем (ПП), существенно меньше уровня шумов приемного ПП и входного усилителя аппаратуры контроля.

Для осуществления контроля в системах НК с воздушно-акустической связью необходимо улучшить прохождение УЗ волн из воздуха в твердое тело. Этого достигают использованием согласующих слоев в ПП [2], однако одного такого приема недостаточно. Поэтому УЗ контроль с воздушно-акустической связью применяют или на низких частотах, что не позволяет обнаруживать дефекты малых размеров, или при одностороннем контакте через воздух [2].

Для улучшения акустического контакта при прохождении УЗ волн из воздуха в твердое тело можно использовать локальную воздушную ванну с повышенным давлением.

Так как УЗ волны дважды проходят через воздух: воздух – контролируемое изделие и воздух – ПП, то для оценки ослабления сигналов можно использовать коэффициент прозрачности по энергии [3]

$$D = \frac{4Z_1 Z_B}{(Z_1 + Z_B)^2}, \quad (1)$$

где Z_B , Z_1 – характеристические импедансы воздуха и твердого тела (ПП или изделия).

С учетом того, что $Z_1 \approx (3...46) \cdot 10^6$ кг/(м·с), выражение (1) можно упростить:

$$D \approx 4Z_B / Z_1 \approx (3,7...57) \cdot 10^{-5}.$$

Такие малые коэффициенты прохождения границы раздела воздух – твердое тело и обуславливают ограниченность применения акустического контакта через воздух. Повышая давление воздуха, можно существенно увеличить характеристический импеданс воздуха, а значит, и увеличить коэффициент прохождения (прозрачности).

Известно [3], что

$$Z = \rho c, \quad (2)$$

где c – скорость распространения ультразвука в среде; ρ – плотность.

Из формулы (2) следует, что увеличить характеристический импеданс можно путем увеличения плотности среды или скорости распространения в ней УЗ волн. Скорость распространения звука в газах с учетом адиабатического характера процессов деформации можно определить по формуле Лапласа [4]

$$c = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}, \quad (3)$$

где P – давление газа; γ – показатель адиабаты.

Для практических задач показатель адиабаты для конкретного газа при диапазоне температур 297...397 К можно считать постоянным, например, для воздуха $\gamma = 1,6$ [5]. Используя выражения (2) и (3), получаем

$$Z_B = \sqrt{\gamma \rho P} \approx 1,18 \sqrt{\rho P}. \quad (4)$$

Поскольку давление функционально связано с плотностью, оценим его влияние на характеристический импеданс воздуха.

При низких и средних давлениях термодинамическое состояние газа хорошо описывается уравнением Дитеричи [4]

$$P(V_0 - b) = RT \exp [a / (RTV_0)].$$

Здесь V_0 – объем одного моля газа; b – поправка на собственный объем молекул, учитывающая действие сил отталкивания,

$$b = N_A \frac{2}{3} \pi d^3;$$

N_A – число Авогадро; d – средний диаметр молекулы; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура газа;

$$a = \frac{9}{8} \frac{R}{P_k} \frac{T_k^2}{V_0} \frac{1}{T},$$

T_k – критическая температура, для воздуха $T_k = 133$ К; P_k – критическое давление для данного газа.

Для не очень высоких давлений и температур (T — до 500 К, P — до 4 МПа) $b \ll V_0$, тогда

$$P = \frac{RT}{V_0} \exp \left(-\frac{9}{8} \frac{R}{P_k} \frac{T_k^2}{V_0 K_k} \frac{1}{T} \right)$$

Можно заметить, что степень экспоненты мала. Поэтому, разложив экспоненту в ряд Тейлора и отбросив малые высших порядков, получим

$$P = \frac{RT}{V_0} \exp \left(1 - \frac{9}{8} \frac{R}{P_k} \frac{T_k^2}{V_0 K_k} \frac{1}{T} \right)$$

где K_k — критический коэффициент, для воздуха $K_k \approx 3,7$.

Переходя к произвольному объему газа V и учитывая, что $V_0 = V \frac{M}{m}$, после ввода постоянной величины (при постоянной температуре газа)

$$\xi = \frac{9}{8} \frac{R}{P_k K_k} \frac{T_k^2}{V_0} \frac{1}{T} \approx 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг},$$

получаем

$$P = \frac{RT}{V_0} \rho (1 - \rho \xi).$$

Решим это уравнение относительно ρ :

$$\rho_{1,2} = \frac{1}{2\xi} \pm \sqrt{\frac{1}{4\xi^2} + \frac{MP}{RT\xi}} = \frac{1}{2\xi} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4MP\xi}{RT}} \right).$$

Поскольку для не очень высоких давлений

$$\frac{4MP\xi}{RT} \ll 1,$$

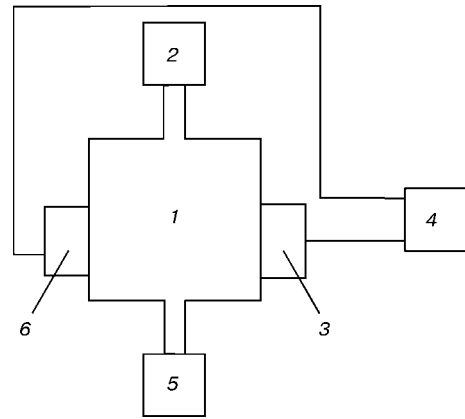
то, разлагая корень квадратный в ряд Тейлора, после преобразований имеем

$$\rho \approx P \frac{M}{RT}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получаем

$$Z \approx P \sqrt{\frac{\gamma M}{RT}}.$$

Таким образом, характеристический импеданс газа пропорционален давлению. Это справедливо для $T > T_k$ и докритического давления $P < 3,7$ МПа [5]. Следовательно, можно создать локальную ванну со сжатым воздухом, что, согласно (1), увеличивает коэффициент прозрачности для границы раздела воздух — изделие и упрощает согласование ПП с воздухом.



Блок-схема экспериментальной установки

Экспериментально была исследована зависимость коэффициента прозрачности в системе пьезоизлучатель — воздух — ПП от давления воздуха. Так как при изменении давления воздуха волновые сопротивления пьезоизлучателя и ПП не меняются, то изменение коэффициента прозрачности обусловлено только изменением волнового сопротивления воздуха. Блок-схема экспериментальной установки (рисунок) состоит из резервуара с воздухом 1, в котором с помощью компрессора 5 установлено давление P , измеряемое манометром 2. На внешней поверхности резервуара соосно размещены излучающий 6 и приемный 3 ПП таким образом, что акустическая связь между ними осуществляется только через воздух. В качестве генератора зондирующих импульсов и приемника использовался УЗ дефектоскоп УД-1ФМ 4 с цифровым автоматическим измерителем уровня принятого сигнала [6].

Проведенные исследования полностью подтвердили теоретические расчеты. При увеличении давления воздуха (для системы воздух — контролируемое изделие) в 5 раз уровень принимаемого сигнала увеличился также в 5 раз.

1. *Городничий В. В., Городничий О. В., Петренко А. Н.* Ультразвуковой контроль с воздушно-акустической связью // Системные технологии: Сб. науч. тр. — Днепропетровск: Днепропетр. металлург. акад., 2000. — Вып. 1 (9). — С. 22 — 27.
2. *Заклюковский В. И., Карцев Г. Т.* Применение пьезоэлектрических преобразователей для бесконтактного ультразвукового контроля изделий // Дефектоскопия. — 1978. — № 3. — С. 28–33.
3. *Ермолов И. Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.
4. *Яворский Б. М., Детлаф А. А.* Справочник по физике. — М.: Наука, 1977. — 530 с.
5. *Краткий технический справочник* / Под общей ред. В. А. Зинovieва. — Ч. 1. — М.: Гостехтеоретиздат, 1952. — 920 с.
6. *Городничий В. В., Собко В. Н., Малайчук В. П.* Ультразвуковой дефектоскоп УД-1 ФМ // Дефектоскопия. — 1987. — № 6. — С. 90–92.