

## Ультразвуковой контроль состояния волноводной конструкции

И. И. Конопацкая,<sup>\*</sup> М. А. Миронов,<sup>†</sup> П. А. Пятаков<sup>‡</sup>  
АО «Акустический институт имени академика Н. Н. Андреева»  
Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4  
(Статья поступила 26.07.2017; Подписана в печать 19.09.2017)

В работе представлены результаты экспериментальных исследований возможности применения корреляционного метода для регистрации изменений состояния волновода стержневого типа под действием локального сжатия и нагрева. Показана возможность использования этого метода для контроля качества болтового соединения компонентов твердотельной волноводной конструкции.

PACS: 43.35.Zc, 81.70.Cv

УДК: 534.8

Ключевые слова: реверберация, твердотельный волновод, корреляционная функция.

### ВВЕДЕНИЕ

Короткий импульс силы, действующий на поверхности или в глубине твердотельного волновода приводит к возникновению в нем акустического реверберационного сигнала, который представляет собой суперпозицию волн, прямо прошедших от источника до приемника и волн, отраженных от внешних границ волновода и его неоднородностей. Длительность этого сигнала обычно много больше длительности исходного импульса и составляет несколько миллисекунд. При этом в килогерцовом ультразвуковом диапазоне в металлических (твердотельных) конструкциях произведение полосы частот сигнала на его длительность (база сигнала), как правило, много больше единицы. В этих условиях оказывается эффективным использование корреляционного способа для дифференциации сигналов по форме. Каждому фиксированному состоянию волноводной конструкции соответствует своя индивидуальная форма реверберационного сигнала. Даже относительно небольшие изменения в состоянии волновода под воздействием внешних нагрузок, появление любого вида неоднородностей (трещин) приводит к небольшим, но легко фиксируемым, изменениям в значении коэффициента корреляции двух реверберационных сигналов, соответствующих разным состояниям волновода. В работе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных в твердотельном волноводе стержневого типа, в которых корреляционный метод был применен для регистрации изменений в состоянии волноводной конструкции под действием локального сжатия и теплового воздействия. Продемонстрирована возможность применения метода для мониторинга состояния болтовых соединений.

Идеи, близкие к заявленным, были ранее изложены в приложении к области акустико-эмиссионного контроля [1]. Кроме того, корреляционная методика, близкая по существу к варианту, представленному в насто-

ящем докладе, использовалась для регистрации и локализации дефектов в композиционных материалах и сложных структурах (см., например, [2, 3]).

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Твердотельный волновод был образован из двух алюминиевых стержней 1 с диаметром сечения 20 мм и длиной 234 см каждый, выстроенных в одну линию и стянутых между собой с помощью болтового соединения 2.

Для обеспечения акустического контакта двух частей волновода в области их соединения (длиною 20 см) на поверхности обеих стержней была сделана плоская площадка шириною 5 мм. Соединение болтом было выполнено через сквозное отверстие, расположенное в центре этой области, т.е., на расстоянии 10 см от краёв соединяемых стержней. На поверхности основного стержня были установлены два пьезоэлектрических преобразователя марки RS-150L (фирма «НДТ-системы», г. Троицк) с полосой пропускания 115–150 кГц и площадью поверхности 2.27 см<sup>2</sup>. Излучатель 6 и приёмник 7 находились на расстояниях, соответственно, 117 см и 57 см от левого края стержня. Сигнал с приемного преобразователя усиливался широкополосным усилителем типа RPA-05, оцифровывался в устройстве ввода-вывода NI USB 6361 и поступал на персональный компьютер.

На базе языка графического программирования LabView была разработана программа, управляющая процессом измерения. На излучающий преобразователь 6 подавался короткий импульс с 50% относительной полосой и частотой заполнения 135 кГц (рис. 2). В ответ на воздействие в стержне возбуждался сигнал, который, в результате распространения по волноводу и многочисленных переотражений, приобретал вид реверберационного сигнала. Типичный пример такого сигнала приведен на рис. 3. Его длительность превышала 15 мс.

Оцифрованный с частотой дискретизации 500 кГц сигнал хранился в памяти компьютера в качестве эталонного сигнала сравнения. В процессе измерения

\*E-mail: ikonopatskaya@gmail.com

†E-mail: mironov\_ma@mail.ru

‡E-mail: ppyatakov@mail.ru

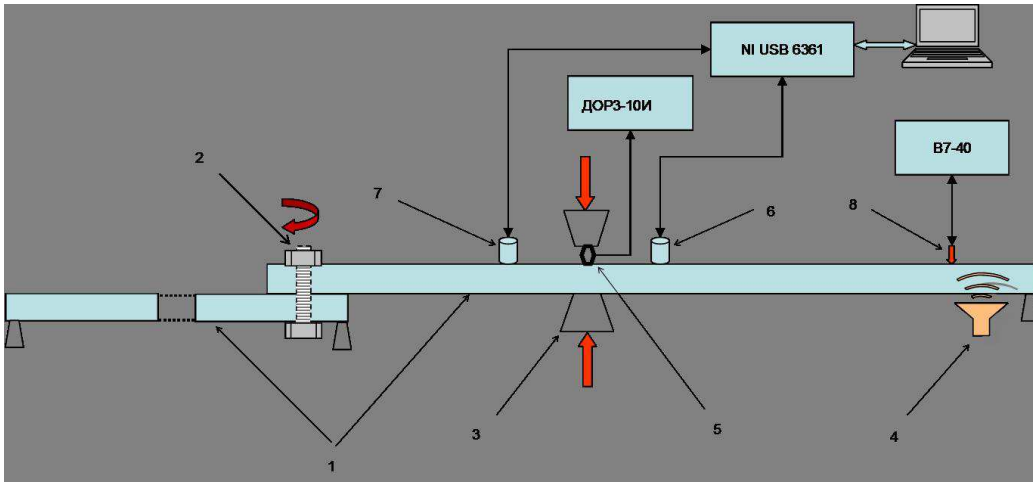


Рис. 1: Схема экспериментальной установки: 1 — алюминиевый стержень, 2 — соединительный болт, 3 — тиски, 4 — фен, 5 — тензометрический датчик, 6, 7 — пьезоэлектрические преобразователи, 8 — термометрический датчик

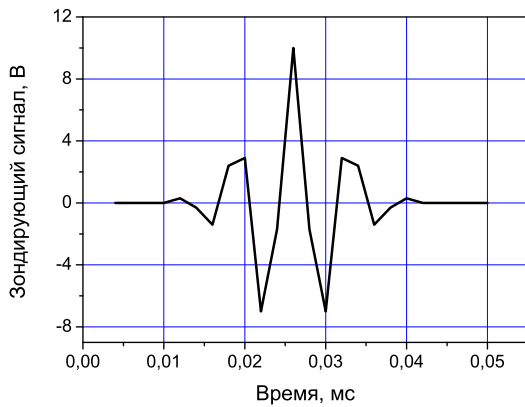


Рис. 2: Зондирующий импульс

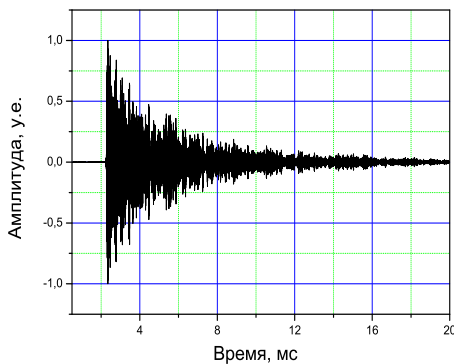


Рис. 3: Реверберационный сигнал в волноводе

вычислялась взаимная корреляционная функция двух сигналов: эталонного и сигнала, принятого в условиях воздействия на волновод внешней нагрузки. На рис. 4 приведена автокорреляционная функция сигнала, изображенного на рис. 3, характерным свойством которой является острый пик на фоне малого уровня ( $\sim 0.1$  от главного максимума) боковых максимумов.

Под коэффициентом корреляции (КК) в работе понимается разность между максимальным и минимальным значением нормированной взаимной корреляционной функции. Отклонение КК от начальной величины, соответствующей невозмущенному состоянию, указывает на изменение волноводных свойств образца под воздействием нагрузки. Разработанная программа позволяет в реальном масштабе времени регистрировать изменения сигнала и вычислять КК.

Локальное поджатие стержня осуществлялось с помощью тисков 3 (рис 1). Степень сжатия контролировалась тензометрическим датчиком 5 и динамометром ДОРЗ-10И. На рис. 5 изображена зависимость КК сигнала, принятого в процессе увеличивающегося локального одноосного сжатия и плавного снятия нагрузки.

Результаты приведены для двух вариантов: одиночного стержня и волновода, состоящего из двух одинаковых стержней, скрепленных болтовым соединением. Отметим, прежде всего, полученную строго монотонную зависимость изменяющегося КК при возрастании или убывании силы сжатия. Этот факт, вследствие сложной модовой структуры ультразвуковой волны в стержне, не является заранее очевидным. Далее, отметим достаточно большой динамический диапазон измерений. При измеренной величине шумового фона  $\sim 3.5 \times 10^{-4}$  и диапазоне изменения величины КК порядка единицы, динамический диапазон составляет более 60 дБ.

Анализ кривых на рис. 5 позволяет сделать еще один важный вывод. Волновод, состоящий из двух соединенных стержней, демонстрирует существенно боль-

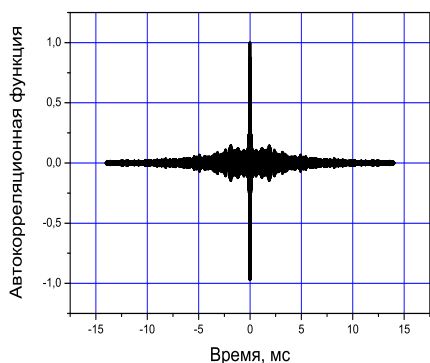


Рис. 4: Автокорреляционная функция реверберационного сигнала

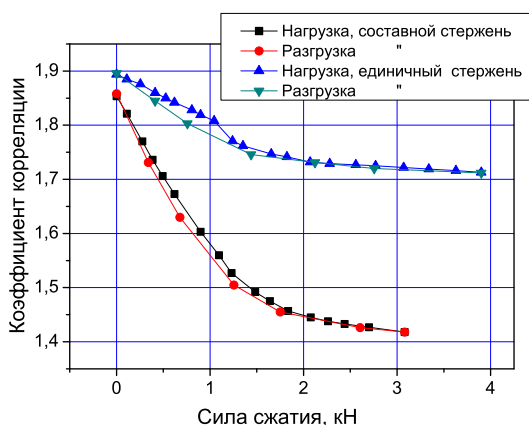


Рис. 5: Коэффициенты корреляции при одноосном сжатии составного и одиночного стержней

шую чувствительность к сжатию (более чем в два раза), чем одиночный стержень. Эту закономерность нетрудно понять, приняв во внимание, что второй стержень для первого является внешним ревербератором. Затухание ультразвуковых волн во втором волноводе меньше, т.к. в отличие от первого стержня он не демпфируется устройством поджатия (тисками). Это заметно увеличивает длительность результирующего реверберационного сигнала, а, следовательно, и число проходов сигнала через возмущенную область волновода. Подтверждением сказанному является рис. 6, где изображена хвостовая часть двух реверберационных сигналов, зафиксированных в составном волноводе (красный цвет кривой) и в простом стержне (черная кривая).

Аналогичные корреляционные измерения были проведены с целью контроля качества болтового соединения. Для изменения степени сжатия частей волново-

да с помощью болтового соединения (диаметр болта 10 мм, резьба М10) (позиция 2 на рис. 1) был использован динамометрический ключ марки «Licota Aqw-N3060V». На рис. 7 представлено изменение КК при затяжке в диапазоне 12–44 Нм усилием, значения которого указаны на графике над каждой ступенью. Видно, что с увеличением затяжки происходит монотонное убывание КК и постепенное насыщение изменений с приближением к асимптотическому значению.

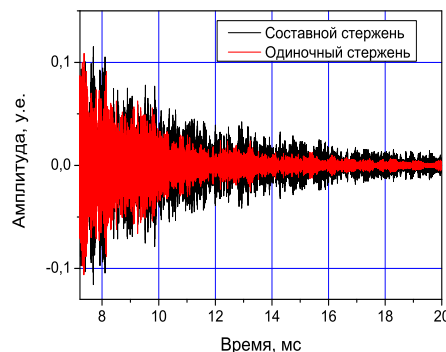


Рис. 6: Хвостовые (низкоамплитудные) части реверберационных сигналов в единичном и составном стержнях

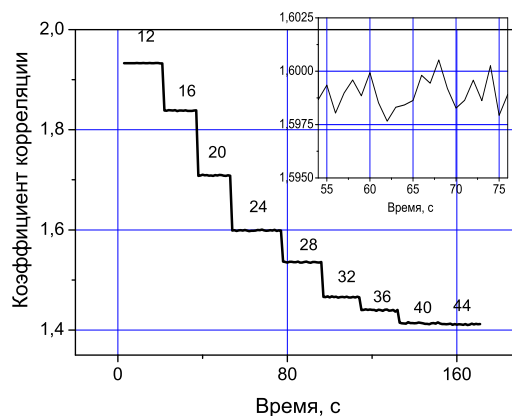


Рис. 7: Изменение коэффициента корреляции при пошаговой затяжке болтового соединения с усилием от 12 Нм до 44 Нм

Чувствительность можно оценить сравнивая уровень шумовой дорожки (см. врезку в рис. 7) с показателями динамометрического ключа. Такого рода оценка дает предельную чувствительность ~ 0.025 Нм. Корреляционная методика позволяет дистанционно контролировать качество болтового соединения и определять минимально необходимую величину затяжки, обеспечивающую акустическую связь между элементами кон-

струкции. При этом измерительные датчики могут располагаться на удаленном расстоянии по одну сторону от болтового соединения.

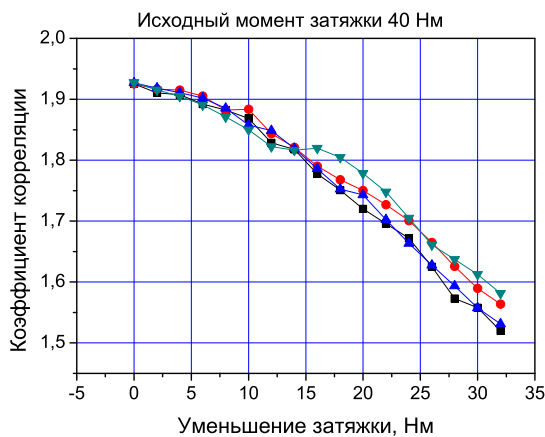


Рис. 8: КК при уменьшении момента затяжки болтового соединения

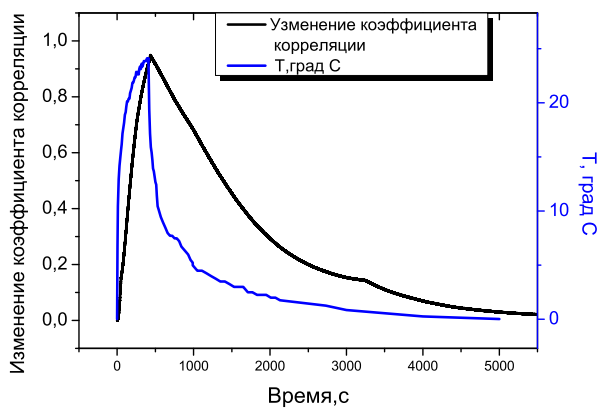


Рис. 9: Реакция КК на локальное нагревание стержня

На рис.8 представлено четыре реализации эксперимента по раскрутке болтового соединения. Исходная затяжка в каждом случае была равна 40Нм. Наблюдается неплохая повторяемость результатов. Заметный статистический разброс связан, по-видимому, с погрешностью установки задаваемых моментов затяжек, производимых с помощью динамометрического ключа.

Локальный нагрев поверхности стержня производился потоком горячего воздуха от фена (4) (рис. 1) мощностью 500Вт. Фен был подвешен на расстоянии, приблизительно, 3 см от поверхности стержня в области, расположенной на расстоянии 30 см от правого конца стержня. Температура поверхности стержня контролировалась в точке, отстоящей на расстоянии 3.5 см от области прямого воздействия, с помощью термопарного датчика 8, показания регистрировались цифровым вольтметром В7-40 (погрешность 0.3°C). На рис. 9 демонстрируется корреляция динамики КК, отражающего интегральные изменения состояния всего стержня, и температуры, измеренной в области нагрева.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование некоторых возможных применений корреляционного метода мониторинга состояния волноводных конструкций. Рассмотренный метод эффективен в твердотельных волноводах, обладающих малым затуханием ультразвуковых волн в килогерцовом диапазоне частот.

Возможности методики продемонстрированы на примере контроля за состоянием волноводной конструкции, подверженной внешнему механическому и тепловому воздействию. Экспериментально установлен факт однозначного соответствия между величиной нагрузки и показаний контролирующего параметра - коэффициента корреляции между ультразвуковыми сигналами, зарегистрированными в невозмущенном состоянии и в состоянии внешнего воздействия.

Показана высокая чувствительность и большой динамический диапазон данного варианта метода корреляционных измерений.

[1] Миронов М. А., Пятаков П. А. Реверберационные сигналы в твердотельных волноводах и некоторые возможности их применения в области акусто-эмиссионного контроля. Сб. трудов XXVII сессии РАО. С-Петербург, 2014.  
[2] Ciampa F., Meo M. J. Acoust. Soc. Am. 2011. **130**, № 1, P. 168.

[3] Swartz R.A., Flynn E., Backman D., Hundhausen R.J., Park G. Active Piezoelectric sensing for Damage Identification in Honeycomb Aluminum Panels. <http://www.researchgate.com>.

## Ultrasonic control of a condition of the waveguide design

I. I. Konopatskaya<sup>a</sup>, M. A. Mironov<sup>b</sup>, P. A. Pyatakov<sup>c</sup>

*Andreyev Acoustics Institute. Moscow 117036, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>irina.konopatskaya@mail.ru, <sup>b</sup>mironov\_ma@mail.ru, <sup>c</sup>ppyatakov@mail.ru*

This paper presents the results of experimental studies of feasibility to use a correlation method for monitoring of rod-type waveguides under the action of a local compression and heating. The possibility of using the method to control the quality of the bolted connection is investigated.

PACS: 43.35.Zc, 81.70.Cv

*Keywords:* reverberation, solid-state waveguide, correlation function.

*Received 26 July 2017.*

### Сведения об авторах

1. Конопацкая Ирина Ивановна — ст. науч. сотрудник; e-mail: ikonopatskaya@gmail.com.
  2. Миронов Михаил Арсеньевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, нач. отдела; e-mail: mironov\_ma@mail.ru.
  3. Пятаков Павел Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, нач. отдела; e-mail: ppyatakov@mail.ru.
-