

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ КАТУШЕЧНОГО ТИПА ДЛЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО АНАЛИЗА

Е. А. Рассолов<sup>1,2</sup>, Т. А. Ефимов<sup>1</sup>, Р. В. Ромашко<sup>1,2</sup>, А. А. Брянский<sup>3</sup>,  
О. В. Башков<sup>3</sup>, И. Н. Завестовская<sup>4</sup>

*В настоящей работе исследуется возможность увеличения чувствительности волоконно-оптических датчиков катушечного типа для регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) в задачах неразрушающего контроля. Разработаны, созданы и экспериментально исследованы волоконно-оптические датчики АЭ катушечного типа, изготовленные из различных материалов и имеющие различные геометрические параметры. Экспериментально определена амплитудно-частотная характеристика для каждого датчика в диапазоне частот от 100 Гц до 600 кГц, а также средняя квадратическая амплитуда сигналов (RMS) при возбуждении акустических колебаний излучателем Globaltest GT301 при входном напряжении 3.5 В. На основе полученных результатов определен оптимальный материал и размеры основания датчика, в совокупности обеспечивающие его наибольшую чувствительность.*

**Ключевые слова:** волоконно-оптический датчик, акустическая эмиссия, адаптивный интерферометр.

*Введение.* В настоящее время для определения структурных изменений в материалах применяют методы акустической эмиссии, суть которых состоит в регистрации и

<sup>1</sup> Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041 Россия, Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: sky.04@mail.ru.

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10.

<sup>3</sup> Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013 Россия, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

<sup>4</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

анализе параметров чрезвычайно слабых ультразвуковых волн, сопровождающих изменение или повреждение структуры металлов, их сплавов, композитных материалов и др. [1]. Метод позволяет проводить обнаружение и идентификацию широкого класса структурных изменений в твердых телах, например, фазовых переходов, зарождение и эволюцию микро- и нанодфектов, так как фиксируются единичные акты с энергией до  $10^{-16}$  Дж [2]. Все более актуальными становятся задачи оценки и прогнозирования остаточного ресурса изделий и объектов ответственного назначения. Акустическая эмиссия позволяет выявлять медленно растущие, следовательно, наиболее опасные дефекты.

Характерной особенностью строения реальных тел является случайность расположения дефектов, что приводит к необходимости установки на одном объекте нескольких акустических датчиков. Для протяженных объектов сбор сигнала с множества удаленных друг от друга датчиков затрудняется ввиду необходимости монтажа сети электрических кабелей, предварительных усилителей, устройств регистрации, мультиплексирования и передачи информации. Использование волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии обладает рядом преимуществ: нечувствительность к внешним электромагнитным помехам, большая протяженность волоконных линий без существенных потерь регистрируемого сигнала, возможность мультиплексирования сигналов разных датчиков в одном оптическом волокне, широкий диапазон рабочих температур, высокая механическая прочность, долговечность и коррозионная стойкость [3]. Однако чувствительность волоконно-оптических датчиков оказывается недостаточной для большинства приложений акустико-эмиссионного анализа [4]. В настоящей работе исследуется возможность увеличения чувствительности акустических волоконно-оптических датчиков катушечного типа. Разработаны и созданы прототипы акустических волоконно-оптических датчиков с основаниями разных размеров, изготовленными из разного материала.

*Экспериментальные результаты.* Основание волоконно-оптического датчика АЭ выполнено из акустически упругого материала и имеет цилиндрическую форму высотой 2.1 см и диаметром 3.5 см. На основание датчика намотано 35 витков оптического волокна ( $NA = 0.22$ ; диаметр сердцевины 62.5 мкм) общей длиной 7.5 м.

В ходе исследования работы датчиков акустические волны возбуждались пьезоэлектрическим излучателем Globaltest GT301, установленным на алюминиевую пластину толщиной 2 мм. На излучатель подавалось напряжение в 3.5 В синусоидальной формы с переменной частотой с 100 Гц до 600 кГц. Датчик АЭ также располагался на алюминиевой пластине на расстоянии 200 мм от излучателя. В месте контакта датчика и

излучателя с алюминиевой пластиной использовался ультразвуковой контактный гель. Под действием акустического поля основание датчика изменяет свои размеры, что приводит к соответствующему изменению длины световода и модуляции фазы проходящего в нем лазерного излучения. Демодуляция фазы осуществлялась с помощью адаптивного голографического интерферометра [5, 6], построенного на основе фоторефрактивного кристалла CdTe:V. Сигнал демодуляции регистрировался фотоприёмником PDA10CS-ES, который был подключен к анализатору спектра электрических сигналов Agilent N9030A.

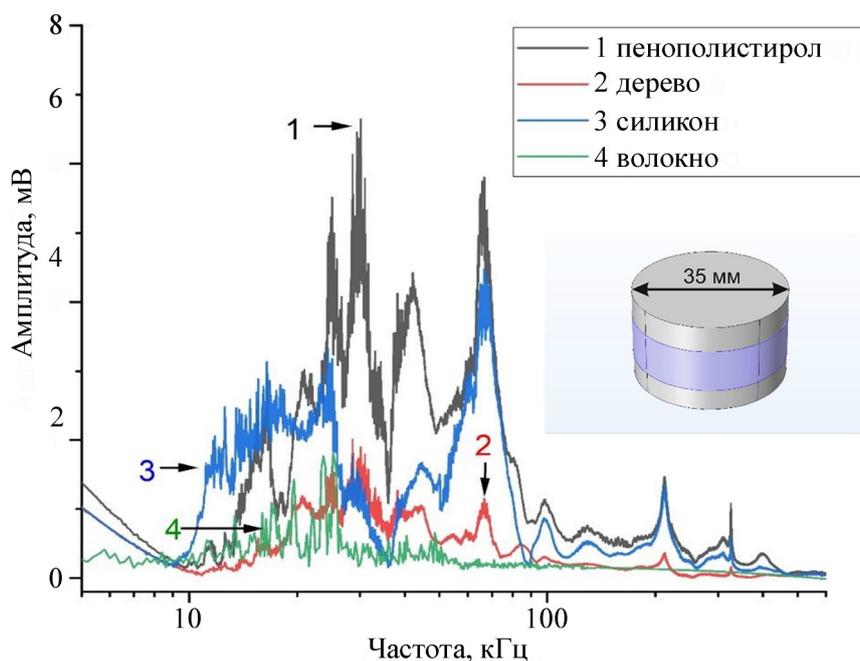


Рис. 1: АЧХ волоконно-оптических датчиков АЭ, изготовленных из разных материалов.

Исследована зависимость чувствительности волоконно-оптического датчика АЭ от материала. Экспериментально определена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) в диапазоне частот от 100 Гц до 600 кГц для датчиков с основанием, изготовленным из дерева, силикона, пенополистирола (рис. 1). Для качественного сравнения чувствительности также экспериментально определена АЧХ, полученная с помощью оптического волокна. Волокно было уложено на алюминиевую плиту в виде 10 витков длиной 100 мм и закрепленного эпоксидным клеем (рис. 1). RMS для такого волоконно-оптического датчика составила 2.1 мВ при возбуждении пьезоэлектрическим излучателем Globaltest GT301, как описано выше. RMS для датчика с основанием из дерева со-

ставила 3.07 мВ, для датчика с основанием из силикона составила 11.6 мВ, для датчика с основанием из пенополистирола RMS составила 29.1 мВ. Таким образом, использование основания, изготовленного из пенополистирола, позволяет повысить чувствительность волоконно-оптического датчика в среднем в 14 раз.

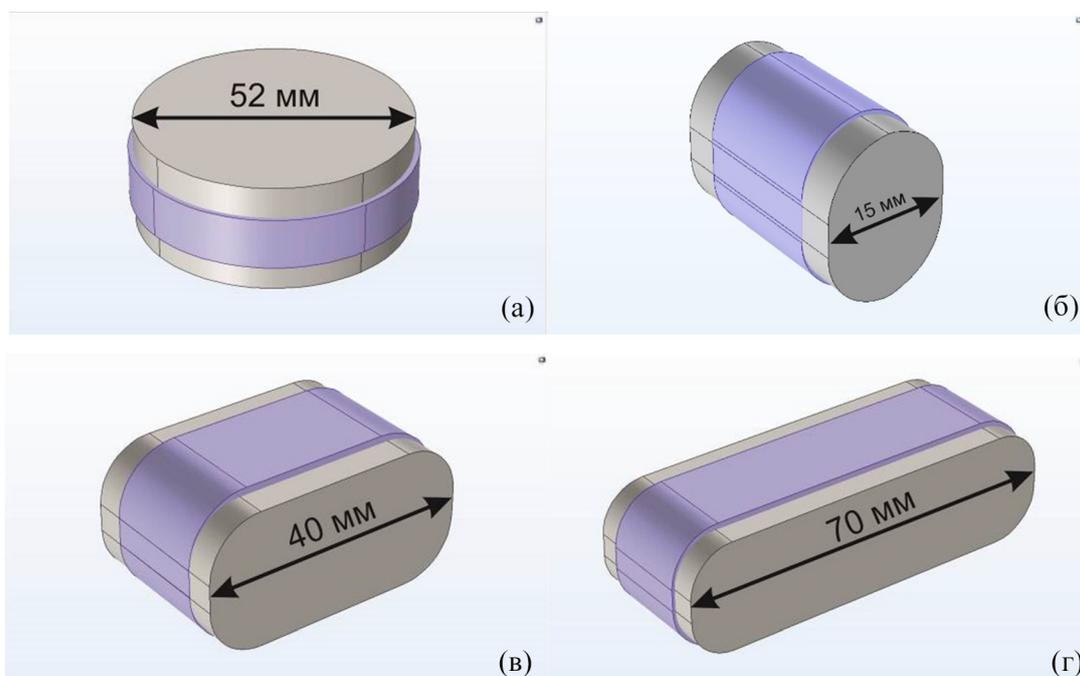


Рис. 2: Волоконно-оптические датчики АЭ: (а) датчик типа А; (б) датчик типа В с длиной  $L = 15$  мм; (в) датчик типа В с длиной  $L = 40$  мм; (г) датчик типа В с длиной  $L = 70$  мм.

Выполнен поиск оптимальной формы основы волоконно-оптического датчика АЭ. Изготовлено четыре датчика с основанием разной формы из пенополистирола. Датчик типа А имеет основу в форме цилиндра с диаметром 52 мм и высотой 28 мм. Датчики типа В имеют основание в форме параллелепипеда с закругленными краями с высотой 25 мм, шириной 20 мм и отличаются по длине  $L$  15, 40 и 70 мм, соответственно. Форма изготовленных датчиков с основой из пенополистирола и место намотки волокна показаны на рис. 2. Экспериментально определена АЧХ для каждого датчика в диапазоне частот от 100 Гц до 600 кГц.

Для всех волоконно-оптических датчиков была определена RMS сигналов в тех же условиях, которая для датчика типа А составляет 4.96 мВ; для датчика типа В с длиной  $L = 15$  мм составляет 22.6 мВ; для датчика типа В с длиной  $L = 40$  мм составляет

6.83 мВ; для датчика типа В с длиной  $L = 70$  мм составляет 6.94 мВ. Наибольшая чувствительность волоконно-оптического датчика АЭ достигается при использовании датчика типа В с длиной  $L = 15$  мм. Этот датчик демонстрирует наибольший отклик на всём частотном диапазоне, а также чувствительность, возросшую в 3.3 раза по сравнению с другими типами датчиков.

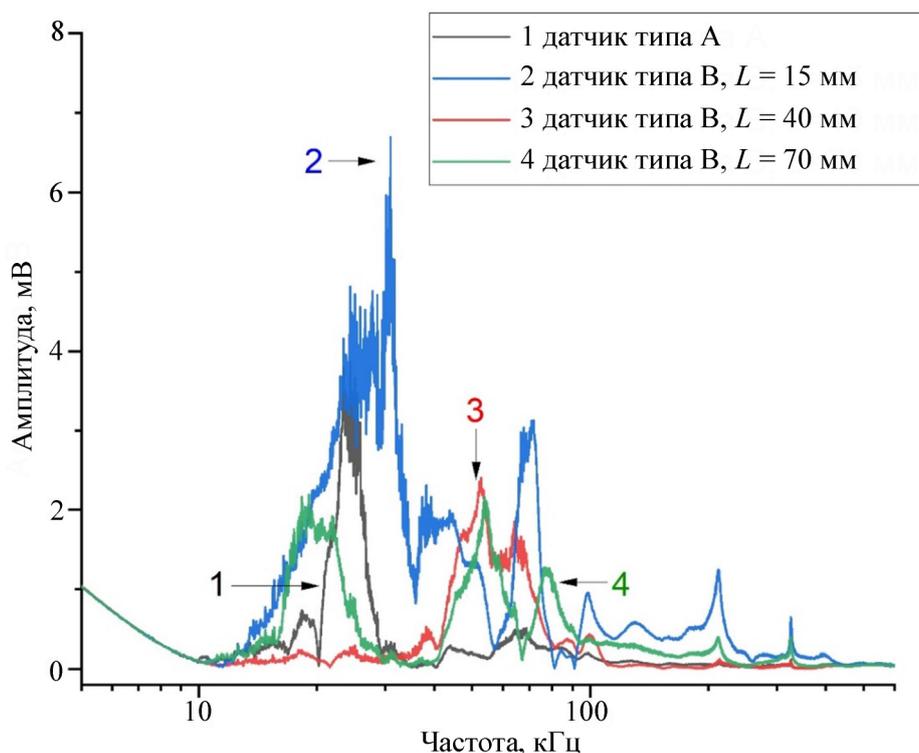


Рис. 3: АЧХ волоконно-оптических датчиков АЭ, изготовленных из пенополистирола разных форм и замеров.

*Заключение.* Таким образом в данной работе исследована эффективность работы волоконно-оптических датчиков катушечного типа для акустической эмиссии. Выполнены экспериментальные исследования работы датчиков АЭ катушечного типа, имеющих основание из дерева, силикона, пенополистирола. Установлено, что наибольшей чувствительностью обладает датчик с основанием, выполненным из пенополистирола в форме эллипсоида высотой 25 мм, шириной 20 мм и длиной  $L = 15$  мм. Такой материал и форма позволяют повысить чувствительность акустического волоконно-оптического датчика АЭ в среднем в 14 раз по сравнению с другими.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-19-00896).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. А. Сурмин, Н. А. Пак, К. И. Афросина, *Аллея науки* **2**(9), 806 (2017).
- [2] С. И. Буйло, *Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики: монография* (Южный федеральный университет, изд-во Южного федерального университета, R. 2017).
- [3] K. Kageyama, H. Murayama, I. Ohsawa, et al., *Smart Materials and Structures* **14**(3), 52 (2005). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/14/3/007>.
- [4] Ю. Н. Кульчин, *Распределенные волоконно-оптические измерительные системы* (М., Физматлит, 2001).
- [5] Р. В. Ромашко, М. Н. Безрук, С. А. Ермолаев, И. Н. Завестовская, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **41**(12), 8 (2014). <https://doi.org/10.3103/S1068335614120021>.
- [6] А. А. Kamshilin, R. V. Romashko, Y. N. Kulchin, *Journal of Applied Physics* **105**(3), 1 (2009). <https://doi.org/10.1063/1.3049475>.

Поступила в редакцию 2 декабря 2021 г.

После доработки 3 февраля 2022 г.

Принята к публикации 4 февраля 2022 г.