

---

---

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА,  
ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ**

---

---

УДК 531.395

**МЕТОД АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ  
ПРИ ДИАГНОСТИКЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**© 2020 г. Р. С. Ахметханов<sup>1,\*</sup>, Е. Ф. Дубинин<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**\*e-mail: mibsts@mail.ru*

Поступила в редакцию 28.05.2018 г.

Принята к публикации 25.12.2019 г.

В статье приведен метод анализа диагностических акустических сигналов при обнаружении дефектов в композиционных материалах. При этом используется кратно-масштабное разложение акустического сигнала и определение информационной энтропии для его составляющих. Установлено, что при наличии малых дефектов распределение спектральной плотности мощности мало отличается от спектральной плотности мощности для бездефектной области. В качестве критерия для обнаружения дефекта выбран линейный коэффициент корреляции для векторов, составленных из информационных энтропий кратно-масштабных составляющих акустического сигнала.

*Ключевые слова:* акустический сигнал, спектральная плотность мощности, мультифрактальный анализ, кратно-масштабный вейвлет-анализ, коэффициент корреляции

**DOI:** 10.31857/S0235711920020030

Композиционные материалы в настоящее время очень широко применяются в промышленности. Авиация, ракетостроение, автомобилестроение, машиностроение, станкостроение, судостроение, военная техника, металлургия, химическая и нефтехимическая промышленность, медицина, ядерная энергетика, изготовление спортивного снаряжения – вот неполный перечень основных отраслей, где используются композиционные материалы.

Композиционные материалы (КМ) – это многокомпонентные материалы, состоящие из полимерной, металлической, углеродной, керамической или другой основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов или тонкодисперсных частиц и др.

По структуре наполнителя КМ подразделяют на: волокнистые (армированы волокнами и нитевидными кристаллами), слоистые (армированы пленками, пластинками, слоистыми наполнителями) и дисперсно-армированные или дисперсно-упрочненные (с наполнителем в виде тонкодисперсных частиц). Матрица в КМ обеспечивает монолитность материала, передачу и распределение напряжения в наполнителе, определяет тепло-, влаго-, огне- и химическую стойкость.

Все композиционные материалы обладают большим количеством положительных свойств, однако для них характерно примерно столько же отрицательных свойств, которые ограничивают их распространение. Среди них можно отметить наличие дефектов при производстве и появление дефектов в процессе эксплуатации, плохую повторяемость свойств композиционных материалов от образца к образцу, низкую ударную

вязкость, что приводит к высокой повреждаемости изделий из композиционных материалов при эксплуатации, большой удельный объем, гигроскопичность и токсичность.

Все дефекты композиционных материалов делятся на два больших класса: 1) производственные дефекты, которые появляются в конструкциях либо в процессе их изготовления, либо в процессе изготовления составляющих материалов компонентов; 2) эксплуатационные повреждения, возникающие в процессе эксплуатации. Дефекты могут быть разделены на три группы: микро-, мини- и макродефекты [1].

При производстве композитов наиболее распространенными являются дефекты типа нарушения сплошности, к которым относятся: расслоения, непроклеи, трещины, воздушные или газовые раковины, инородные включения.

Кроме того, при производстве возможно появление дефектов на уровне микроструктуры: поры, отклонения от типового соотношения объема матрицы и объема армирующего материала, неудовлетворительная степень отверждения связующего компонента, неправильная ориентация волокон, складки, свищи, поверхностные вмятины и царапины и т.п., вблизи которых прочность материала существенно снижается.

Дефекты полимерных композитных материалов (ПКМ) различаются [2]: 1) по стадии образования (при изготовлении, хранении, транспортировке или эксплуатации); 2) по глубине расположения (поверхностные или внутренние); 3) по раскрытию; 4) по размерам (макродефекты – размером свыше 60–100 мкм и микродефекты – размером до 60–100 мкм).

Приведем несколько примеров диагностики с помощью акустического метода. В работе [3] рассмотрено применение метода акустической диагностики бензинового двигателя по структуре интегрального спектра, который позволяет сделать вывод о наличии дефекта. Полученные в работе результаты говорят об однозначности соответствия структуры спектра и дефекта двигателя.

В информационном сообщении ИПФ РАН (Отделение гидрофизики и гидроакустики) [4] отмечается, что наличие даже очень малых концентраций высокосжимаемых дефектов (например, трещин) приводит к сильному увеличению нелинейности материала при практически неизменной величине линейных упругих модулей, что можно использовать для раннего обнаружения дефектов в инженерных конструкциях. Приводится пример промышленного приложения этих результатов при диагностике трещинообразования в осях железнодорожных колесных пар.

В работе [5] приведены результаты вибрационной и акустической диагностики турбогенератора. Методы, использованные в работе, основаны на обработке вибрационных и акустических сигналов во временной и частотной области. С помощью этих методов проверяется техническое состояние турбокомпрессоров (роторов и подшипников) без остановки агрегата.

В работе [6] рассматриваются наиболее опасные недостатки полимерных композиционных материалов – низкая матричная полимеризация и неоднородность состава на протяжении всего объема или значительной части изделия. Кроме того, исследовались зоны чрезмерной пористости или более низкой плотности, неправильная ориентация волокон (погнутость волокон в плоскостях слоя). Эти дефекты были обнаружены с помощью метода диагностики на основе корреляции между диагностическими параметрами и искомыми свойствами. Были использованы акустические свойства материалов (коэффициент передачи и демпфирования ультразвуковых колебаний в материале), их физико-механические свойства (плотность, пористость, эластичность и прочностные свойства).

В статье отмечено, что применение лазера для возбуждения ультразвука в испытываемых деталях и конструкциях открывает новые возможности для диагностики полимерного композита, определения физико-механических свойств материала путем возбуждения мощных широкополосных импульсов с характеристиками, недостижимыми



Рис.1. Образец, изготовленный из композиционного материала.

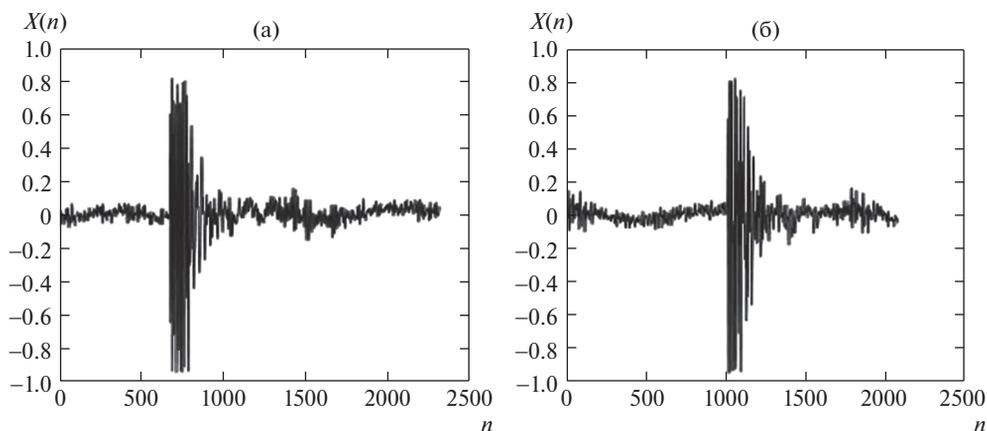


Рис. 2. Акустический отклик в бездефектной (а) и дефектной зоне (б).

при использовании обычных пьезоэлектрических преобразователей. А спектральный анализ сигналов и информация о структуре и свойствах материала позволяет повысить точность диагностики.

Цель статьи – исследование особенностей акустических сигналов при диагностике и обнаружении дефектов в композиционных материалах, определение наиболее чувствительных числовых параметров, зависящих от наличия дефектов.

В экспериментах по диагностике повреждений в композиционных материалах использовался дефектоскоп низкочастотный акустический АД-701, предназначенный для неразрушающего контроля многослойных конструкций и изделий из слоистых пластиков, как в условиях производства, так и при эксплуатации. Этот дефектоскоп использует два низкочастотных акустических метода неразрушающего контроля: 1) локальный метод свободных колебаний; 2) импульсный импедансный метод с использованием раздельно-совмещенного и совмещенного преобразователя.

В исследованиях по обнаружению дефектов использовался образец из композиционного материала с дефектом типа “непроклей”. На образец воздействовали с помощью штатного датчика ПС-101, который используется в локальном методе свободных колебаний. Акустический сигнал записывался на микрофон и обрабатывался с помощью программ МАТЛАБ и ImageJ.

Исследуемый образец приведен на рис. 1. В этом образце исследовались две области: бездефектная и дефектная. Визуальный анализ акустических сигналов  $X(n)$  показывает, что они отличаются незначительно (рис. 2).

По полученным из экспериментов данным были определены распределения спектральной плотности мощности  $S(f)$  (СПМ) акустических записей, которые приведены на рис. 3.

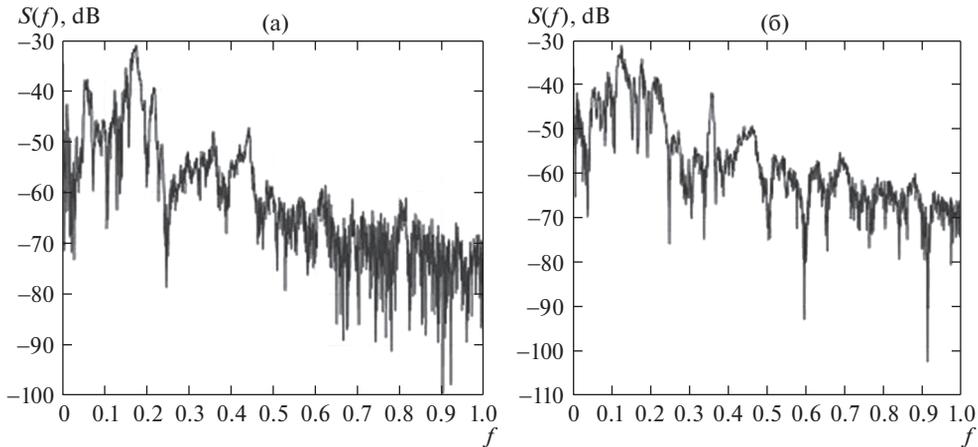


Рис. 3. Распределения спектральной плотности мощности акустических сигналов, определенных в бездефектной (а) и дефектной (б) области образца.

Т.к. данные при определении распределения спектральной плотности мощности вводились без интервала дискретизации сигнала, частотная координата представлена в нормализованном виде. Видны небольшие отличия в распределении спектральной плотности мощности акустических сигналов (рис. 3). Если рассматривать их гистограммы, то они характеризуются распределением с длинными хвостами, что характерно для мультифрактального распределения [7].

Монофрактальные и мультифрактальные динамические процессы отличаются характером распределений спектральной плотности мощности. Если при монофрактальном процессе распределение спектральной плотности мощности можно описать функцией, зависящей от частоты  $f$  в виде  $S(f) \sim f^{-\beta}$ , где  $\beta$  является константой, то в случае мультифрактального процесса СПМ описываются более сложной зависимостью.

Рассмотрим их мультифрактальные спектры. Мультифракталы – это неоднородные фрактальные объекты, для полного описания которых, в отличие от обычных фракталов, недостаточно введения всего лишь одной величины, его фрактальной размерности  $D$ , а необходим целый спектр таких размерностей, число которых бесконечно. Причина этого заключается в том, что наряду с чисто геометрическими характеристиками, определяемыми размерностью  $D$ , такие фракталы обладают еще одним важным свойством – распределением по своему геометрическому носителю некоторой меры –  $\rho$ . В качестве такой меры может выступать практически что угодно: плотность населения, концентрация вещества, намагниченность, энергия или яркость пиксела. Важно, что мера распределена по мультифракталу неравномерно, но самоподобно.

Мультифрактальность процесса обычно представляется мультифрактальным спектром (спектр сингулярности)  $f(\alpha)$ . Мультифрактальные спектры характеризуются шириной спектра, асимметрией, кривизной. Увеличение ширины спектра соответствует неравномерности меры.

Мультифрактальный спектр (сингулярностей)  $f(\alpha)$  характеризует зависимость числа элементов покрытия  $N_\alpha$  с различными масштабами  $\epsilon$ , соответствующих точкам с экспонентой сингулярности, равной некоторому значению  $\alpha$

$$N_\alpha(\epsilon) \sim \epsilon^{-f(\alpha)}.$$

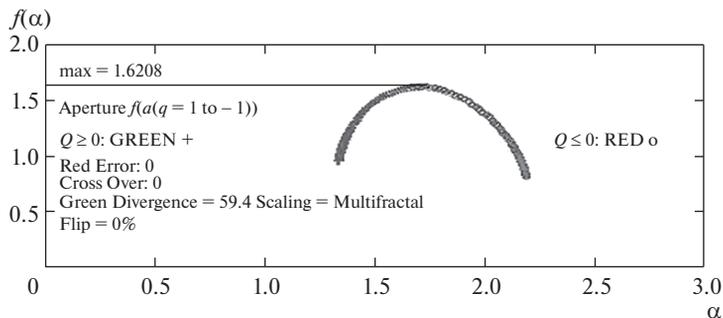


Рис. 4. Мультифрактальный спектр для бездефектной зоны.

По смыслу величина  $f(\alpha)$  при условии  $\alpha = \text{const}$  соответствует размерности Хаусдорфа. В случае равномерного распределения меры на множестве спектр сингулярностей представляет собой единственную точку на плоскости  $(\alpha, f)$ , что соответствует монофрактальному процессу. При неравномерном распределении меры функция  $f(\alpha)$  имеет более сложный (колоколообразный) вид.

На рис. 4 представлен мультифрактальный спектр для акустического сигнала в бездефектной зоне (программа ImageJ), который был определен по скелетному спектру этих сигналов (программа МАТЛАБ).

Т.к. СПМ акустических сигналов были схожи визуально, то и их мультифрактальные спектры похожи, с той разницей, что для бездефектной зоны фрактальная размерность определена значением 1.6208 (максимальная точка на мультифрактальном спектре), а для дефектной области величиной 1.6469.

Чтобы найти характерные отличия акустических сигналов, рассмотрим их с помощью кратно-масштабного вейвлет-анализа [8].

Имея вейвлет-преобразование, можно оценить глобальную и локальную энергию или энергии частотных составляющих, а также можно оценить информационную энтропию кратно-масштабных составляющих сигнала [8, 9]. Кратно-масштабный анализ (КМА) обладает целым рядом полезных свойств, главным из которых является возможность выделения из исходного сигнала его деталей различных масштабов. Коэффициенты вейвлет-преобразования вскрывают структуру сигнала на разных масштабах и в разных временных точках.

Кратно-масштабным анализом называется описание пространства  $L^2(R)$  через иерархически вложенные подпространства  $V_m$ , которые не пересекаются, и объединение которых дает в пределе все  $L^2(R)$ . Размеры подпространств непрерывно расширяются по мере роста значения  $m$ , а объединение всех подпространств в пределе дает пространство  $L^2(R)$ .

Для достижения поставленной цели с использованием пакетного вейвлет-преобразования для получения наилучшей структуры вейвлет-дерева разложения используем критерий минимального значения энтропии Шеннона. При этом получим дерево со значениями информационной энтропии.

Информационная двоичная энтропия для независимых случайных событий  $x$  с возможными  $n$  состояниями, распределенных с вероятностями  $p_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), рассчитывается по формуле

$$H(x) = -\sum_i^n p_i \log_2(p_i).$$

**Таблица 1.** Распределения энтропии диагностического акустического сигнала по частотным составляющим для бездефектной и дефектной области образца

Зона образца	$H(S)$	$H(A_1)$	$P(D_1)$	$H(A_2)$	$H(D_2)$	$H(A_3)$	$H(D_3)$	$H_{\text{sum}}$
Область без дефекта X	57.65	22.777	<b>7.025</b>	2.8628	<b>10.047</b>	<b>3.172</b>	<b>4.239</b>	24.385
Область дефекта Y	60.57	30.948	<b>9.468</b>	13.719	<b>11.679</b>	<b>14.524</b>	<b>8.886</b>	44.557

Эта величина называется средней энтропией сообщения. Величина  $H = -p_j \log_2(p_j)$  называется *частной энтропией*, характеризующей только  $j$ -е состояние.

Таким образом, энтропия события  $x$  является суммой с противоположным знаком всех произведений относительных частот появления события  $i$ , умноженных на их же двоичные логарифмы (основание 2 выбрано только для удобства работы с информацией, представленной в двоичной форме).

В случае определения информационной энтропии акустического сигнала определяется вероятность амплитудного значения

$$p_j = \frac{N_j}{N},$$

где  $N$  – общее число рассматриваемых событий,  $N_j$  – число  $j$ -х событий.

Акустический сигнал разлагается на кратно-масштабные составляющие (вейвлет-дерево)

$$S = A_1 + D_1 = A_2 + D_2 + D_1 = A_3 + D_3 + D_2 + D_1, \quad (1)$$

где  $A_i$  –  $i$ -я аппроксимирующая составляющая сигнала,  $D_i$  –  $i$ -я детализирующая составляющая сигнала.

В табл. 1 приведены распределения информационной энтропии акустических сигналов по кратно-масштабным составляющим (аппроксимирующим  $A_i$  и детализирующим  $D_i$ ) для бездефектной и дефектной области образца (использовалась ненормализованная форма информационной энтропии Шеннона) [10].

В области дефекта информационная энтропия для акустического сигнала  $H(S)$  выше, чем в области без дефекта. И суммарная энтропия кратно-масштабных составляющих  $H_{\text{sum}}$  также больше для области с дефектом (суммировались значения выделенным жирным шрифтом в соответствии с выражением (1)). При этом в области дефекта акустический сигнал имеет увеличение информационной энтропии по всем аппроксимирующим и детализирующим кратно-масштабным составляющим.

Проведенные исследования показали незначительные отличия в распределениях спектральной плотности акустического сигнала в бездефектных и дефектных зонах. Полученные данные по фрактальным и мультифрактальным оценкам вейвлет-спектров акустических сигналов также показали близость их характеристик. Наиболее чувствительные отличия получены при оценке информационной энтропии акустических сигналов, наиболее значительные расхождения – в информационных энтропиях кратно-масштабных детализирующих и аппроксимирующих составляющих акустических сигналов.

Таким образом, при акустической диагностике композиционных материалов методом собственных колебаний наиболее чувствительным из методов оказался кратно-масштабный вейвлет-анализ с определением информационной энтропии составляющих. В этом случае критерием обнаружения дефекта по акустическому сигналу может

быть линейный коэффициент корреляции  $r_{XY}$  между векторами  $X$  и  $Y$ , составленными из значений информационной энтропии

$$r_{XY} = \frac{\text{Cov}XY}{\sigma_X \sigma_Y},$$

где  $\text{Cov}XY$  – корреляционный момент;  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$  – среднеквадратические отклонения.

Кратно-масштабным вейвлет-разложением акустических сигналов получили два вектора  $X = (7.025 \ 10.047 \ 3.172 \ 4.239)$  и  $Y = (9.468 \ 11.679 \ 14.528 \ 8.886)$  для бездефектной и дефектной области. В этом случае коэффициент корреляции этих двух акустических сигналов равен 0.418.

Таким образом, акустические сигналы слабо коррелированы между собой, и линейный коэффициент корреляции может служить хорошим критерием обнаружения малых дефектов в композиционных материалах.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00776-П).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Троицкий В.А., Карманов М.Н., Троицкая Н.В.* Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2014. № 3. С. 29.
2. *Мурашов В.В., Румянцев А.Ф.* Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. <https://viam.ru/public/files/2008/2006-204706.pdf> (дата обращения 28.03.2018).
3. *Горбачев А.А.* Диагностика двигателя внутреннего сгорания автомобиля по акустическому излучению двигателя // Теория и практика современной науки. 2016. № 6 (12).
4. *Tomasz Lus.* Vibro-acoustic methods in marine diesel engines diagnostics // Journal of KONES Powertrain and Transport. 2011. V. 18. № 3. P. 203.
5. *Kablov E., Murashov V., Rumyantsev A.* Diagnostics of polymer composites by acoustic methods // ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS. 2006. № 2 (59).
6. *Ахметханов Р.С.* Особенности распределений спектральной плотности мощности фрактальных и мульти-фрактальных процессов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 3. С. 37.
7. *Ахметханов Р.С.* Применение вейвлет-преобразований для анализа одно-, двух- и трехмерных массивов данных // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 112–119.
8. *Ахметханов Р.С.* Применение теории фракталов и вейвлет-анализа для выявления особенностей временных рядов при диагностике систем // Вестник научно-технического развития. 2009. № 1. С. 26.
9. *Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim.* Wavelet Toolbox User's MathWorks, Inc., 1996. 626 p.