

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 53.08 : 004; 53.087/.088

### РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ\*

С. В. Панин<sup>1</sup>, А. В. Бяков<sup>1</sup>, В. В. Гренке<sup>1</sup>,  
И. В. Шакиров<sup>1</sup>, О. В. Башков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук  
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН,  
634021, г. Томск, просп. Академический, 2/4  
E-mail: svp@ispms.tsc.ru

<sup>2</sup>Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»,  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, просп. Ленина, 27

Создан и экспериментально исследован (протестирован) лабораторный стенд для регистрации и анализа данных акустической эмиссии. Представлены блок-схема комплекса и алгоритм его функционирования. Показана взаимосвязь результатов НЧ-, ВЧ-, статистической обработки регистрируемых данных и физических особенностей входных сигналов на примере использования модельных акустических сигналов с применением различных блоков разработанного стенда. Проведено тестирование комплекса при испытании реальных объектов в случае трёхточечного изгиба азотированных образцов стали с различной толщиной упрочнённого поверхностного слоя. Показано, что образование трещин формирует эмиссию сигналов с амплитудой до 4 В, в то время как при деформации в отсутствие выраженного растрескивания амплитуда усиленного сигнала не превышает 0,5 В.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, акустическая эмиссия, цифровая обработка, модельный сигнал, резонансный датчик.

**Введение.** В настоящее время акустоэмиссионный (АЭ) метод является одним из надёжных, широко изученных и представленных в научно-технической литературе способов неразрушающего контроля. Он основан на физическом явлении, связанном с излучением механических (упругих) волн, вызванных динамической локальной перестройкой внутренней структуры твёрдого тела при его нагружении [1]. Основное преимущество АЭ-диагностики — отсутствие необходимости доступа ко всем частям объекта контроля. В результате снижаются затраты на её проведение, а также упрощается сама процедура контроля. Создание оборудования для исследования АЭ-процессов в лабораторных условиях отражено в работах [2, 3] и ряде других.

Современная АЭ-аппаратура, построенная с применением методов цифровой обработки сигналов в режиме реального времени, позволяет выделять АЭ-сигнал из шумовой помехи, определять координаты источников, сохранять результаты регистрации и измерений для последующего детального анализа и т. д. Как правило, такая аппаратура разрабатывается и адаптируется специально для конкретных классов промышленных объектов и задач. В настоящее время на рынке приборов для дефектоскопии устройства подобного

\*Работа выполнена при частичной поддержке СО РАН (проект № III.20.1.3.) и Совета по грантам Президента РФ (№ НШ-5242.2010.1).

рода широко представлены как отечественными разработчиками, так и их зарубежными коллегами [4]. Пользователь имеет возможность выявлять сформировавшиеся дефекты (трещины), но приборы такого уровня недостаточно чувствительны либо не приспособлены для проведения диагностики механического состояния на более ранних стадиях деформации и предразрушения.

В экспериментальных исследованиях деформационного поведения конструкционных материалов АЭ-метод весьма информативен, поскольку позволяет получать данные со всей рабочей части нагруженного образца в процессе генерации деформационных дефектов микромасштабного уровня (прежде всего, дислокаций и их ансамблей, двойников и др.) [5, 6]. Одна из наиболее актуальных научных задач при этом — идентификация источников акустической эмиссии [7–10], которая решается путём выделения отдельных АЭ-сигналов (событий) и подробного их анализа с использованием аппарата обработки сигналов на основании данных об амплитуде, энергии, частоте, затухании и т. д. С точки зрения технической реализации исследовательских приборов для анализа акустической эмиссии задача заключается в регистрации каждого единичного сигнала, его классифицировании и использовании при построении единой картины изменения параметров акустической эмиссии по мере деформирования исследуемых образцов. Примером исследовательского оборудования, доступного на рынке и позволяющего решать подобные задачи, является прибор фирмы "Valien" (Германия) [11], алгоритмы работы которого не обсуждаются в литературе.

Таким образом, актуальной становится задача разработки доступного по стоимости исследовательского оборудования для изучения в лабораторных условиях процессов акустической эмиссии с возможностью его перенастройки для решения конкретных, более частных, задач (в зависимости от способа и условий нагружения, типа материала и пр.). Основные этапы создания подобного оборудования: поиск аппаратных средств, обладающих достаточной чувствительностью, быстродействием, низким уровнем шумов и большой глубиной дискретизации; поиск и проведение процедур калибровки созданного устройства; тестирование с использованием модельных сигналов; проведение экспериментальных исследований с применением разрабатываемого стенда; анализ информативных параметров, традиционно используемых и описанных в литературе, а также поиск новых для анализа регистрируемых данных акустической эмиссии; интерпретация полученных результатов как в сравнении с известными данными, так и в рамках научных концепций, позволяющих увязать генерацию акустической эмиссии с деформационными характеристиками на различных масштабных уровнях, в частности диаграммой нагружения на макроуровне [12] и интенсивностью деформации сдвига на уровне мезоскопического масштаба [13, 14].

Отметим, что при анализе и интерпретации данных акустической эмиссии используют различные её параметры [2, 3]. Так, в [15] рекомендуется использовать: число импульсов, суммарный счёт, активность, скорость счёта и энергию акустической эмиссии, что нашло применение в предлагаемой работе при создании лабораторного стенда для анализа АЭ-сигналов.

**1. Разработка комплекса регистрации акустической эмиссии.** Основные требования к аппаратуре для регистрации акустической эмиссии формируются исходя из особенностей АЭ-сигналов: сложного характера, низкого энергетического уровня, широкого диапазона частот, большого динамического диапазона изменения и др. Поэтому приёмный преобразователь и следующие за ним электронные блоки должны вносить минимальные искажения в форму сигналов, иметь высокую чувствительность и большой коэффициент усиления, обладать минимальным уровнем собственных шумов. Вследствие малости энергии АЭ-импульса для повышения чувствительности применяют, как правило, резонансные пьезопреобразователи, которые имеют очень высокое выходное сопротивление, составляющее единицы—десятки мегаом, широкий диапазон рабочих частот (вплоть до десятка мегагерц) и низкий уровень собственных шумов [16]. Диапазон частот, характерный для

акустической эмиссии, лежит в пределах от десятков килогерц до нескольких мегагерц. Эти особенности акустоэмиссионных датчиков (ДАЭ) определили следующие требования к параметрам измерительного канала: высокое входное сопротивление входного усилителя, необходимое для согласования датчика со входом усилителя по уровню; низкий уровень шума всего измерительного тракта, приведённый к уровню сигнала на входе канала; широкий диапазон частот с максимальной линейностью частотной характеристики [17]. Основными блоками разработанного лабораторного комплекса регистрации акустической эмиссии являются [14]: ДАЭ, широкополосный малошумящий усилитель, малошумящий источник питания, блок АЦП, персональный компьютер и программное обеспечение. В силу отсутствия специальных требований к выбору ПК в составе комплекса был использован компьютер, оснащённый процессором Pentium 4 Core 2 Duo с тактовой частотой 2 ГГц и объёмом ОЗУ 1 Гбайт, под управлением операционной системы Windows XP.

К выбору широкополосного малошумящего усилителя предъявлялись специальные требования. Очевидно, что достоверная и надёжная регистрация АЭ-сигнала может быть достигнута только при минимальных (в несколько микровольт), приведённых к уровню сигнала на входе усилителя, шумах измерительного канала комплекса. Предлагаемые на рынке готовые решения не удовлетворяли этому условию. В данной работе проектировался усилитель с использованием самых современных и доступных на рынке электронных компонентов, а также оптимального схемного решения. Источник питания с заведомо низкими значениями шумов позволяет приблизиться величине шума на выходе усилителя к величине его внутреннего шума. Особенностью реализованной схемы является применение сверхмалошумящего широкополосного операционного усилителя AD8004 (Analog Devices) и полевого транзистора на входе усилителя. Выходное сопротивление ДАЭ очень велико, и для наилучшего согласования со входом усилителя необходимо обеспечить условие высокого входного сопротивления для первого усилительного каскада. Схема усилителя смоделирована с помощью пакета P-SPICE, протраассирована с использованием САПР P-CAD, после чего изготовлена в промышленных условиях. Реализованные характеристики действующей модели обеспечили коэффициент усиления порядка 54 дБ при уровне собственных шумов менее 12 мкВ, что полностью соответствует расчётным параметрам, а усилитель удовлетворяет заданным условиям проведения экспериментальных исследований.

При выборе аппаратного обеспечения (АО) разрабатываемого стенда (рис. 1, а) для повышения технических характеристик и снижения затрат на разработку и изготовление отдельных блоков использованы следующие устройства: ДАЭ GT-200 (монтируется на объект контроля (ОК)) с коэффициентом электроакустического преобразования не менее 60 дБ (ООО «ГлобалТест», г. Саров); малошумящий источник питания (МИП) — щелочной аккумулятор с амплитудой собственных шумов порядка 1 мВ (фирма "Varta", Германия); 14-разрядная плата АЦП LA-n150-14PCI со временем преобразования 143 нс при максимальной частоте дискретизации 7 МГц (ЗАО «Руднев—Шиляев», Москва), а также разработанный и изготовленный авторами широкополосный малошумящий усилитель (ШМУ). Результаты тестовых измерений, полученные с помощью комплекса, показывают, что достигнутые технические характеристики позволяют с достаточной чувствительностью регистрировать появление АЭ-сигналов с амплитудой не менее 30 мкВ.

Программное обеспечение (ПО) регистрации и обработки сигналов и данных в разрабатываемом комплексе включает следующие процедуры:

- 1) ввод сигналов (поступление непрерывного потока информации с платы АЦП в память компьютера и запись в виде массива данных в файл реализуются блоком регистрации данных (БРД));

- 2) предобработка (блок предобработки (БПредО) обеспечивает проведение анализа потока оцифрованных данных для выделения в нём характерных последовательностей собы-

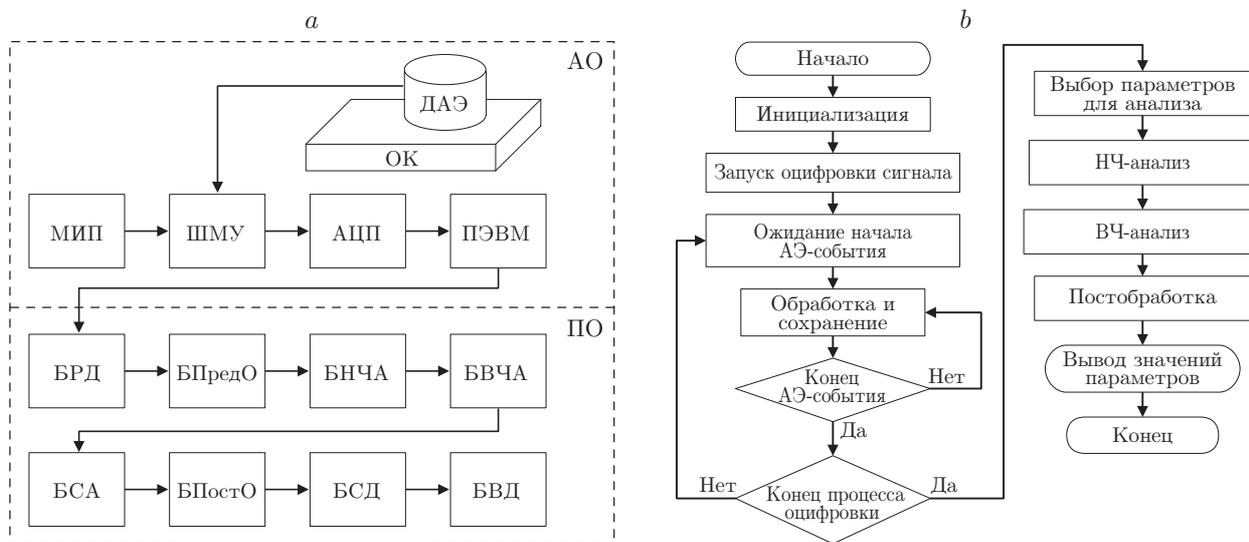


Рис. 1. Блок-схема лабораторного стенда регистрации и анализа данных акустической эмиссии: взаимодействие аппаратных блоков стенда (а); структурная схема алгоритма работы ПО для ввода, фильтрации, анализа, постобработки и визуализации АЭ-сигналов (б)

тий акустической эмиссии в целях снижения объёма информации, подлежащей хранению и детальному анализу; выделенные АЭ-сигналы являются объектами для последующего анализа);

3) анализ/обработка (осуществляется с помощью блока НЧ-анализа (БНЧА), блока ВЧ-анализа (БВЧА), блока статистического анализа (БСА) с учётом выбора информативных параметров для полноценной оценки зарегистрированных событий акустической эмиссии, включающих для каждого отдельного события частоту, амплитуду, длительность, энергию, коэффициент затухания и др.);

4) постобработка (процедура, состоящая из элементов распознавания образов и предназначенная для исключения (фильтрации) АЭ-сигналов, не отнесённых ни к одному из возможных классов источников акустической эмиссии, реализуется блоком постобработки (БПостО));

5) сохранение данных (блок сохранения данных (БСД) записывает отдельные выделенные АЭ-сигналы в цифровой файл звукового формата для их последующего ретроспективного анализа);

6) графическое отображение (блок визуализации данных (БВД), визуализация полученной информации проводится с помощью доступных и собственных программных решений и позволяет отображать результаты детального анализа данных, полученных с использованием стенда).

Алгоритм работы ПО стенда представлен на рис. 1, б. На этапе инициализации выполняется настройка параметров работы платы АЦП и устанавливается порог регистрации сигнала. После запуска оцифровки система переходит в состояние ожидания начала сигнала, в качестве которого выступает превышение установленного уровня записи, в то время как концу сигнала соответствует падение его уровня ниже установленного порога. Для более точного последующего анализа производится запись небольшого фрагмента перед выделяемым сигналом и после него. По окончании оцифровки происходит переход к следующему этапу — анализу, для чего выбираются информативные признаки (параметры), необходимые для проведения соответствующих расчётов. В результате обработки пользователю доступны численные значения выбранных параметров, а также графическая

визуализация полученных результатов.

**2. Тестирование лабораторного комплекса с использованием модельных сигналов.** Работоспособность созданного лабораторного стенда тестировали с помощью различных источников сигналов, параметры которых в той или иной степени близки к параметрам реальных источников акустической эмиссии. Далее приведены результаты такого тестирования.

2.1. *Формирование модельного сигнала резонансным датчиком.* Эксперимент проходил по аналогии с исследованиями, описанными в [18]. Отличие состояло в том, что в предлагаемой работе использовался ВЧ-генератор, позволяющий точно формировать амплитуду и частоту задающего сигнала. Испытания проводились при различном расположении излучателя и приёмника: в первом случае (схема 1) они располагались напротив друг друга (рис. 2, *a*). Материалом для передачи сигнала служила пластина из алюминиевого сплава Д16АТ толщиной 2 мм. Во втором случае (схема 2) они располагались с одной стороны этой пластины на расстоянии  $l = 10\text{--}100$  мм друг от друга (рис. 2, *b*).

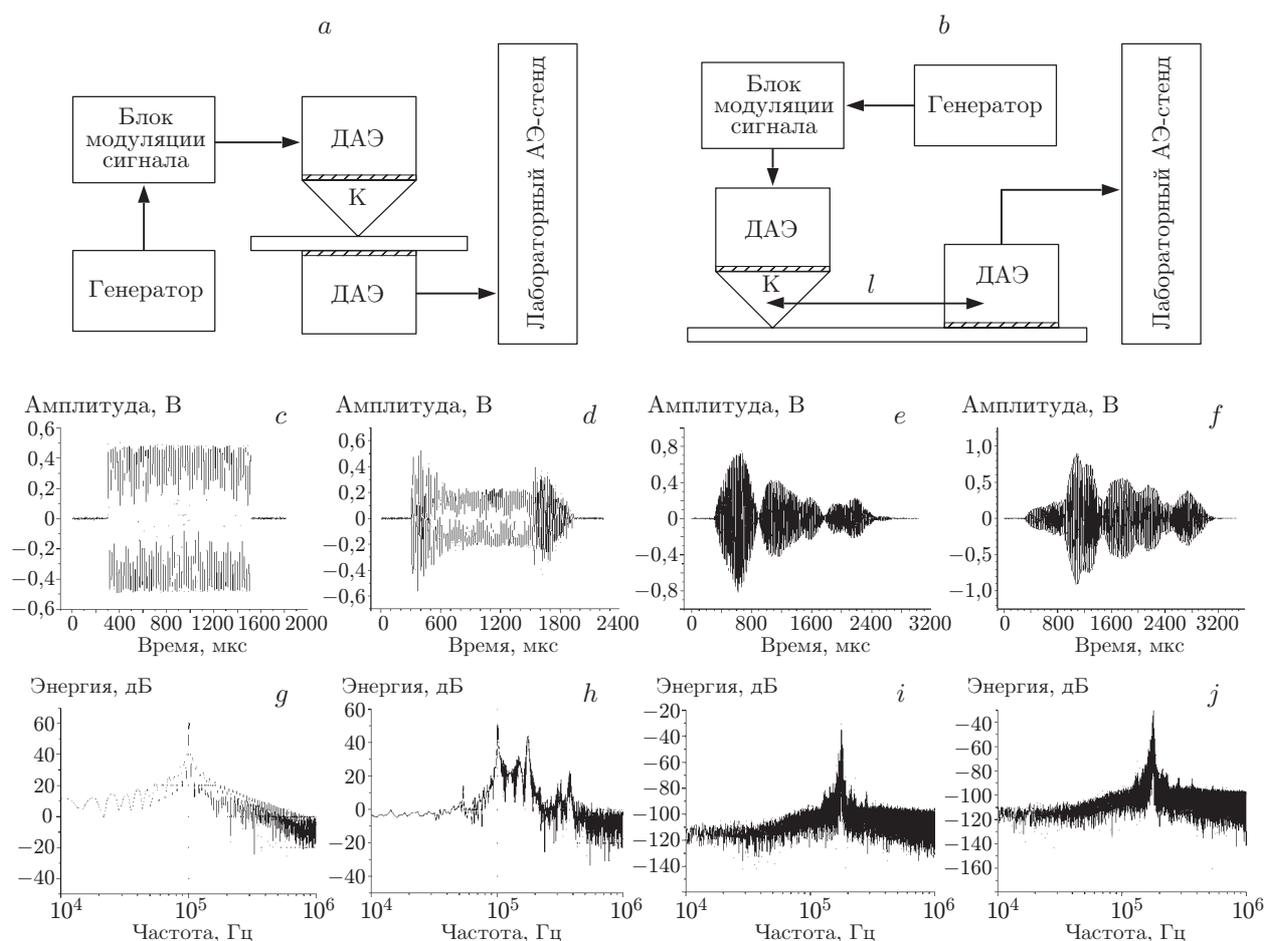


Рис. 2. Блок-схема эксперимента по формированию и регистрации модельных акустических импульсов: излучатель и приёмник расположены напротив друг друга (*a*); находятся с одной стороны пластины (*b*); модельный прямоугольный импульс с частотой заполнения  $f = 100$  кГц (*c*) и его спектр (*g*); модельный импульс с  $f = 100$  кГц, зарегистрированный при использовании схемы 1, (*d*) и его спектр (*h*); модельный импульс с  $f = 170$  кГц, принятый с применением схемы 2, и его спектр при  $l = 20$  мм (*e, i*) и  $l = 180$  мм (*f, j*)

В качестве излучателя сигнала и приёмного датчика использовались два ДАЭ GT-200. Излучатель устанавливался на металлический конус (К) из закалённой стали, необходимый для локализации акустического излучения в точке его соприкосновения с пластиной для имитации точечного источника акустической эмиссии. Источником несущего сигнала выступал генератор синусоидальных сигналов ГЗ-111. Для амплитудной модуляции несущего сигнала использовался блок модуляции сигнала (см. рис. 2, *a, b*), собранный на базе несимметричного мультивибратора на логических элементах.

В первой серии экспериментов с использованием схемы 1 исследовалось прохождение сигнала с частотой  $f = 100$  кГц (см. рис. 2, *a*). Излучённый сигнал представлен на рис. 2, *c* и имеет следующие характеристики: частота сигнала 100 кГц, период повторения импульсов 1 с, амплитуда сигнала в максимуме 0,5 В. Исходный сигнал имитирует резкое увеличение амплитуды УЗ-сигнала, распространяющегося в твёрдой среде. Обработка сигналов проводилась с помощью БВЧА программного обеспечения (см. рис. 1, *a*). На рис. 2, *d, h* приведены сигнал, зарегистрированный ДАЭ, и его частотный спектр. Наличие в спектре дополнительного пика на частоте  $\sim 180$  кГц обусловлено резонансным ДАЭ, частота которого соответствует данному значению.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при распространении модельного сигнала через среду и его регистрации по схеме 1 основная (несущая) частота сохраняется и её энергия в спектре имеет максимальное значение; в то же время появляется дополнительный максимум, частота которого соответствует резонансной для ДАЭ (см. рис. 2, *d, h* и рис. 3, *a*). При этом амплитуда центрального максимума несколько снижается относительно исходного значения (ср. рис. 2, *g* и *h*). Кроме того, существенно возрастает роль переходных процессов, по-видимому, связанных с переходом упругой волны из «излучателя» в среду и из пластины в приёмник. Это проявляется в заметном искажении переднего и заднего фронтов импульса (см. рис. 2, *d*).

Во второй серии экспериментов применялась схема 2 расположения приёмника и передатчика с одной стороны пластины (см. рис. 2, *b*). Путь прохождения модельного сигнала удлиняется, что обуславливает и более заметное искажение формы сигнала, которая значительно отличается от формы тестового сигнала (ср. рис. 2, *e* и *c*). Причём с увеличением расстояния между ДАЭ такое искажение только усиливалось (рис. 2, *f*). По этой причине несущая частота входного сигнала была выбрана близкой к резонансной для ДАЭ:  $f = 170$  кГц. Приведённые на рис. 2, *i, j* спектры сигналов свидетельствуют о том, что

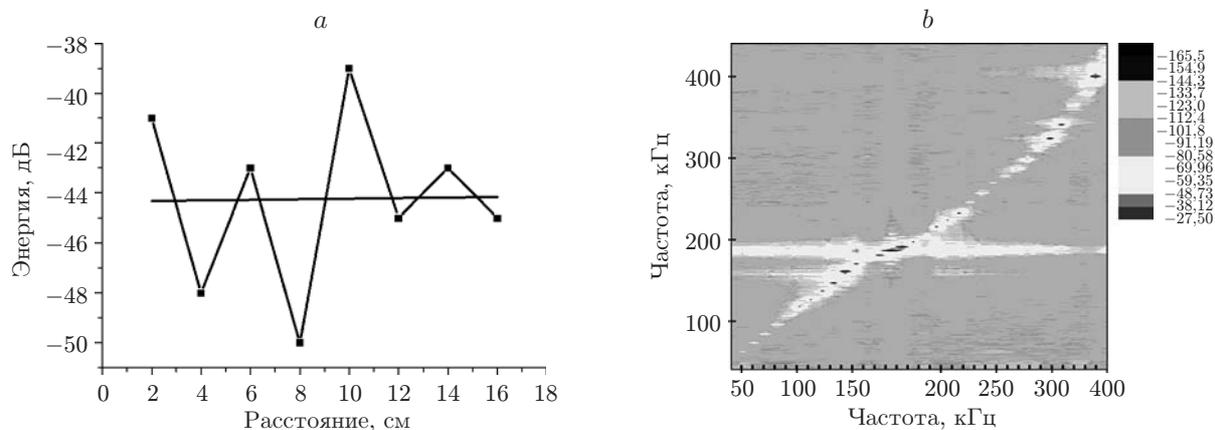


Рис. 3. Изменение энергии основного максимума в спектре входного сигнала: как функция расстояния  $l$  от приёмника до источника (*a*) и в зависимости от частоты заданного сигнала (*b*)

для них характерно наличие лишь одного максимума, соответствующего резонансной частоте датчика GT-200. Проанализировано изменение энергии основного пика в спектре при изменении расстояния  $l$  между излучателем и приёмником (см. рис. 3, *a*). Видно, что энергия максимального пика в спектре, который соответствует резонансной частоте ДАЭ  $f_{р\text{ДЭ}} \sim 180$  кГц, остаётся постоянной и практически не меняется с увеличением расстояния между датчиками.

В третьей серии экспериментов, проводившейся по схеме 1, на излучатель подавался тестовый амплитудно-модулированный сигнал в форме прямоугольных импульсов с изменяющейся в диапазоне 50–400 кГц частотой заполнения (табл. 1).

На рис. 3, *b* приведена зависимость изменения энергии основного частотного максимума принятого АЭ-сигнала от изменения частоты входного сигнала. Отчётливо выявляются следующие особенности:

- 1) во всём использованном диапазоне частот присутствует максимум  $f \sim 180$  кГц, являющийся резонансной частотой ДАЭ ( $f_{р\text{ДЭ}} \sim 180$  кГц);
- 2) энергия пика на несущей частоте отличается на различных частотах, что наиболее вероятно связано с нелинейностью АЧХ ДАЭ GT-200 [16];
- 3) в диапазоне частот  $f \leq 100$  кГц пик несущей частоты в спектре слабо выражен.

Отметим, что присутствие в спектре резонансной частоты ДАЭ связано с их использованием в качестве и излучателя, и приёмника. В случае минимальных искажений модельного сигнала при «прямом» прохождении через пластину (схема 1) удаётся сохранить несущую частоту на уровне, приемлемом для выделения. При прохождении сигнала через алюминиевую пластину на расстояние  $l$  (схема 2) происходит заметное искажение формы сигнала, в результате основной максимум в частотном спектре соответствует  $f_{р\text{ДЭ}} \sim 180$  кГц. В то же время энергия этого максимума практически остаётся постоянной при увеличении расстояния между излучателем и приёмником.

Таким образом, используемый в работе «модельный» сигнал лишь имитирует реальный АЭ-сигнал и вполне может отличаться от него характером распространения в среде. Однако для целей тестирования стенда подобная постановка представляется нам вполне корректной. Более того, применяя предложенную методику, в рамках разработанного лабораторного стенда можно проводить его калибровку и с учётом известной АЧХ датчика определять истинные частоты, характерные для источников акустической эмиссии.

2.2. *Моделирование источника АЭ-сигнала путём разрушения графитового грифеля.* Данный метод рекомендуется использовать для калибровки ДАЭ [19, 20]. При этом акустический сигнал, возникающий в процессе поломки грифеля, также является модельным. В предлагаемой работе поставлена задача: сравнить сигналы, эмитируемые в процессе поломки грифеля различной твёрдости, и определить влияние твёрдости грифеля на

Таблица 1

**Параметры проведения экспериментов  
с формированием модельного сигнала резонансным датчиком**

№ п/п	Диапазон частот, кГц	Шаг изменения частоты, кГц
1	50–160	10
2	165–190	5
3	200–300	10
4	320–400	20

формирование модельного сигнала (и его спектра), регистрируемого с помощью комплекса. Обработка сигналов проводилась БВЧА (см. рис. 1, *a*). В экспериментах применялся грифель (диаметром 1,9 мм) карандашей фирмы КОН-I-NOR (Чехия) с твёрдостью от 2Н до 3В согласно принятой классификации обозначений. В качестве акустически проводящей среды использовалась пластина из алюминиевого сплава Д16АТ толщиной 2 мм. ДАЭ крепили на расстоянии 140 мм от источника сигнала. Для обеспечения наилучшего акустического контакта между датчиком и пластиной наносился слой эпоксидной смолы. Принцип поломки грифеля аналогичен описанному в [21].

Для установления взаимосвязи между обозначенной твёрдостью грифеля и его микротвёрдостью проводились измерения с помощью микротвердомера ПМТ-3. Результаты измерений представлены на рис. 4, *a*. Отметим, что микротвёрдость грифеля увеличивается практически линейно. Типичный сигнал, регистрируемый стендом при разрушении грифеля, и его спектр приведены на рис. 4, *b, c*. Видно, что отдельных выраженных частотных пиков в спектре выделить не удаётся. Это свидетельствует о присутствии в той или иной мере в спектре сигнала, эмитируемого в процессе разрушения, практически всех частот. Максимальное значение энергии спектра, которое можно выделить, наиболее вероятно соответствует резонансной частоте ДАЭ  $f_{рДЭ} \sim 180$  кГц (на рис. 4, *c* обозначено стрелкой). Анализ результатов измерения энергии спектра при поломке грифелей различ-

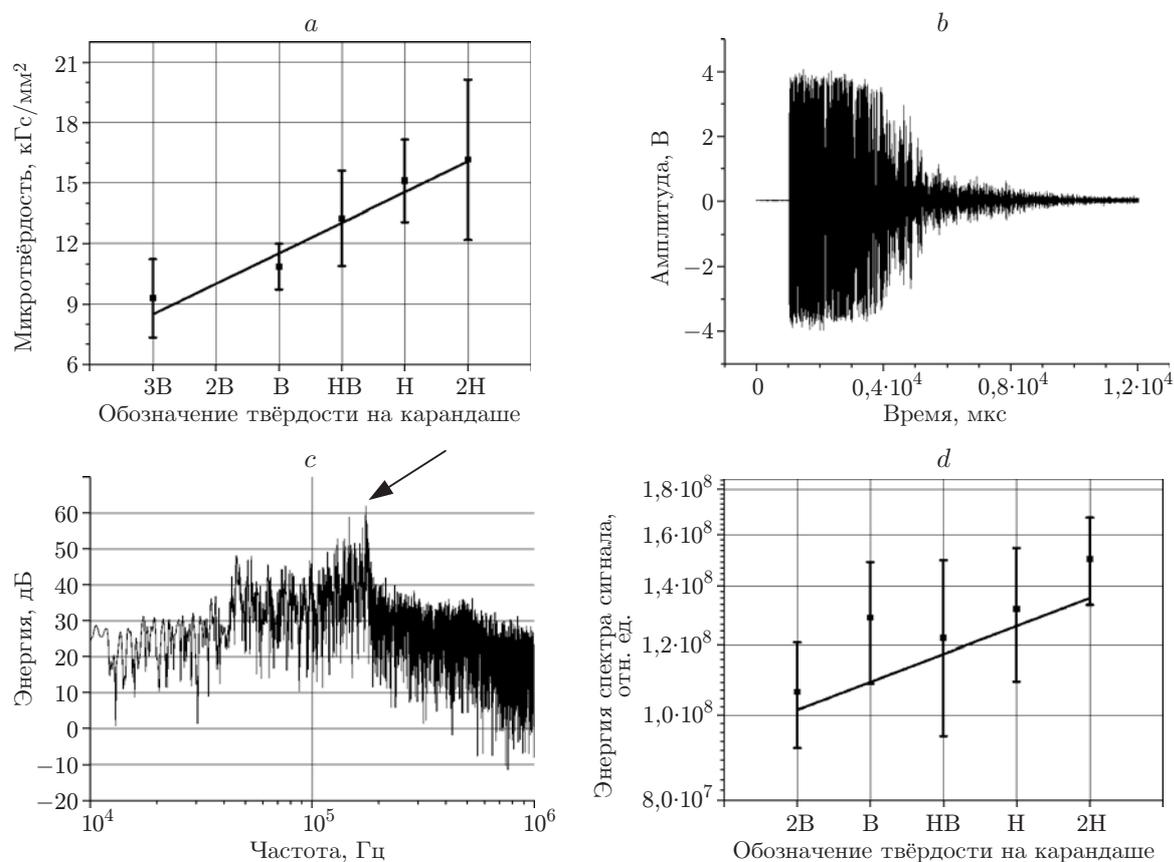


Рис. 4. Результаты эксперимента по моделированию сигнала путём разрушения графитового грифеля: зависимость микротвёрдости от твёрдости грифеля карандаша (*a*); типичный сигнал, регистрируемый ДАЭ GT-200 при поломке графитового грифеля диаметром 1,9 мм с твёрдостью НВ, (*b*); частотный спектр (*c*); зависимость энергии спектра АЭ-сигнала от твёрдости грифеля карандаша (*d*)

ной твёрдости показывает, что с увеличением твёрдости грифеля энергия спектра возрастает и это может быть удовлетворительно аппроксимировано линейной зависимостью (рис. 4, *d*). Полученный результат представляется вполне корректным и ожидаемым: более твёрдые материалы обладают большей способностью к генерации акустической эмиссии (см., например, [5, 6]).

2.3. *Моделирование источника АЭ-сигнала при падении подшипникового шарика.* В предлагаемой работе применялся ещё один метод регистрации модельных АЭ-сигналов, прототип которого описан в [22] в качестве энергетического метода калибровки ДАЭ. Модельный сигнал формировался при падении стального шарика в виде возникающей при этом акустической волны. Согласно [22] энергия сигнала может быть рассчитана по формуле

$$E_{\text{АЭ}} = \int_0^T V(t)^2 dt, \quad (1)$$

где  $V(t)$  — напряжение от ДАЭ, зависящее от времени;  $T$  — длительность АЭ-импульса.

Параметр, рассчитываемый по формуле (1), также получил название MARSE (Measured Area of the Rectified Signal Envelope — измеренная площадь под огибающей сигнала). Допуская, что большая часть потенциальной энергии шарика преобразуется при его падении в энергию упругой волны, а также то, что возбуждаемые волны, возникающие при падении шарика, преобразуются датчиком в электрический сигнал аналогично волнам, формируемым реальными АЭ-источниками, считаем, что зависимость массы шарика будет пропорциональна величине параметра MARSE для акустической эмиссии [22].

В экспериментах использовались стальные шарики от подшипников качения из стали ШХ15. Массы шариков представлены в табл. 2. Свободное падение шарика 3 на металлическое основание 1 (пластину из дюралюминия марки Д16АТ толщиной 1 мм) осуществлялось с высоты 100 мм в область, расположенную на расстоянии  $\sim 100$  мм от закреплённого ДАЭ 2 (рис. 5, *a*).

Поскольку амплитуда сигнала, регистрируемого датчиком, была изначально достаточно высокой, его подключали к плате сбора данных без использования блока ШМУ (см. рис. 1, *a*). Каждый шарик бросали не менее 30 раз. Типичный сигнал, зарегистрированный с помощью созданного стенда акустической эмиссии, и его фурье-спектр приведены на рис. 5, *b, c*. Результаты расчёта энергии отражены на рис. 5, *d*.

Таблица 2

**Характеристики стальных шариков  
и энергии спектра упругой волны, вызываемой их падением**

№ п/п	Диаметр шарика, мм	Масса шарика, г	Относительная энергия
1	3,0	0,110	$6,64 \cdot 10^6$
2	4,0	0,263	$1,27 \cdot 10^7$
3	5,0	0,440	$1,80 \cdot 10^7$
4	5,5	0,698	$2,84 \cdot 10^7$
5	8,0	2,029	$8,02 \cdot 10^7$
6	9,5	3,535	$1,24 \cdot 10^8$

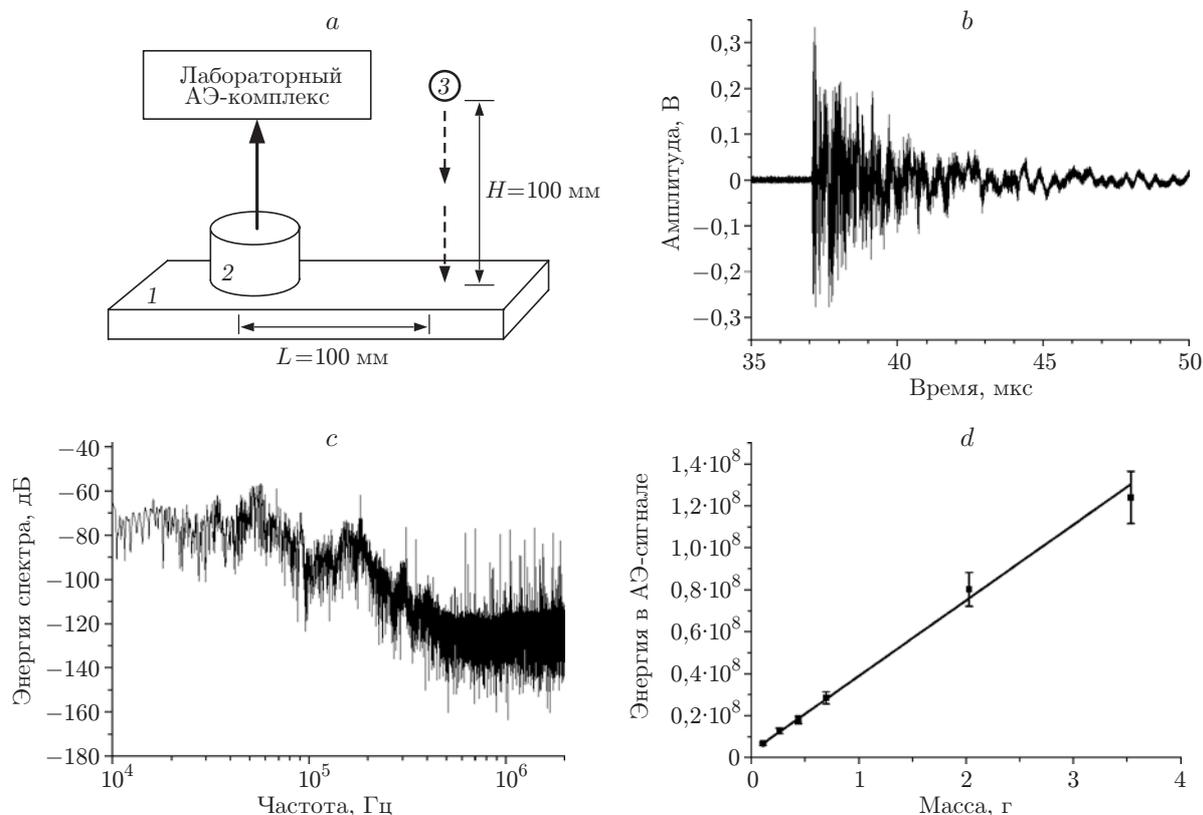


Рис. 5. Эксперимент со свободным падением шарика: схема проведения эксперимента (a); характерный сигнал, возникающий при падении шарика массой 3 г, (b) и его спектр (c); зависимость массы падающего шарика от полной энергии спектра АЭ-сигнала (d)

Анализ полученных данных показал, что энергия сигнала (упругой волны), возбуждаемая при падении стального шарика на пластину, изменяется линейно с возрастанием массы шарика (см. рис. 5, d). Таким образом, здесь не просто применён уже известный способ калибровки ДАЭ, но и представлена линейная зависимость между энергией спектра и массой шарика, что позволит в дальнейшем использовать данную методику в качестве экспресс-метода калибровки прибора перед началом проведения измерений.

2.4. *Регистрация АЭ-сигналов при деформации образцов с хрупким покрытием.* Для неразрушающего контроля в качестве одного из вариантов изготовления тестовых образцов рекомендуется проводить азотирование стальных образцов при известных параметрах химико-термической обработки [23]. В результате нагружения, например вдавливанием шарика, в таких образцах формируется система трещин известной глубины, и для метода проникающих веществ подобный образец рекомендовано использовать в качестве эталона. В данной работе применялось азотирование в плазме тлеющего разряда для формирования на поверхности стальных образцов упрочнённых слоёв различной толщины. В подобной постановке можно путём металлографического анализа оценить количество сформировавшихся в деформированном образце трещин и сравнить их с количеством АЭ-сигналов, имеющих повышенный уровень амплитуды. Таким образом, помимо самой цели калибровки стенда регистрации акустической эмиссии можно получить информацию, важную при последующей идентификации сигналов, относящихся к процессам деформации либо разрушения [24].

Для проведения эксперимента были изготовлены образцы из стали 20Х13, которые азотировали с длительностью выдержки 30 и 120 мин, при этом расчётная толщина азотированного слоя составила 5 и 50 мкм соответственно. Размер образцов  $60 \times 18 \times 1,5$  мм. Образцы испытывали на трёхточечный изгиб с помощью установки Instron 5582. Расстояние между неподвижными балками 30 мм [25].

Электронно-микроскопические изображения азотированной поверхности при деформации обоих образцов с хрупким покрытием представлены на рис. 6, *a, b*. Видно, что в результате нагружения в толстом упрочнённом поверхностном слое сформировались трещины, глубина которых примерно равна его толщине (см. рис. 6, *b*). Данные по скорости счёта АЭ-сигналов (полученные с помощью БНЧА, см. рис. 1, *a*) для образцов обоих типов показаны на рис. 6, *c, d*. Для образцов с малой толщиной азотированного слоя (см. рис. 6, *a*) величина интенсивности акустической эмиссии не превышала значения  $2 \text{ с}^{-1}$  (см. рис. 6, *c*). Общее количество сигналов, зарегистрированных за всё время эксперимен-

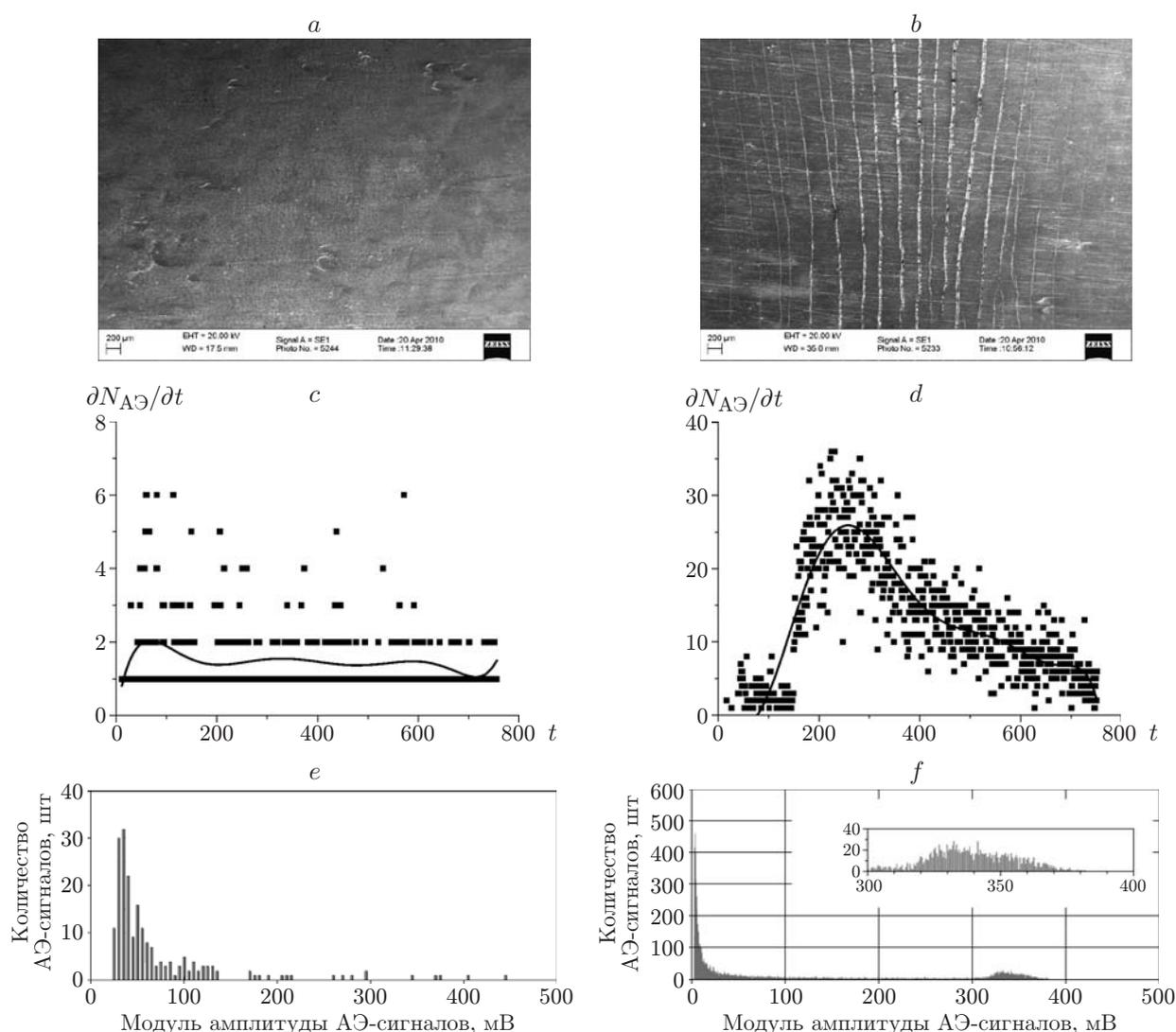


Рис. 6. Изображения азотированной поверхности образцов, полученные растровым электронным микроскопом, после испытаний: слой 5 мкм (*a*) и слой 50 мкм (*b*); график скорости счёта АЭ-импульсов в зависимости от времени нагружения (*c, d*); гистограммы распределения амплитуды в АЭ-сигналах для образцов с тонким и толстым слоем (*e, f*)

та, составляло порядка 350. Для образцов с азотированным слоем 50 мкм (см. рис. 6, *b*) общее количество зарегистрированных АЭ-сигналов было порядка 6000 (см. рис. 6, *d*).

С использованием БСА (см. рис. 1, *a*) проведён анализ распределения сигналов по амплитуде. Полученные результаты показали, что для образцов с толстым азотированным слоем присутствует значительное количество АЭ-импульсов с амплитудой в диапазоне 3–4 В, что согласно большинству литературных данных, а также исследованиям авторов [24], должно относиться именно к формированию трещин. В то же время для образца с тонким азотированным слоем, где формирование трещин металлографически не выявлялось (см. рис. 6, *b*), помимо существенно меньшего количества зарегистрированных АЭ-импульсов среди последних не удалось выявить ни одного, имеющего амплитуду более 500 мВ (см. рис. 6, *f*).

Используемый в данном эксперименте подход принципиально новым назвать нельзя. Для идентификации источников акустической эмиссии используются подходы, основанные на классификации по критериям амплитуды и частоты источников типа дислокационных: двойникование, микрорастрескивание, макротрещина и т. д. [24]. Однако в предлагаемой работе не ставилась задача провести глубокое физическое исследование. Кроме того, показано, что количество макротрещин не идентично числу АЭ-сигналов с максимальной амплитудой (энергией). Это связано с тем, что развитию сплошной поперечной трещины соответствует генерация нескольких десятков мощных АЭ-импульсов, поскольку процесс раскрытия трещины идёт по всей ширине образца.

**Заключение.** В представленной работе решены две практические задачи. На основе доступных на рынке радиоэлектронных компонентов и датчиков и с использованием блока усиления авторской разработки спроектирован и создан лабораторный стенд для регистрации и анализа данных акустической эмиссии с минимальной регистрируемой амплитудой входного сигнала 30 мкВ. С помощью созданного авторами программного обеспечения и известных способов генерации модельных АЭ-сигналов проведено тестирование стенда.

В рамках разработки ПО реализованы традиционные блоки предварительной и пост-обработки сигналов, а также применяемые в АЭ-методе регистрация накопления событий и спектральный анализ каждого сигнала в отдельности. Предложена структурная схема алгоритма выделения единичных событий акустической эмиссии.

Показано, что прохождение модельного сигнала сквозь пластину Д16АТ обуславливает заметное искажение переднего и заднего фронтов прямоугольного модулированного импульса при сохранении в нём основной (несущей) частоты. В этом случае энергии переданного и принятого сигналов различаются на 5 %. При распространении сигнала по пластине его форма существенно искажается, что в спектре проявляется в виде лишь одного выраженного максимума, соответствующего резонансной частоте ДАЭ. Изменение расстояния между излучателем и приёмником практически не отражается на изменении энергии указанного резонансного частотного пика.

Экспериментально подтверждено, что увеличение твёрдости грифеля карандаша, во-первых, приводит к возрастанию энергии акустического сигнала, эмитируемого при его разрушении, во-вторых, пропорционально повышению энергии сигнала, регистрируемого ДАЭ.

На основании измерения энергии упругой волны, возникающей при падении подшипникового шарика на пластину и зарегистрированной с помощью разработанного стенда, показано, что энергия спектра сигнала и масса падающего шарика связаны линейной зависимостью.

С использованием стенда и блоков ПО разделены АЭ-сигналы, вызванные формированием трещин в азотированном слое и пластической деформацией стальных образцов. Отмечено существенное различие в скорости счёта событий акустической эмиссии в процессе

трёхточечного изгиба образцов с разной толщиной хрупкого упрочнённого поверхностного слоя, испытывающего растрескивание.

Авторы выражают благодарность Б. Б. Овечкину (Национальный исследовательский Томский политехнический университет) за предоставленные азотированные образцы, изображения которых были получены с использованием растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 (Германия), находящегося в Центре коллективного пользования Института физики прочности и материаловедения СО РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов В. И., Белов В. М.** Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
2. **ЗАО «Специальные Диагностические Системы».** URL: <http://www.sds.ru> (дата обращения: 1.12.2010).
3. **Семашко Н. А., Башков О. В., Марьин Б. Н. и др.** Исследование процессов деформации и прогнозирование предельных характеристик материалов с использованием метода акустической эмиссии // Сб. тр. Межрегион. конф. Хабаровск: КнААПО, 2001. С. 110–116.
4. **Никитин Е. С., Шубин Б. В., Лунев А. Г.** Прибор акустико-эмиссионной диагностики // Науч. сессия ТУСУР-2007. Томск: Изд-во «В-Спектр», 2007. Ч. 4. С. 20–23.
5. **Бунина Н. А.** Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. 156 с.
6. **Грешников В. А., Дробот Ю. Б.** Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976. 272 с.
7. **Bashkov O., Panin S., Semashko N., Shpak D.** A method for locating acoustic emission signal sources by a single sensor // Proc. of the 19th Intern. Acoustic Emission Symp. (IAES-19). Kyoto University, Japan, 9–12 December, 2008. P. 12–18.
8. **Муравин Г. Б., Симкин Я. В., Мерман А. И.** Идентификация механизмов разрушения материалов методами спектрального анализа сигналов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1989. № 4. С. 8–15.
9. **Новиков Н. В., Филоненко С. Ф., Городовский Н. И., Бирюков В. С.** К критерию определения источника сигналов АЭ при нагружении материалов // Сверхтвердые материалы. 1987. № 2. С. 42–45.
10. **Nakamura Y., Veach C. L., McCauley V. O.** Amplitude distribution of acoustic emission signals // Acoustic Emission — STP 505. Baltimore, USA, 1972. P. 164–186.
11. **Vallen Systeme GmbH Vallen.** AMSY-5: New High-Speed AE System. URL: <http://www.vallen.de> (дата обращения: 1.08.2010).
12. **Смирнов Е. Г.** Акустическая эмиссия // Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка. М.: ВИНТИ, 1981. Т. 15. С. 111–159.
13. **Панин С. В., Башков О. В., Семашко Н. А. и др.** Комбинированное исследование особенностей деформации плоских образцов и образцов с надрезом на микро- и мезоуровнях методами акустической эмиссии и построения карт деформации поверхности // Физ. мезомех. 2004. 7, № Спец2. С. 303–306.
14. **Панин С. В., Бяков А. В., Гренке В. В. и др.** Многомасштабное исследование стадийности локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ с надрезами акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами // Физ. мезомех. 2009. 12, № 6. С. 63–72.
15. **ГОСТ 27655-88.** Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. Введ. 01.01.1989. М.: Изд-во стандартов, 1988. 11 с.

16. **ООО «ГлобалТест»**. URL: <http://www.globaltest.ru> (дата обращения: 1.12.2010).
17. **Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И.** Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля /Под ред. В. В. Сухорукова. М.: Высш. шк., 1991. 283 с.
18. **Dunegan H. L.** An alternative to pencil lead breaks for simulation of acoustic emission signal sources. The DECI Rep. 2000. URL: <http://www.deci.com/report008.pdf> (дата обращения: 1.12.2010).
19. **ASTM E1106-07.** Standard test method for primary calibration of acoustic emission sensors. Philadelphia, USA: ASTM.
20. **ASTM E976-10.** Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response. Philadelphia, USA: ASTM.
21. **Pat. 4018084 US.** Acoustic emission simulator /N. N. Hsu. Publ. May 1976.
22. **Yan T., Jones B. E.** Traceability of acoustic emission measurements using energy calibration methods // Meas. Sci. Technol. 2000. **11**, N 11. P. L9–L12.
23. **Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Филинов В. Н. и др.** Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник /Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.
24. **Башков О. В., Панин С. В., Семашко Н. А. и др.** Идентификация источников акустической эмиссии при деформации и разрушении стали 12X18H10T // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. **75**, № 10. С. 51–57.
25. **ГОСТ 14019-2003.** Материалы металлические. Метод испытания на изгиб. М.: Изд-во стандартов, 2004.

*Поступила в редакцию 16 июня 2010 г.*

---