

УДК 620.179.17

С. А. Бехер, д-р техн. наук, проф.

А. А. Попков, науч. сотрудник

E-mail: beher@stu.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Использование ударного нагружения при контроле хрупких объектов методом акустической эмиссии

В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований с использованием ударного нагружения стеклянных объектов методом акустической эмиссии. Предложена схема эксперимента, позволяющая проводить однократное ударное воздействие и демпфирование упругих колебаний контролируемого объекта. Установлено, что релаксация упругих напряжений в области трещины после удара удовлетворительно описывается логарифмической зависимостью. Предложен способ разделения общего потока сигналов на стационарные группы по временным интервалам между сигналами и идентификации механизмов формирования упругих колебаний.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, ударное нагружение, кластеризация сигналов, трещина, стекло.

Введение

На сегодняшний день одним из актуальных направлений при проектировании и производстве элементов конструкции является снижение их массы, которое предполагает использование материалов высокой прочности и меньшей плотности, например высокопрочные стали и сплавы, композиционные материалы и конструкционные керамики. Для таких материалов характерен высокий удельный предел прочности при механических нагрузках, но склонность к разрушениям хрупкого типа, чувствительность к ударам и высокая скорость развития усталостных дефектов существенно ограничивают их применимость [1]. Поэтому актуальной задачей является разработка методов неразрушающего контроля, которые способны обнаруживать дефекты, развивающиеся без заметной пластической деформации, на ранних стадиях, в том числе при воздействии ударных нагрузок [2].

Для раннего обнаружения дефектов и оценки скорости их развития перспективно использовать метод акустической эмиссии (АЭ). Однако для обнаружения дефектов, которые развиваются без заметной пластической деформации и при ударных воздействиях, метод АЭ требует со-

вершенствования и разработки методического, алгоритмического и программного обеспечения диагностических комплексов [3, 4].

Постановка задачи и описание эксперимента

Напряженно-деформированное состояние объекта является необходимым условием для возможности его диагностирования методом АЭ. Для объектов, режим эксплуатации которых предполагает наличие нестационарных вибрационных или температурных нагрузок, нагружение стандартными методами (давление, пневматические или гидравлические испытания) может не дать достоверного результата, а для прочных и хрупких объектов часто приводит к быстрому и неконтролируемому разрушению [5]. Ударное нагружение позволяет локально воспроизводить высокий уровень механических напряжений и является перспективным при АЭ-контроле объектов, дефекты в которых развиваются без заметных пластических деформаций.

Для проведения экспериментальных исследований в качестве контролируемых объектов использовались листы из силикатного стекла размерами 200×300 мм и толщиной 2 мм, на длинной кромке которых создавалась трещина длиной 10–15 мм (рис. 1).

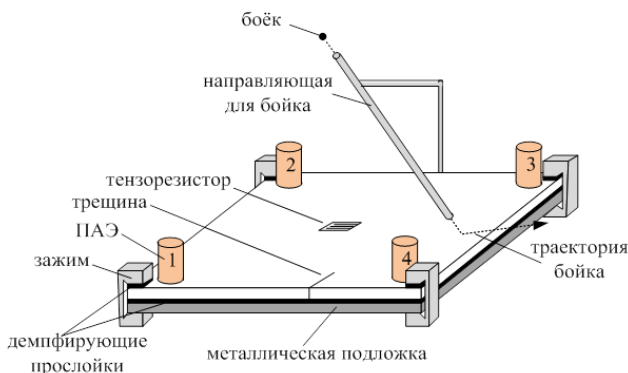


Рис. 1. Экспериментальная установка для ударного воздействия на стеклянный объект

Так же экспериментальным исследованиям подвергались листы без видимых дефектов. Стеклянные листы фиксировались на металлической подложке толщиной 2 мм с помощью зажимов по углам листа. Между рабочей поверхностью зажимов и поверхностью листа, а также между листом и металлической подложкой располагались демпфирующие

щие прокладки. На расстоянии 10 мм от краев листа устанавливались четыре преобразователя АЭ в виде прямоугольной акустической антенны. Для измерения напряжено-деформированного состояния в центр листа перпендикулярно направлению роста трещины наклеивался проволоочный тензорезистор типа ПКС-12-200, который подключался к измерительной системе по одиночной схеме.

Нагружение осуществлялось ударами стальными шариками (бойками) диаметром 12 мм и массой 7 г, падающими с высоты 0,2–0,7 м. Нагружение ударом шарика меньшей массы не инициировало событий акустической эмиссии. Масса стального шарика выбиралась экспериментально: использование более тяжелого шарика вызывало разрушение стеклянного образца и мгновенный рост трещины. Для создания направленного удара применялась алюминиевая трубка, ориентированная под углом 40–60° к поверхности образца. Место и направление удара выбирались таким образом, чтобы не допустить повторного воздействия бойка на стекло. Экспериментальные исследования по динамическому воздействию на хрупкие образцы без видимых дефектов показали, что единственным источником сигналов акустической эмиссии является место соударения стального бойка и стеклянного образца. Использование пьезоантенны из четырех преобразователей позволило осуществлять локацию источников акустической эмиссии и проводить предварительную фильтрацию сигналов по месту их возникновения (удар стального шарика, рост трещины, трение зажимов).

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных экспериментов установлено, что зависимость относительных деформаций на берегах трещины от времени является логарифмической (рис. 2, а). Для наглядности и обоснования логарифмической зависимости график построен в полулогарифмическом масштабе [7]. Коэффициент корреляции деформаций и логарифма времени на участке релаксации напряжений составляет 0,98. В момент удара деформации увеличиваются до 50 млн^{-1} . После этого в течение 4 мс регистрируются колебания с частотой 1,6 кГц и монотонно убывающей амплитудой [6].

На зависимости числа сигналов от времени, построенной в полулогарифмическом масштабе, выделяются две области (рис. 2, б). Время отсчитывается от сигнала, вызванного ударом, который на графике не представлен. Непрерывные сигналы – «хвосты» – представляют собой монотонно затухающие колебания, возбужденные ударом. Эти сигналы регистрируются в течение 30 мс, после чего обнаруживаются дискретные сигналы АЭ. Зависимость их числа от времени аппроксимирована

логарифмической зависимостью с коэффициентом корреляции 0,94. Значение коэффициента корреляции меньше 0,99 связано с наличием излома зависимости на интервале времени 0,2–0,4 с.

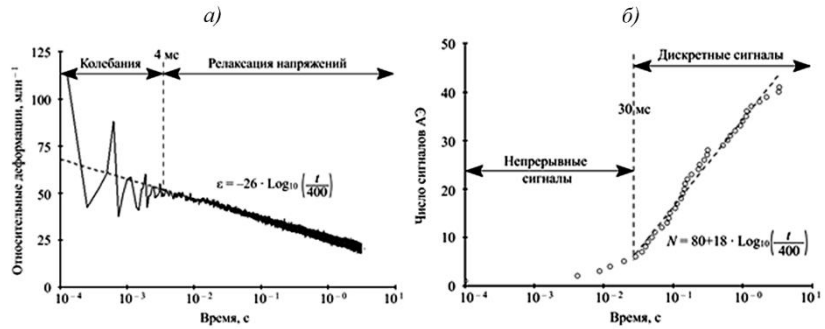


Рис. 2. Зависимость относительных деформаций образца (а) и числа сигналов АЭ (б) от времени при одном ударе в полулогарифмическом масштабе времени и результат аппроксимации

В ходе работы установлено, что в общем потоке АЭ идентифицируются группы сигналов, интервал времени между которыми существенно превышает среднее значение времени между сигналами в пределах группы. Для обнаружения границ групп сигналов предложено анализировать интервалы времени между сигналами (рис. 3).

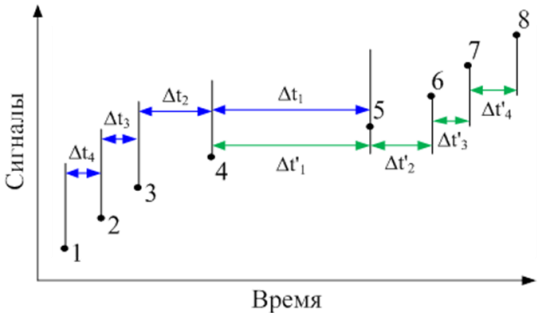


Рис. 3. Схема определения коэффициентов отношения временных интервалов при кластеризации по временной селекции

Текущий сигнал считается последним в группе, если временной интервал между текущим сигналом и следующим за ним превышает сред-

нее значение интервалов времени между несколькими последовательно зарегистрированными сигналами, предшествующими текущему. Аналогично текущий сигнал считается первым в группе, если временной интервал между текущим и предшествующим ему сигналами превышает среднее значение интервалов времени между несколькими последовательно зарегистрированными сигналами после текущего. По коэффициентам отношений временных интервалов можно определить вероятность признака начала или окончания обособленной группы [8].

Таким образом, временная селекция сигналов акустической эмиссии при ударном нагружении позволила идентифицировать три механизма формирования упругих колебаний (рис. 4). Первый механизм – упругие монотонно затухающие колебания, вызванные воздействием бойка на образец, регистрируемые в течение 0,025 с. Время затухания зависит от свойств материала основания, на котором расположен образец. Второй механизм связан с разрушением кромок концентратора и кромок трещины при ударном нагружении. Сигналы этой группы регистрируются на интервале времени 0,025–0,35 с. Последним механизмом акустической эмиссии является замедленное разрушение, а возникающие при этом сигналы регистрируются с 0,35-й секунды после удара и в течение более 400 с. Особенностью потока сигналов является логарифмическая зависимость суммарного счета от времени и нестационарность потока событий акустической эмиссии. Сигналы формируют идентифицируемые по времени регистрации группы, внутри которых распределение интервалов описывается экспоненциальным законом распределения.

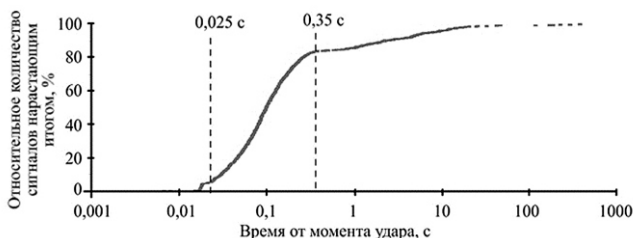


Рис. 4. Зависимость количества акустико-эмиссионных сигналов от времени регистрации относительно времени регистрации сигнала ударного воздействия

Выводы

Проведены экспериментальные исследования по динамическому нагружению объектов из силикатного стекла, в ходе которых регистрировались зависимости активности акустической эмиссии и относительных

деформаций контролируемого объекта от геометрических размеров растущей трещины. Выявлено, что после полного разрушения в течение некоторого времени регистрируются сигналы акустической эмиссии, предположительно вызванные смещением кромок трещины; что в течение времени $t = 6$ мс после ударного воздействия аппаратура не способна регистрировать сигналы акустической эмиссии. Установлено, что зависимость деформаций и суммарного счета акустической эмиссии от времени удовлетворительно описывается логарифмической функцией с коэффициентом корреляции более 0,94. Предложен метод разделения общего потока сигналов на независимые группы по временным интервалам между сигналами, которые характерны для различных источников акустической эмиссии.

Список литературы

1. Буйло, С. И. Диагностика предразрушающего состояния по амплитудным и временным инвариантам потока актов акустической эмиссии / С. И. Буйло // Дефектоскопия. – 2004. – № 8. – С. 79–83.
2. Муравьев, В. В. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона / В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, А. Е. Кареев // Дефектоскопия. – 2003. – № 1. – С. 63–68.
3. Муравьев, В. В. Оценка роста усталостных трещин в боковых рамах тележек грузовых вагонов акустико-эмиссионным методом / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 9. – С. 24–29.
4. Stepanova, L. N., Lebedev, E. Yu., Kareev, A. E., Chaplygin, V. N., Katarushkin, S. A. Use of the acoustic emission method in detecting the fracture process in specimens made of composite materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2004. Vol. 40. No. 7. С. 455–461.
5. Муравьев, В. В. Автоматизированные диагностические стенды для продления срока службы литых деталей вагонов / В. В. Муравьев // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. № 4(60). С. 98–102.
6. Бехер, С. А. Применение ударного нагружения для обнаружения трещин в стекле акустико-эмиссионным методом / С. А. Бехер, А. А. Попков // Дефектоскопия. – 2018. – № 11. – С. 3–8.
7. Исследование основных параметров сигналов акустической эмиссии при статических и циклических испытаниях образцов из стали 20ГЛ / Л. Н. Степанова, А. Л. Бобров, К. В. Канифадин, В. В. Чернова // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 6. – С. 41–45.
8. Пат. 2727316 Рос. Федерация, МПК G01N 29/14 (2006.01). Способ акустико-эмиссионного контроля конструкций / Бехер С. А., Бобров А. Л., Попков А. А. – № 2019145699 ; заявл. 31.12.2019 ; опубл. 21.07.2020. Бюл. № 21.

S. A. Bekher, DSc in engineering, professor

A. A. Popkov, researcher

E-mail: beher@stu.ru

Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

The Use of Shock Loading when Testing Fragile Objects by the Acoustic Emission Method

The article discusses the results of experimental studies using shock loading of glass objects by the method of acoustic emission. The scheme of the experiment is proposed, which allows to carry out a single shock action and damping of elastic vibrations of the controlled object. It was found that the relaxation of elastic stresses in the crack region after impact is satisfactorily described by the logarithmic dependence. A method is proposed for dividing the total signal flow into stationary groups by time intervals between signals and identifying mechanisms for the formation of elastic vibrations.

Keywords: acoustic emission, shock loading, signal clustering, crack, glass.