

Определение критериев контроля напряженно-деформированного состояния композитных материалов при ступенчатом нагружении

© В.П. Суржиков, П.И. Федотов, Н.Н. Хорсов

Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: horsov@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 22 апреля 2014 г.)

Проведено определение критериев контроля напряженно-деформированного состояния композитных материалов на основе эпоксидного клея с песчаным наполнителем методом, базирующимся на явлении механоэлектрических преобразований в диэлектрических материалах. При анализе экспериментальных результатов использован принцип синхронного детектирования. В качестве опорных сигналов использованы импульс отклика механоэлектрических преобразований при нагрузке, равной нулю, и акустический импульс, излучаемый пьезопреобразователем. Показано, что исключение малоинформативных временных интервалов из откликов приводит к квазилинейной зависимости значений выбранных критериев контроля от давления на объект исследований и повышению чувствительности выбранных критериев к величине действующей нагрузки.

Введение

Одним из приоритетных направлений материаловедения является разработка методов и осуществление неразрушающего контроля состояния конструкций, в частности, из композитных материалов. Разработано множество методов неразрушающего контроля, имеющих разную физическую основу [1].

Основными методами ультразвукового контроля являются: эхо-метод [2,3], импедансный и резонансный методы [4], метод акустической эмиссии [5], основанные на регистрации параметров упругих волн, возникающих или возбуждаемых в объекте.

Перспективной разработкой метода контроля дефектности и напряженно-деформированного состояния (НДС) является разработка метода, основанного на явлении механоэлектрических преобразований (МЭП) в диэлектрических материалах под действием импульсного механического возбуждения [6–8]. Суть метода заключается в следующем. В объекте исследования возбуждается акустическая волна, которая, распространяясь по материалу, отражается от границ и претерпевает искажения, связанные с его внутренней дефектностью и неоднородностью, воздействует на источники МЭП. При этом возникает переменное электромагнитное поле, которое можно регистрировать по электрической или магнитной составляющей. Источниками МЭП в диэлектрических материалах могут быть двойные электрические слои на границе раздела разнородных материалов, дефекты разного рода в виде, например, пор, трещин, локальные градиенты плотности материала в условиях напряженно-деформированного состояния, включения с пьезоэлектрическими свойствами.

1. Материалы и методика эксперимента

Описание методики измерений приведено в работах [9,10]. Эксперименты проводились на образцах из эпоксидной смолы размером $60.5 \times 78 \times 87.5$ mm с песчаным наполнителем. Измеренная скорость распространения продольных волн в этих образцах составила 2420 m/s. Скорость поперечных волн при коэффициенте Пуассона 0.4 равна 1475 m/s. Источником ультразвуковых колебаний служил пьезопреобразователь на основе керамики ЦТС 19, который располагался на грани образца размером 60×87.5 mm. Электрический отклик регистрировался емкостным датчиком, установленным параллельно грани образца размером 87.5×78 mm на расстоянии 1 mm от поверхности. Образцы подвергались одноосному сжатию со стороны

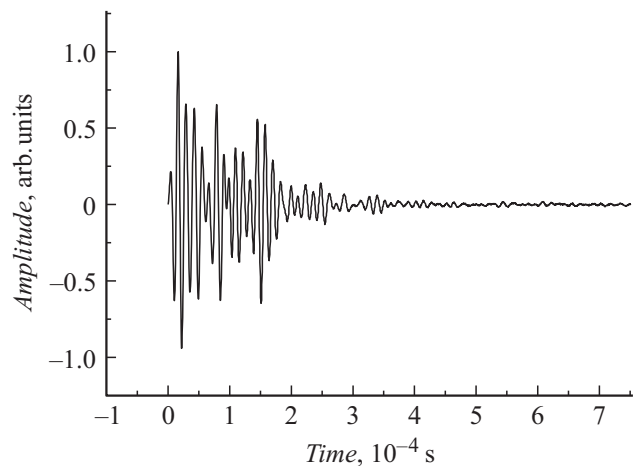


Рис. 1. Отклик МЭП.

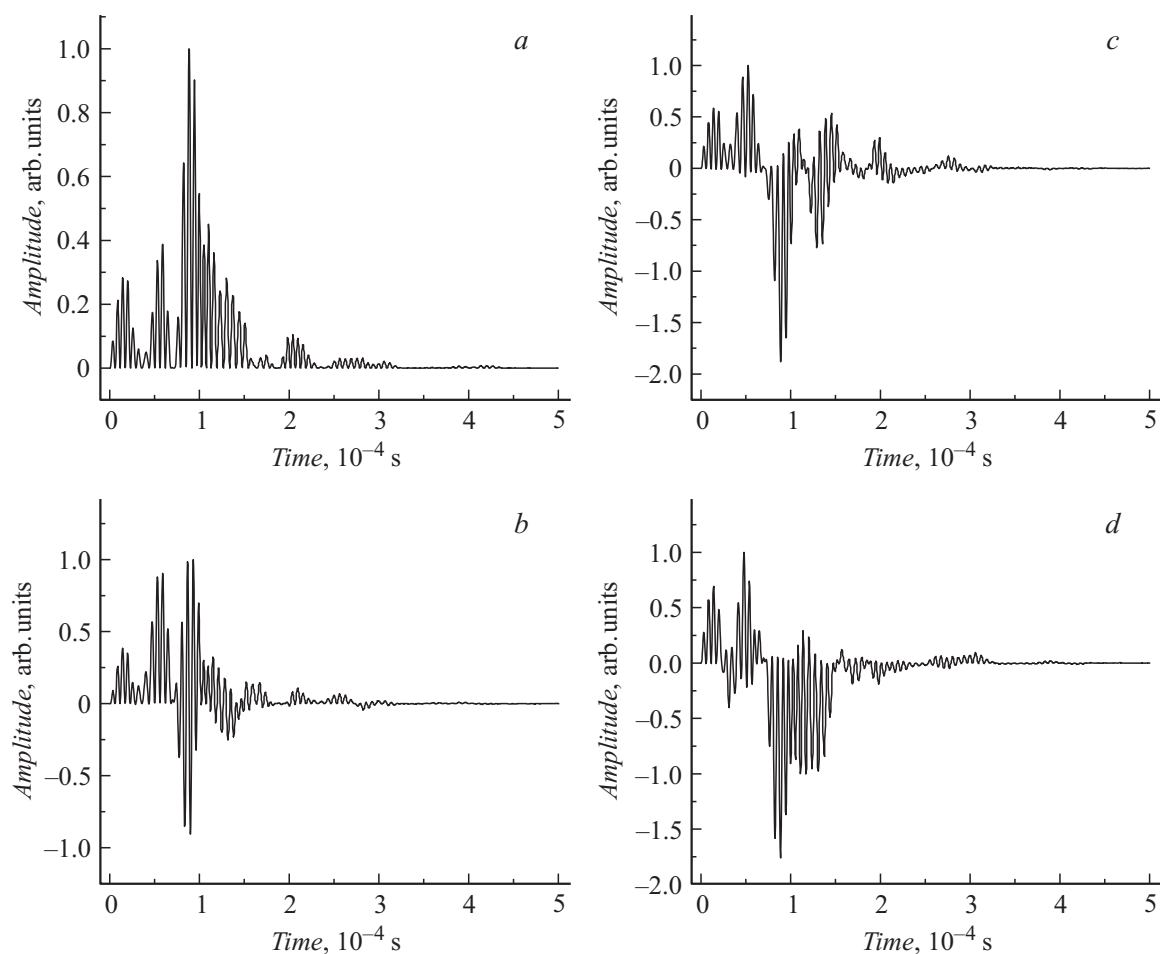


Рис. 2. Результат перемножения опорного сигнала на самого себя (*a*) и на импульсы откликов МЭП при 30 МПа (*b*), 69 МПа (*c*) и 87 МПа (*d*).

границы образца размером 60×78 mm на испытательной машине МИС — 500 К. Нагрузка осуществлялась через войлочные прокладки и увеличивалась от 0 кН вплоть до разрушения ступенчато с шагом 20 кН. В экспериментах при каждом фиксированном значении нагрузки с помощью платы сбора информации NI PCI-6133 регистрировалась временная реализация откликов от источников МЭП при их активации 140 акустическими импульсами, следующих с периодом 7 мс. Частоты спектра акустического импульса располагаются в диапазоне от 50 кН до 125 кН [11]. При последующем анализе использовались отклики, усредненные по всей временной реализации. Дисперсия в экспериментах не превышала 5%.

2. Результаты исследований и их обсуждение

Типичный вид отклика представлен на рис. 1. Для получения амплитудно-частотных характеристик применялось быстрое преобразование Фурье.

Проведение анализа базировалось на двух основных положениях:

а) использовался принцип синхронного детектирования в программе, а именно, свойство результата перемножения двух колебаний при разностной частоте, равной нулю, отражать уровень совпадения этих двух колебаний;

б) объект исследования рассматривался в качестве модулятора исходного, опорного колебания.

Анализ проводился для двух вариантов.

Вариант первый, где в качестве опорного сигнала использовался импульс отклика МЭП при нагрузке, равной нулю A_0 .

На рис. 2 показан результат перемножения опорного сигнала на самого себя и на импульсы откликов МЭП при 30, 69 и 87 МПа. Видно, что с увеличением давления происходит закономерное изменение результирующего колебания от полностью положительной полярности к преимущественно отрицательной. Причем, наиболее существенные изменения начинаются на $72 \mu\text{s}$ от начала импульса, что сравнимо со временем прохождения продольной волной расстояния, равного удвоенной высоте

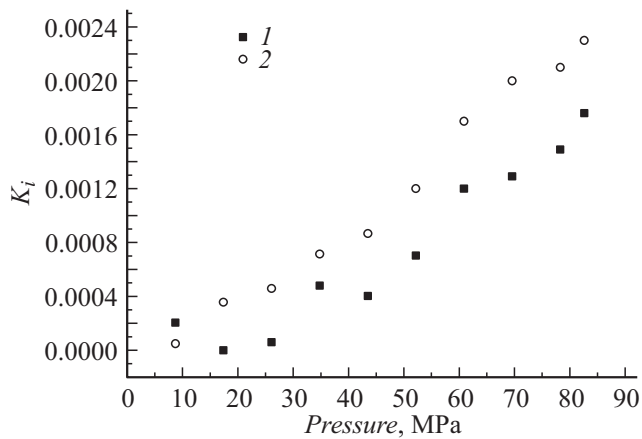


Рис. 3. Зависимость K_i от давления: 1 — K_i для полных откликов МЭП, 2 — K_i для откликов МЭП без начального участка в $72 \mu s$.

образца. Таким образом, определен интервал времени, в течение которого в отклике МЭП не происходит существенного отражения результата внешнего воздействия на объект исследования.

Наиболее оптимальной величиной, выбранной в качестве критерия контроля изменений, происходящих в объекте под действием нагрузок, было определено значение амплитуды при частоте равной нулю, K_i амплитудно-частотной характеристики функции $R_i = A_0 A_i - A_0 A_0$. A_0 — отклик МЭП при нагрузке, равной нулю. A_i — отклик МЭП для текущей нагрузки i .

На рис. 3 представлены зависимости K_i от давления. Зависимость 1 отражает ситуацию, когда для построения R_i использовались полные отклики МЭП. Зависимость 2 показывает изменение K_i от давления, когда для построения R_i использовались отклики МЭП, начинающиеся с $72 \mu s$. Как видно из рис. 3, удаление в отклике неинформативного интервала, позволяет значительно снизить разброс в значениях K_i , особенно при низких уровнях нагрузки.

Вариант второй, когда в качестве опорного сигнала использовался акустический импульс A_c , излучаемый пьезопреобразователем. Критерием контроля изменений, происходящих в объекте под действием нагрузок, было определено значение амплитуды при частоте, равной нулю, K_c амплитудно-частотной характеристики функции $R_c = A_c A_i - A_c A_c$.

В этом варианте, как и в приведенном выше, для построения R_c использовались отклики МЭП без сокращения длительности и укороченные отклики МЭП, в которых участки от начала отклика до некоторого времени t_n исключались. Длительности удаленных интервалов определялись следующим образом. Из графиков функции R_c , закономерность поведения которых при разных нагрузках аналогична закономерности, показанной на рис. 2, найдено, что с $72 \mu s$ от начала импульса начинаются существенные изменения. Как отмечалось выше,

это время равно периоду первой гармоники собственных колебаний, определяемой удвоенной высотой образца и скоростью распространения продольной волны.

Исходя из этого результата были также исключены интервалы t_n длительностью 25 и $50 \mu s$, равные периодам первой и второй гармоник колебаний, определяемых толщиной образца и скоростью распространения продольной волны в образце.

Действенность этих процедур на оптимизацию чувствительности выбранного критерия к прикладываемым нагрузкам демонстрируют рис. 4 и рис. 5.

На рис. 4 показаны нормированные на максимальные значения зависимости от давления результатов интегрирования функции для $R_c < 0$ при $t_n = 0$ (1), 25 (2), 50 (3), $72 \mu s$ (4). Наиболее оптимальны зависимости 3 и 4. На рис. 5 представлены нормированные на максимальное значение зависимости K_c от давления для $t_n = 0$ и $72 \mu s$.

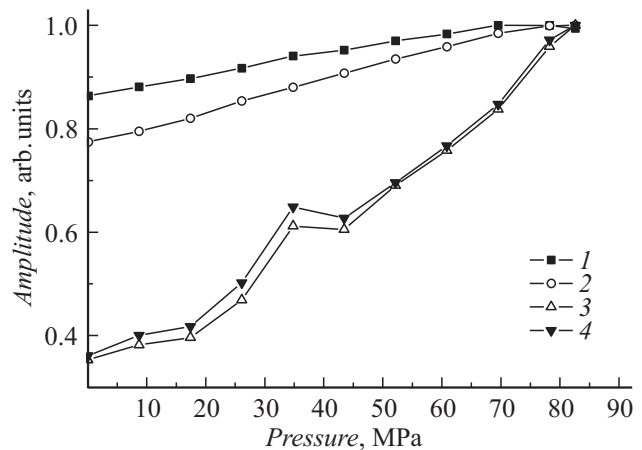


Рис. 4. Нормированные на максимальное значение зависимости от давления результатов интегрирования функции для $R_c < 0$ при $t_n = 0$ (1), 25 (2), 50 (3), $72 \mu s$ (4).

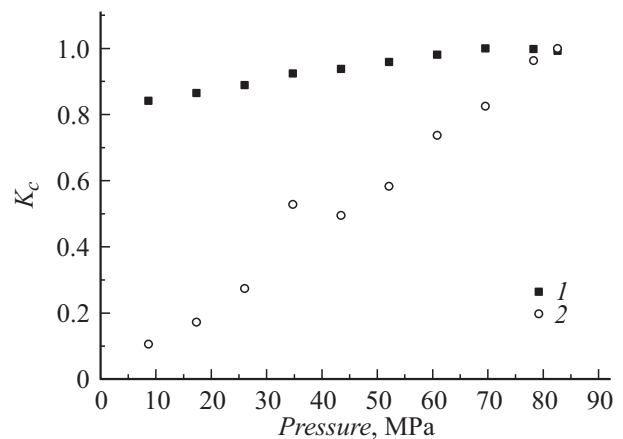


Рис. 5. Зависимость K_c от давления: 1 — K_c для полных откликов МЭП, 2 — K_c для откликов МЭП, начинающихся с $72 \mu s$.

Видно, что исключение малоинформативных временных интервалов на откликах МЭП при проведении анализа позволяет существенно увеличить чувствительность выбранного критерия к изменению внешних нагрузок.

Заключение

Таким образом, предлагаемый вариант анализа экспериментальных результатов позволяет получать эффективные критерии контроля НДС композитных диэлектрических материалов. Разброс в значениях K_i и K_c определяется, скорее всего, динамикой случайно по времени и месту возникшим зонам перенапряжений и дефектов структуры.

Работа выполнена в рамках государственного задания „Наука“.

Список литературы

- [1] Неразрушающий контроль. Россия 1999–2000 г. Справочник / Под ред. В.В. Клюева. Машиностроение. 2001. 616 с.
- [2] *Защук И.В.* Электроника и акустические методы испытания строительных материалов. М.: Высшая школа, 1967. 246 с.
- [3] Энциклопедия полимеров. Т. 3. М.: Советская энциклопедия, 1977. 1150 с.
- [4] Научно-технический прогресс в машиностроении. Вып. 30: Вилков А.Б. Физические аспекты акустического контроля / Под ред. К.В. Фролова. М.: 1992. 268 с.
- [5] *Dinegan H.L., Harris D.O.* // *Ultrasonics*. 1969. Vol. 7. N 3. P. 380–385.
- [6] *Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батурич Е.А.* // *ЖТФ*. 1999. Т. 26. Вып. 6. С. 36–40.
- [7] *Суржиков А.П., Фурса Т.В.* // *ЖТФ*. 2008. Вып. 4. Т. 78. С. 71–76.
- [8] *Фурса Т.В., Суржиков А.П., Хорсов Н.Н., Осипов К.Ю.* // *ЖТФ*. 2006. Вып. 4. Т. 76. С. 129–132.
- [9] *Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н.* // *Дефектоскопия*. 2013. № 11. С. 67–71.
- [10] *Суржиков В.П., Хорсов Н.Н.* // *Дефектоскопия*. 2011. № 10. С. 50–54.
- [11] *Суржиков В.П., Хорсов Н.Н., Хорсов П.Н.* *Вестник науки Сибири*. 2011. № 1. (1). С. 187–192. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/43/72>.