УДК 678.017: 620.17

Т.М.Черникова, В.В. Иванов

О РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В настоящее время особую актуальность приобретают исследования, направленные на разработку и внедрение современных систем контроля разрушения материалов, поскольку эксплуатация реальных объектов народного хозяйства должна предусматривать возможность оперативного контроля их состояния с целью безопасности труда в различных отраслях промышленности. Особенно большое значение имеет возможность контроля разрушения и прогнозирования долговечности композиционных материалов, так как в настоящее время композиты широко применяются в различных отраслях производства.

Проведенный аналитический обзор показал, что в качестве одного из методов для контроля над процессом разрушения материалов является метод импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) [1]. Возможности использования метода ЭМИ для оценки прочностных характеристик композиционных материалов базируются на существовании связей между ними с одной стороны и параметрами импульсного ЭМИ - с другой.

Композиционные материалы, как и другие твердые тела, в процессе деформирования излучают электромагнитные сигналы, источником которых служат электрические процессы, возникающие при образовании трещин [2]. Это явление нашло применение при контроле процесса разрушения и определении долговечности композиционных материалов [3-6].

Разрушение – процесс, развивающийся во времени, в основе которого лежит статистическое накопление и развитие трещин. Регистрация электромагнитной эмиссии позволяет следить за накоплением числа трещин и оценивать их размеры, скорость распространения, энергию активации разрушения, структурно-чувствительный коэффициент, т.е. имеется возможность непрерывно регистрировать процесс разрушения. В соответствии с кинетической моделью разрушения композиционных материалов [6] в качестве параметра, позволяющего контролировать стадии процесса разрушения можно использовать энергию активации разрушения U_0 и структурно-чувствительный коэффициент γ, которые изменяют свои значения при формировании очага разрушения, обусловленного развитием трещин в материале. Таким образом, выявление функциональной зависимости $\gamma = f(\sigma)$, $U_0 = f(\sigma)$ с одновременной оценкой ресурса долговечности и позволяет контролировать переход разрушения на конечную стадию (σ – механическое напряжение).

В нашей лаборатории проведены исследования, направленные на разработку автоматизированной системы контроля процесса разрушения композитов на основе анализа электромагнитного излучения.

Используя результаты теоретического и экспериментального исследования ЭМИ при разрушении композитов [4-8], для регистрации электромагнитного излучения, возникающего в образце под действием механической нагрузки, была разработана система контроля разрушения композитов на базе персонального компьютера (ПК). Система предназначена для диагностики, мониторинга и контроля разрушения композиционных материалов и изделий из них.

В соответствии с поставленной задачей был проведен анализ литературных источников, посвященных измерению ЭМИ, учтены особенности нагружающей установки и чувствительного элемента (антенны), оценены условия проведения эксперимента для выявления возможных источников помех. Исследования, проведенные при помощи лабораторной установки, позволили оценить характеристики измеряемых процессов.

Основными характеристиками системы являются: 1) частота дискретизации; 2) разрешающая способность; 3) количество одновременно опрашиваемых каналов; 4) наличие программируемых (настраиваемых) усилителей; 5) пиковая производительность; 6) наличие дискретных входов/выходов; 7) возможность внешнего запуска процесса преобразования; 8) доступность средств программирования измерительной платформы.

Частота дискретизации, разрешающая способность и количество каналов непосредственно определяют вычислительную производительность и должны быть оценены в первую очередь. В процессе разрушения образца частота и амплитуда ЭМИ не остаются постоянными и существенно изменяются в зависимости от стадии нагрузки. На первой стадии возникает большое количество мелких трещин, что вызывает ЭМИ с малой амплитудой и высокой частотой. При достижении критической концентрации трещин происходит их слияние и появление более крупных трещин, излучающих низкочастотные электромагнитные импульсы с более высокой амплитудой. На основании такой качественной картины можно видеть, что большое количество информации о процессе разрушения сконцентрировано на начальной стадии нагружения, но для ее регистрации необходимо оборудование с высокой частотой дискретизации и предварительным усилением. В работах [6-

9] даются следующие верхние оценки частоты дискретизации: 500 кГц – 20 МГц. При этом амплитуда напряжения полностью определяется типом композита, чувствительностью датчика и зарядовым состоянием трещины.

На основе анализа литературных источников и экспериментальных данных были сформулированы основные принципы построения системы контроля разрушения композитов.

1. Мониторинг зоны очага разрушения необходимо начинать с самых ранних стадий процесса нагружения.

2. Рекомендуемый частотный диапазон приема сигналов составляет 50Гц – 10 МГц в целях минимального искажения импульсов радиоизлучения. При этом прием сигналов узкополосными устройствами не рекомендуется вследствие «ухода» частоты на завершающей стадии процесса разрушения.

3. Фильтрацию полезного сигнала рекомендуется осуществлять программными средствами на основе анализа формы импульса, его амплитуды и длительности в соответствии со спектральной теорией [7].

4. Полное число трещин в контролируемом образце определяется в реальном масштабе времени и передается в память ПК (на основе определения их числа в зонах чувствительности датчиков (антенны)).

Первоначально, для оценки требуемого значения частоты дискретизации были использованы две измерительные схемы счетчика импульсов на базе микроконтроллерной платформы Freeduino и при помощи лабораторной платы АЦП L-card E14-440.

Пользовательская микропрограмма может выполнять следующие функции: 1) за фиксированное время суммируются импульсы, амплитуда которых превысит заданный порог срабатывания компаратора; 2) осуществляется передача переменной счетчика на персональный компьютер. Со стороны ПК полученные данные сохраняются в текстовый файл. Испытания счетчика на стенде показали его работоспособность на тестовом синусоидальном сигнале 20 мВ, с максимальной частотой 60 кГц.

Результаты опробования макета системы со счетчиком импульсов на базе микроконтроллерной платформы Freeduino и при помощи лабораторной платы АЦП L-card E14-440 показали, что импульсы ЭМИ регистрируются только при разрушении образцов. Характерных импульсов, связанных с накоплением микротрещин до разрушения, зарегистрировать не удалось. Данное обстоятельство было учтено при дальнейшем выборе параметров оборудования и были использованы другие платы АЦП. Необходимые характеристики оборудования представлены в табл. 1.

Таблица 1.Требования к техническим характеристикам измерительной системы

Количество каналов	не менее 2
Разрядность	не менее 12
Частота дискретизации	не менее 5 МГц
Входное сопротивление	не менее 1 МОм
Коэффициент усиления	не менее 10
Интерфейс с ПК	не имеет значения
Синхронизация	по фронту аналогового сигнала
Наличие в архитектуре программируемых счетчиков	желательно
Наличие открытых библиотек и средств разработки	необходимо

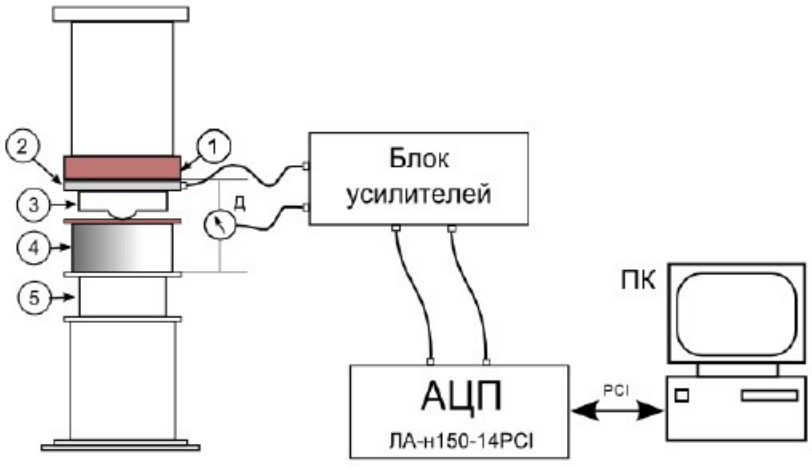

Рис. 1. Структурная схема системы на базе ЛА-н150-14PCI: 1 — диэлектрик; 2 — антенна; 3 — индентор; 4 — нагружаемый образец; 5 — поршень; Д – датчик, измеряющий механические усилия со стороны поршня.

Таблица 2.Технические характеристики ЛА-н150-14PCI и PicoScope 4224

Характеристика	ЛА-н150-14PCI	PicoScope 4224
Количество аналоговых каналов	2	2
Разрядность	14	12
Частота дискретизации	10 МГц	80 МГц
Входное сопротивление	1 Мом	1 Мом, 22пФ
Минимальный входной диапазон	50 мВ	50 мВ
Коэффициент усиления	10	
Интерфейс с ПК	PCI	USB 2.0
Синхронизация	по фронту аналогового сигнала	
Наличие в архитектуре программируемых счетчиков	счетчик-таймер на три канала	
Наличие открытых библиотек и средств разработки	открыты библиотеки для написания собственного драйвера	открыты библиотеки для написания собственных драйверов
Цифровые входы	8	8
Цифровые выходы	8	8
Входной буфер	2048 слов	32 мегаслов

Наличие второго канала в требованиях к измерительной системе обусловлено необходимостью регистрации механических нагрузок, действующих на образец. Для анализа кинетики требуется информация о количестве и амплитудах импульсов, поэтому очень важно в составе измерительной платформы иметь инструменты «тонкой» настройки. Такими инструментами могут быть средства разработки и специальные инструментальные программные библиотеки, поставляемые производителем для программирования своего изделия.

Из всего многообразия измерительных систем, оптимальным решением по совокупности критериев были признаны платы ЛА-н150-14PCI и PicoScope 4224. Основные технические характеристики данных систем представлены в табл. 2.

Как видно из сравнения характеристик, плата PicoScope 4224 обладает наибольшим быстродействием при достаточно высокой разрядности и емкости входного буфера, что позволяет исследовать форму импульсов ЭМИ. Однако плата ЛА-н150-14PCI имеет развитые средства для программирования, что позволяет производить ее «тонкую» настройку под текущую задачу. Исходя из этого, целесообразно использовать обе выбранные модели. ЛА-н150-14PCI для регистрации импульсов в процессе нагружения образца, автоматизации процесса первичной обработки импульсов и регистрации приложенных механических усилий, прилагаемых к образцу. PicoScope 4224 — для регистрации микроимпульсов в процессе нагружения образца и детального исследования параметров одиночных импульсов.

С учетом всех необходимых условий была создана экспериментальная система, блок – схема которой представлена на рис. 1.

Для проверки возможности регистрации ЭМИ в процессе накопления микротрещин, к плате АЦП ЛА–н150–14PCI был подключен только усилитель с антенной (второй канал был программно отключен). Для исключения влияния деформаций, вызванных работой механической части пресса, импульсы регистрировались в «тихом» режиме на предельных уровнях нагрузки (т.е. при постоянной нагрузке с постоянным уровнем деформации). Предельный уровень нагрузки подбирался экспериментально. Плата АЦП настраивалась для работы в ждущем режиме (синхронизация по уровню входного сигнала). В результате были получены осциллограммы одиночных импульсов (рис. 2); группы импульсов в процессе накопления микротрещин; группы импульсов от крупных трещин, сопровождающихся также акустическим сигналом.

На рис. 2 можно видеть, что отдельный импульс, характерный для микротрещин, накапливающихся в процессе нагружения образца, хорошо выделяется на уровне помехи от усилителя.

Полученные осциллограммы подтверждают принципиальную возможность регистрации ЭМИ, возникающих в образцах композитов при их нагружении на всех стадиях накопления микротрещин и разрушения. Аппаратные и программные ресурсы платы ЛА-н150-14PCI позволяют автоматизировать процесс накопления импульсов и вы-

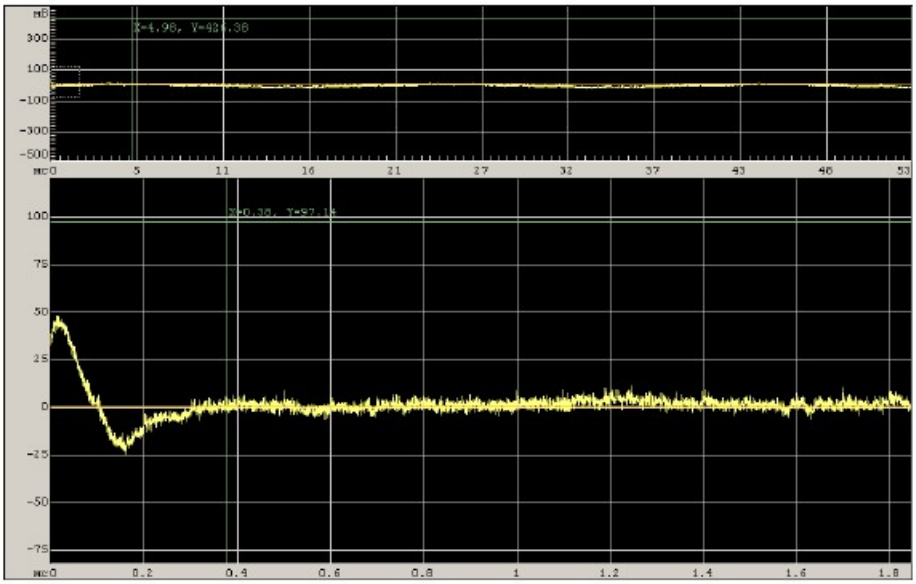

Рис. 2. Осциллограмма одиночного импульса (внизу увеличенный фрагмент)

полнять предварительную обработку сигналов.

Дальнейшая обработка полученных результатов позволяет отслеживать кинетику изменения энергии активации разрушения U_0 образцов, их структурно-чувствительного коэффициента γ и судить о стадийности разрушения наполнителя и матрицы композиционных материалов в процессе нагружения образцов. Кроме того, система позволяет также регистрировать активность импульсов ЭМИ, их амплитуду, длительность и частоту.

Разработанная система позволяет контролировать процесс разрушения с использованием метода импульсного электромагнитного излучения, и может применяться для любых композитных материалов со слабой электрической проводимостью как в процессе лабораторных испытаний их физико-механических свойств, так и на стадии их эксплуатации в изделиях и конструкциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов, В.В.* Метод электромагнитной эмиссии как эффективное средство для исследования кинетики разрушения материалов / В.В. Иванов, Т.М. Черникова, К.В. Ардеев // Вестник КузГТУ. 2002. – № 6. – С. 5–9.

2. *Мирошниченко, М.И.* Излучение электромагнитных импульсов при зарождении трещин в твердых диэлектриках / М.И.Мирошниченко, В.С. Куксенко // Физика твердого тела. – 1980. – Т.22. – В.5. – С. 1531–1533.

3. Пат. № 2439532 С2 Российская Федерация G01N 3/32 Способ определения долговечности образцов из композиционных материалов при циклическом нагружении / Т.М. Черникова, В.В. Иванов, Е.А. Михайлова [и др.]. - № 2010105502/28; заявл. 15.02.2010; опубл.10.01.2012.Бюл. № 1.

4. Определение кинетических констант прочности и критического размера разрушения композиционных материалов на основе регистрации импульсного электромагнитного излучения при их разрушении / В. В. Иванов [и др.]. // Прикладная механика и техническая физика. – 1994. – Т. 35. – № 4. – С. 153–159.

5. *Иванов, В.В.* Кинетика разрушения и усталостная прочность полимерных композиций./ В.В. Иванов, В.И. Климов, Т.М. Черникова. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2003.– 233 с.

6. *Михайлова, Е.А.* Контроль процесса разрушения композиционных материалов на основе изменения частоты импульсного электромагнитного излучения при нагружении // Ползуновский вестник. 2010. №2. – С. 78-81.

7. *Черникова, Т.М.* // Спектры электромагнитного излучения отдельных трещин в ближней зоне / Т.М. Черникова, В.В. Иванов, Е.А. Михайлова // Ползуновский вестник.– 2011. – № 3/1. – С. 103-106.

8. *Михайлова, Е.А.* Совершенствование метода контроля процесса разрушения и прогноза долговечности композиционных материалов на основе регистрации импульсного электромагнитного излучения / Е.А. Михайлова: дисс. канд. техн. наук. – Кемерово. – 2010. – 137 с.

9. *Яковицкая, Г.В.* Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород / Г. Е. Яковицкая. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 314 с.

Авторы статьи:

Черникова
Татьяна Макаровна,
канд. техн. наук, доц., зав. каф. общей электротехники КузГТУ. Email: chernika@kemtel.ru.

Иванов
Вадим Васильевич,
докт. техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики КузГТУ.
Email: vvi@kuzstu.ru.