

Исследование процесса разрушения стеклопластика методом акустической эмиссии

О. Ю. Еренков, Д.В. Лаптев

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

В данной статье поставлена задача – исследование кинетики процесса накопления структурных дефектов и разрушения стеклопластика под нагрузкой в условиях одноосного растяжения на основе анализа параметров сигналов акустической эмиссии. В качестве исследуемого материала выбран стеклопластик Этал Т 210-Т11-ГВС9, образцы из которого изготовлены на установке вакуумно-компрессионной пропитки. Испытания образцов проводили в условиях одноосного растяжения. Одновременно с записью диаграммы нагружения велась непрерывная регистрация сигналов акустической эмиссии. Контролировались следующие параметры сигналов акустической эмиссии: пиковая амплитуда сигналов, суммарный счет сигналов, скорость счета и суммарная энергия сигналов. Установлено, что на разных стадиях нагружения стеклопластика четко выделяются различные события, идентификация которых однозначно осуществляется методом анализа параметров сигналов акустической эмиссии. Процесс накопления дефектов и разрушения стеклопластика под нагрузкой – сложный многостадийный процесс, основными стадиями которого являются микропластические сдвиги в матрице, трещинообразование в матрице, разрыв адгезионных связей между матрицей и армирующим элементом, разрыв отдельных фрагментов наполнителя и образование в конечном итоге магистральной трещины разрушения, приводящей к потере целостности образца материала. Методика одноосного растяжения конструкционных полимерных материалов в сочетании с методом акустической эмиссии может эффективно использоваться для исследования процессов деформации и разрушения, а также для установления предельных характеристик для материалов различных классов.

Ключевые слова: стеклопластик, матрица, наполнитель, микротрещины, адгезия, прочность, акустическая эмиссия, разрушение.

Research of Fiberglass Destruction Process by Acoustic Emission Method

O.Yu. Erenkov, D.V. Laptev

Pacific National University, Khabarovsk

The task of this paper is a study of fiberglass structural defects accumulation and destruction process kinetics under load in conditions of uniaxial tension by analyzing the parameters of acoustic emission signals. The fiberglass type Etal T-210 T11 GVS9 was selected as a test material samples of which were made in the vacuum-compression impregnation apparatus. Test samples were performed under conditions of uniaxial stretching. Simultaneously with a load chart recording continuous recording of acoustic emission signals was conducted. Control the following parameters of acoustic emission signals were performed: peak amplitude of the signals, a total count of the signals, a counting rate and a total energy of the signals. It was found that at different stages of fiberglass loading the different events are clearly distinguished, identification of which is uniquely performed by analyzing the parameters of acoustic emission signals. The accumulation of defects and failure of fiberglass under load is a complex multistage process the main stages which are micro plastic shifts in the matrix, cracking in the matrix, a break adhesive bonds between the matrix and the reinforcing element, the gap of separate filler pieces of formation, and ultimately, the main crack fracture leading to loss of integrity of the sample material. The method of uniaxial stretching of structural polymeric materials in

ЕРЕНКОВ Олег Юрьевич – д.т.н., проф., зав. каф., erenkov@list.ru; ЛАПТЕВ Дмитрий Владимирович – студент, laptev_dmitrii@mail.ru.

combination with the method of acoustic emission can be efficiently used to study deformation and fracture processes, as well as to establish limiting characteristics for different classes of materials.

Key words: fiberglass, matrix, filler, micro cracks, adhesion, durability, acoustic emission, destruction.

Введение

Обеспечение прочности, надежности и долговечности современных машин и механизмов и изделий, изготавливаемых из полимерных композиционных материалов, является важнейшей задачей при их создании. При конструировании изделия или детали из полимерного композиционного материала, в том числе стеклопластика, необходимо знать, какие предельные нагрузки они могут воспринимать и как ведут себя различные материалы в условиях действия на них механической нагрузки. Такую информацию, возможно, установить только после комплексных испытаний материала.

Значительная роль в определении механических характеристик и поведения материала под нагрузкой отводится методам неразрушающего контроля, в том числе методу акустической эмиссии [1]. Данный метод основан на регистрации и обработке параметров упругих волн напряжений, возникающих в результате формирования, изменения и разрушения структур различных материалов. Его применение позволяет собрать значительный объем информации о физических процессах, происходящих в структуре материала, и количественно оценить степень накопления повреждений и механизм структурных преобразований.

Испытания полимерных композиционных материалов в первую очередь производят при растяжении, так как этот вид деформации является наиболее опасным видом напряженного состояния полимерных материалов и его можно осуществить почти в чистом виде в отличие от деформаций сжатия, сдвига, кручения [2,3]. Поэтому определяемые при растяжении механические характеристики служат основными исходными данными при расчетах на прочность деталей и изделий из полимерных композиционных материалов.

Полимерным композиционным материалам присущи такие особенности как структурная неоднородность, нестабильность физико-химических свойств, влияние технологических факторов в пределах даже одного объекта. Наличие таких особенностей приводит к снижению точности и достоверности оценки надежности, в связи с этим выборочный контроль с использованием статистических методов является малоэффективным для изделий из полимерных композиционных материалов.

Изучение кинетики накопления повреждений в процессе нагружения с выявлением механизма

разрушения на каждой стадии деформации имеет важное теоретическое и прикладное значение для механики разрушения конструкционных полимерных материалов и разработки подходов к прогнозированию прочности, надежности и долговечности изделий из этих материалов.

В настоящее время известно применение метода акустической эмиссии в практике отечественной науки для исследования особенностей процессов деформации и разрушения поликристаллических материалов и анализа стадийности процессов, протекающих на различных масштабных уровнях, при этом в качестве исследуемых выбраны металлические материалы и сплавы [4]. Известны работы зарубежных исследователей, посвященные разработке методов, аппаратных и программных средств для регистрации обработки сигналов акустической эмиссии [5,6] при испытаниях как металлических материалов и сплавов, так и многослойного тарного картона [7].

В данной статье поставлена задача – исследование кинетики процесса накопления структурных дефектов и разрушения стеклопластика под нагрузкой в условиях одноосного растяжения на основе анализа параметров сигналов акустической эмиссии.

Научная новизна работы заключается в полученных экспериментальных данных, позволяющих установить характер разрушения стеклопластика под нагрузкой, идентифицировать стадии процесса разрушения и формулировать физические представления на основе анализов сигналов акустической эмиссии.

Материалы и методика исследований

В качестве материала для изготовления экспериментальных образцов использовано полимерное связующее Этал Т 210, наполнитель – стеклоткань Т11, замасливатель – ГВС9. Были изготовлены образцы стеклопластика типа Этал Т 210-Т11-ГВС9 с помощью установки вакуумно-компрессионной пропитки и печи сопротивления для термообработки материала, установленной на ОАО «Дальэнергомаш» (г. Хабаровск) [8].

Исследования проводили на стандартных плоских образцах с использованием нагружающего устройства универсальной установки АЛА-ТОО ИМАШ 20-75. Образцы для испытаний полимерных материалов были изготовлены в виде двусторонних «лопаток» с прямоугольным сечением в рабочей зоне. Диаграмма нагружения $\sigma = f(\tau)$ регистрировалась с помощью само-

писца разрывной установки, при этом учитывали тот факт, что в начальный период времени при нагружении образца имеет место деформация всего комплекса нагружения, включая все элементы и части испытательной машины.

Одновременно с записью диаграммы нагружения велась непрерывная регистрация сигналов акустической эмиссии. В состав экспериментальной установки входили следующие составляющие: широкополосные датчики акустической эмиссии, предварительный усилитель с регулируемым коэффициентом усиления и порогом дискриминации, стандартный аналого-цифровой преобразователь, ПЭВМ для дальнейшего формирования файлов информации, их обработки и анализа [1].

Сигналы акустической эмиссии, возникающие в процессе деформации материала, перед окончательной обработкой и анализом претерпевают предварительную обработку: аналоговую и цифровую.

Аналоговая обработка происходит на стадии преобразования упругих акустических волн в электрические сигналы путем их фильтрации полосовым фильтром и усиления в предварительном усилителе. Фильтрация сигналов применяется с целью подавления шумов звукового диапазона в области нижних частот и шумов электромагнитного происхождения высокочастотного диапазона.

Дальнейшая цифровая обработка АЭ информации заключается в фильтрации сигналов по частотному и временному параметрам. Частотный параметр позволяет отфильтровать сигналы, попадающие в частотный диапазон полезных сигналов, но не относящиеся к сигналам акустической эмиссии по предварительной статистической оценке ряда параметров. Как правило, это шумы электромагнитного происхождения или сетевых помех, имеющие широкий частотный диапазон. Временной параметр позволяет отфильтровать сигналы акустической эмиссии, исходящие из области образца, не являющейся его рабочей частью. Использование временного параметра реализовано на основе метода временной или амплитудно-временной селекции при осуществлении линейной локации источников акустической эмиссии. Для этого устанавливаются два датчика акустической эмиссии по краям образца (рис. 1), в непосредственной близости от зоны деформирования. При данном методе селекции все сигналы, регистрируемые от захватов и механизмов испытательной машины, отфильтровываются и в дальнейшем не анализируются.

Испытания проводили при постоянных условиях проведения опытов: выдерживались тех-

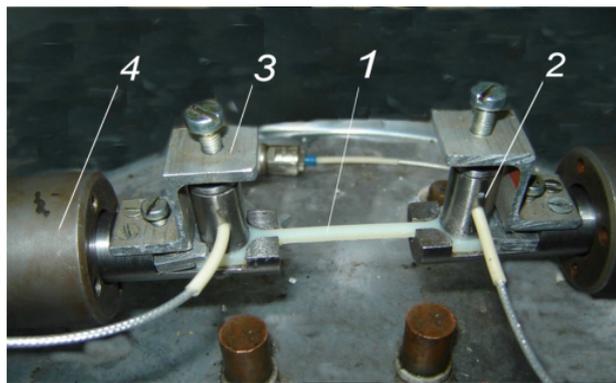


Рис.1. Крепление образца в нагружающем устройстве испытательной машины: 1 – образец; 2 – датчик АЭ; 3 – зажим; 4 – нагружающее устройство

нология изготовления образцов, температура, влажность, скорость и величина нагружения при одноосном растяжении согласно ГОСТ 11262–80.

В данных исследованиях контролировались следующие параметры сигналов акустической эмиссии: пиковая амплитуда сигналов, суммарный счет сигналов, скорость счета и суммарная энергия сигналов.

Пиковая амплитуда является энергетическим показателем повреждаемости материала. По амплитудному распределению импульсов акустической эмиссии можно судить о типе деформации, которым сопровождается процесс разрушения в конкретных условиях нагружения. Скорость счета (интенсивность сигнала) отражает скорость развития повреждения материала в данный момент времени. Суммарный счет несет информацию об интегральной повреждаемости объекта в процессе какого-либо внешнего воздействия, об увеличении длины дефекта и изменении его площади. Энергия электрического сигнала акустической эмиссии – измеренная площадь под огибающей электрического сигнала, как правило, пропорциональна размерам образующихся под нагрузкой трещин.

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 2 представлены диаграмма нагружения (зависимость изменения напряжения σ от времени t) и совмещенные с ней параметры акустической эмиссии, полученные в результате испытаний образцов из стеклопластика при одноосном растяжении.

Анализ представленных данных показывает следующее. В начальный период нагружения (участок OA) материал образца находится в режиме отсутствия повреждаемости, что подтверждается полным отсутствием импульсов АЭ всех четырех параметров акустического образа. Данный участок диаграммы представляет зону

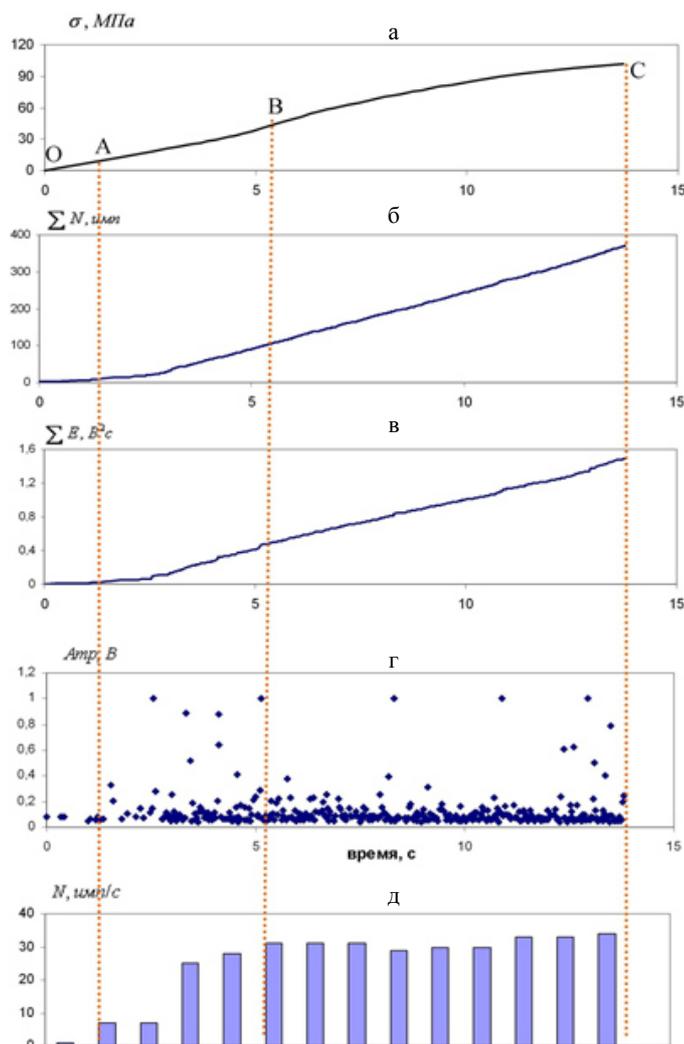


Рис. 2. Результаты испытаний стеклопластика: а – диаграмма нагружения; б – суммарный счет; в – суммарная энергия; г – распределение амплитуды сигналов АЭ; д – интенсивность сигналов

развития упругой деформации всего комплекса нагружения, включая захваты машины, однако в структуре материала при этом происходит возбуждение и напряжение химических межатомных связей в соответствии с положениями кинетической теории разрушения полимеров [9].

Зона АВ характеризуется наличием большого количества сигналов небольшой амплитуды (порядка 0,2В) и значительной интенсивности, что свидетельствует о микрорасслоении в матрице материала и расщеплении пучков волокон. Присутствие сигналов с максимальной амплитудой (до 1В) является доказательством того, что в образце также происходит развитие имеющихся и образование новых дефектов в виде микротрещин. Об этом свидетельствует также рост параметров сигналов акустической эмиссии, характеризующих интегральную повреждаемость образца – суммарный счет (55 имп.) и суммарная энергия (0,35 В²с).

Участок ВС можно рассматривать как стадию образования и роста магистральной разрушающей трещины в объеме матрицы. В пределах данного участка наблюдается интенсивный рост суммарного счета и суммарной энергии сигналов, которые при практически постоянной интенсивности имеют невысокую амплитуду (порядка 0,2В), что свидетельствует об дальнейшем увеличении интегральной повреждаемости образца. Наличие сигналов акустической эмиссии с амплитудой до 0,6 В можно идентифицировать с разрывом адгезионных связей между полимерным связующим Этал Т 210 и армирующей стеклотканью Т11.

Как известно [2,3,10] из механики разрушения полимерных композиционных материалов, прочность материала определяется прочностными характеристиками трех его структурных элементов – матрицы, наполнителя и межфазной границы (прочность адгезионного сцепления матрицы

с наполнителем). Процесс развития микротрещины связан и с развитием дефектов в структуре наполнителя, и с разрывом фрагментов наполнителя, и со снижением прочности межфазного взаимодействия между наполнителем и матрицей. В связи с чем энергозатратность процесса развития микротрещины выше, чем энергозатратность отдельных стадий развития дефектов, что и подтверждается соответствующими значениями пиковой амплитуды – энергетическим показателем повреждаемости материала.

Окрестность точки *С* является предразрывной зоной. Последовательные резкий рост (до 40 имп./с) и снижение (до 20 имп./с) интенсивности сигналов в окрестности точки *С* свидетельствуют о лавинообразном накоплении разрушений на стадии предразрушения и о том, что развитие магистральной трещины произошло до критической длины, а резкий рост суммарного счета и суммарной энергии является характерным признаком потери несущей способности

исследуемого материала. Как следует из представленных данных, разрывное напряжение для стеклопластика типа Этал Т 210-Т11-ГВС9 составляет 105 МПа.

Как известно, производство полимерных композиционных материалов повышенной прочности – важная научно-практическая задача, одним из путей решения которой является модификация полимерного связующего [10].

В данной работе проводились исследования процесса развития дефектов и разрушения стеклопластика типа Этал Т 210-Т11-ГВС9, полимерного связующего которого подвергалось модификации посредством электрофизической обработки [8].

На рис. 3 представлены диаграмма нагружения (зависимость изменения напряжения σ от времени t) и совмещенные с ней параметры акустической эмиссии, полученные в результате испытаний образцов из модифицированного

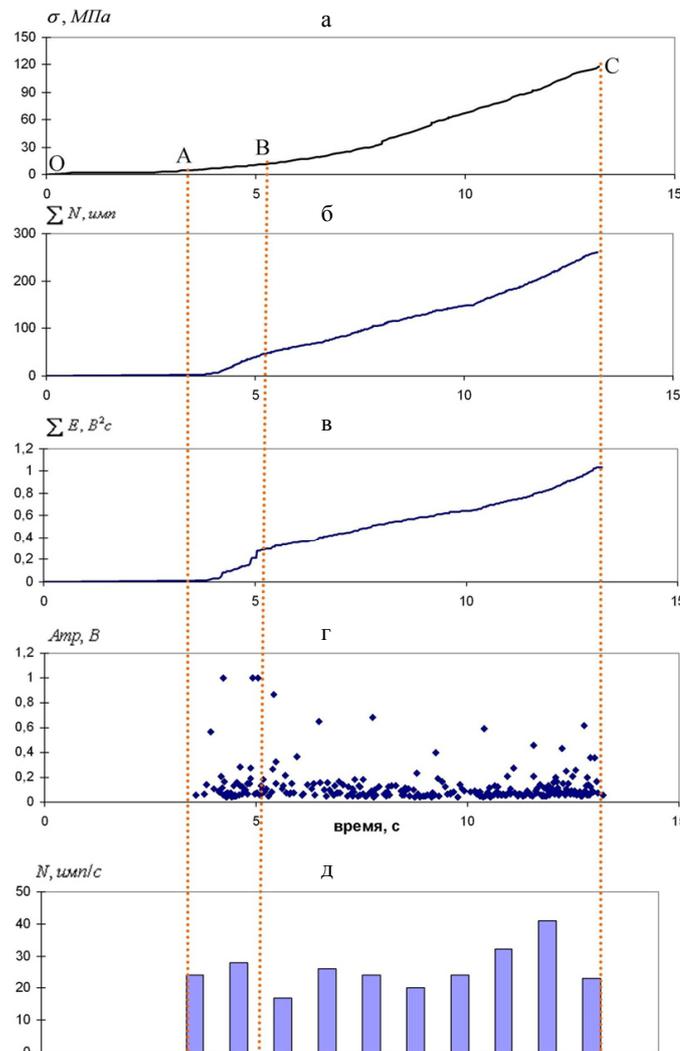


Рис. 3. Результаты испытаний модифицированного стеклопластика. Усл. обозначения те же, что и на рис. 2

стеклопластика при одноосном растяжении. Анализ представленных данных свидетельствует о том, что характер деформирования и разрушения модифицированного стеклопластика практически полностью совпадает с данными для образцов, выполненных по традиционной технологии.

Снижение значений таких параметров сигналов акустической эмиссии, как суммарный счет и суммарная энергия, можно объяснить более высокой прочностью образцов из модифицированного стеклопластика.

Заключение

Таким образом, на основе анализа полученных результатов исследований можно заключить следующее:

1. На разных стадиях нагружения стеклопластиков четко выделяются различные события, идентификация которых однозначно осуществляется методом анализа всех параметров сигналов акустической эмиссии.

2. Процесс накопления дефектов и разрушения стеклопластика под нагрузкой – сложный многостадийный процесс, основными стадиями которого являются микропластические сдвиги в матрице, трещинообразование в матрице, разрыв адгезионных связей между матрицей и армирующим элементом, разрыв отдельных фрагментов наполнителя и образование в конечном итоге магистральной трещины разрушения, приводящей к потере целостности образца материала.

3. Экспериментально доказано, что характер деформирования и разрушения модифицированного стеклопластика практически полностью совпадает с данными для образцов, выполненных по традиционной технологии, а имеющиеся отличия в значениях некоторых параметров сигналов акустической эмиссии объясняются различной прочностью материалов.

4. Методика одноосного растяжения конструкционных полимерных материалов в сочетании с методом акустической эмиссии может эффективно использоваться для исследования

процессов деформации и разрушения, а также для установления предельных характеристик для материалов различных классов.

Литература

1. *Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении* / Н.А. Семашко, В.И. Шпорт, Б.Н. Марьин и др. М.: Машиностроение, 2002. 240 с.
2. *Аскадский А.А.* Деформация полимеров. М.: Химия, 1973. 448 с.
3. *Ратнер С.Б., Ярцев В.П.* Физическая механика пластмасс. М.: Наука, 1982. 211 с.
4. *Башков О.В.* Стадийность деформации поликристаллических материалов. Исследование акустико-миссионным и оптико-телевизионным методами / Отв. ред. А.Н. Семашко. Томск: Изд-во национ. исслед. Томск. политехн. ун-та, 2014. 301 с.
5. *Hamstad M.A.* Examination of the Application of a Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals: Part 2. Source Location/ M.A. Hamstad, A.O. Gallagher and J. Garry//*Journal of Acoustic Emission*. 2002. V. 20. P. 62–81.
6. *Kosnic E.* Acoustic Emission Tesying of a Difficult to Reach Steel Bridge Detail // *Journal of Acoustic Emission*. 2009. V. 27. P. 11–17.
7. *Akio Matudoe, Ken Yamashita, Shigeru Nagasawa and Yasushi Fukuzawa.* Analysis of AE Signals during Scratch Test on the Coated Paperboard Hiroyuki Kishi // *Journal of Acoustic Emission*. 2012. V. 30. P. 1–10.
8. *Еренков О.Ю., Игумнов П.В., Никишичкин В.Л.* Исследование механических свойств полимерных композитных материалов // *Вестник машиностроения*. 2010. № 4. С. 61–63.
9. *Карташов Э.М., Цой Б., Шевелев В.В.* Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров. М.: Химия, 2002. 736 с.
10. *Еренков О.Ю.* Инновационные технологии полимерных композиционных материалов: монография / О.Ю. Еренков, С.А. Ковальчук. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. 178 с.

Поступила в редакцию 21.02.2017