получены расчетным путем, исходя из средневыборочных значений кинетических констант разрушения для каждого материала (табл. 1), по формуле [2]:

$$n_ц = \frac{\tau_0 L_c^{i-5} \tilde{\gamma} \sigma_A f}{kT} \times exp\left(\tilde{U}_0 / kT \right) / \\ / \left[exp(\tilde{\gamma} \sigma_A / kT) - 1 \right]$$

где $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с – период тепловых колебаний молекул; L_c = 21,5 – масштабный коэффициент; $\tilde{U}_0 = U_0(1 - T/T_m)$; $\tilde{\gamma} = \gamma(1 - T/T_m)$; σ_A – амплитуда меняющейся нагрузки; Па; f – частота нагружения, Гц; k – постоянная Больцмана.

Рост частоты на два-три порядка приводит к увеличению числа циклов в такой же пропорции.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования усталостной прочности полимерных композиционных материалов с целью изучения возможности использования новых принципов прогноза разрушения на основе регистрации импульсного электромагнитного излучения при нагружении композитов. Установлена достаточно удовлетворительная корреляция между расчетными и опытными значениями усталостной прочности фенопластов при сложных циклических режимах нагружения, что свидетельствует о возможности использования метода ЭМИ для прогнозирования разрушения композитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Климов В. И., Черникова Т. М.* Контроль разрушения и долговечности полимерных композитов. - Кемерово: АИН. - 1997.- 151 с.

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

Авторы статьи:

Черникова Татьяна Макаровна - канд. техн. наук, доц. каф. общей электротехники

Иванов Вадим Васильевич - докт. техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики

Климов Вячеслав Иванович - канд. хим. наук

Михайлова Екатерина Александровна - асс. каф. общей электротехники

УДК 678.017:620.17

Т.М. Черникова, В.В. Иванов, Е.А. Михайлова

О КИНЕТИКЕ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ РАСТЯЖЕНИИ

В настоящее время при решении задач прочности и долговечности конструкций из композиционных материалов большое значение имеет подробное изучение процессов разрушения, в качестве метода исследования которых может быть выбран метод регистрации импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) [1,2].

Реализация потенциальных возможностей метода ЭМИ как средства диагностики и кинетики разрушения композиционных материалов сдерживается отсутствием общего подхода к изучению связи характеристики повреждаемости материала с параметрами ЭМИ. Однако методу ЭМИ присущи новые подходы, заключающиеся в непосредственной оценке влияния дефекта на прочность контролируемого объекта [1,2], основанной на том, что если дефект развивается, то он излучает импульс и можно определить момент достижения трещиной критического размера, то есть фактически контролировать ход процесса.

В настоящее время среди различных теорий прочности материалов выделяется кинетическая теория разрушения, которая начала разрабатываться в 50-е гг. ленинградской научной школой во главе с С.Н. Журковым. Согласно этой теории твердое тело представляет собой физическую среду, в которой действие внешней силы зависит от взаимодействия атомов, находящихся в тепловом движении. При этом важную роль играют неравномерность теплового движения. Разрушение рассматривается как необратимый процесс накопления субмикро- и микротрещин, возникающих в результате термофлуктуационных разрывов межатомных связей в механически напряженном материале.

Рис.1. Исследуемые образцы фенопластов в форме лопаточки

Таблица 1

Марки исследованных композиционных материалов

Марка материала	Связующее	Наполнитель
Ж-13-010-89	Новолачная фенолоформальдегидная смола	Карбонат кальция
О-20-210-75СК	Новолачная фенолоформальдегидная смола	Древесная мука и тальк
Э-39-0127-48	Новолачная фенолоформальдегидная смола	Стеклопорошок
Э-2-330-02	Резольная фенолоформальдегидная смола	Древесная мука
О3-010-02	Новолачная фенолоформальдегидная смола	Древесная мука
Э10-342-63	Резольная фенолоформальдегидная смола	Плавиковый шпат и древесная мука

Основываясь на положениях кинетико-статистической модели разрушения - кинетического уравнения прочности твердых тел С.Н. Журкова, вытекающего из него уравнения для скорости трещинообразования, условия необратимости накопления трещин и концентрационного критерия разрушения твердых тел [1,2], можно определять кинетические константы материала и проводить контроль разрушения по параметрам ЭМИ.

Реальные процессы деформирования и разрушения конструкционных материалов сложны и требуют специальных теоретических и экспериментальных исследований. Целью данной работы является экспериментальное исследование кинетики разрушения фенолоформальдегидных композиционных материалов (фенопластов) на основе регистрации импульсного электромагнитного излучения при их растяжении.

Перечень исследованных материалов приведен в табл.1. Все образцы изготавливались прессованием и имели стандартную форму лопаточки (рис.1). Композиты испытывались в условиях одноосного растяжения на разрывной машине Р-5. Исследования проводились на установке, позволяющей в процессе всего эксперимента регистрировать количество импульсов, амплитуду сигналов, приложенную нагрузку, наблюдать форму сигнала [1]. Образцы испытывались при увеличении нагрузки с постоянной скоростью при температуре T = 295 K. В одинаковых режимах исследовалось по 10 образцов.

В результате проведенных исследований получены кинетические кривые накопления импульсов ЭМИ (рис.1,2) при растяжении фенопластов. Электромагнитное излучение при растяжении фенопластов, также как и при сжатии наблюдается от начала нагружения до разрушения образцов.

Из представленных зависимостей видно, что при равномерном нагружении образцов выделение импульсов происходит неравномерно. На кинетических кривых можно выделить участки с резким возрастанием испускания импульсов ЭМИ и более медленное накопление импульсов. Это может указывать на интенсивность происходящего разрушения. Для различных композиционных материалов характер кривых неодинаков (рис. 1,2). Но на большинстве кинетических кривых при растяжении фенопластов наблюдается некоторый пологий участок. На графиках зависимости количества импульсов *N*

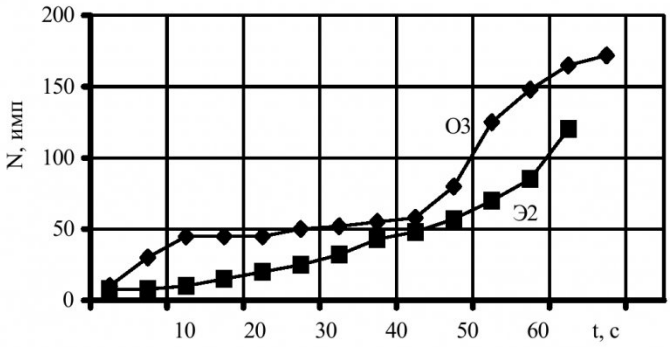

Рис. 2 . Кинетика накопления импульсов ЭМИ при растяжении образцов фенопласта О3 и Э2

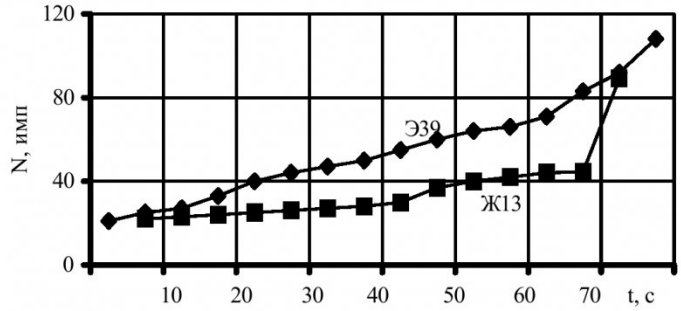

Рис. 3. Кинетика накопления импульсов ЭМИ при растяжении образцов фенопласта Э39 и Ж13

от времени t при постоянной скорости нагружения хорошо выделяется вторая стадия разрушения - резкое нарастание числа импульсов при нагрузках 70 - 80 % от разрушающей.

При растяжении образцов фенопластов импульсов выделяется меньше, чем при сжатии.

Это можно отнести к различию в размерах образцов при сжатии и растяжении.

На это же указывает и меньшая величина амплитуды импульсов при разрушении фенопластов отрывом (в 2 - 3 раза), чем при разрушении в процессе сжатия. При расколе образцов амплитуда импульсов также, как и при сжатии, имеет величину больше, чем в процессе деформирования.

Обработка результатов испытаний композиционных материалов по методике, описанной в [1], позволила получить экспериментальные значения механических характеристик различных композитов, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Энергетические и кинетические параметры фенопластов при их растяжении

Фенопласт	A, Дж	Γ, 10^4,Дж/м^2	U_0, 10^{-19},Дж	γ, 10^{-28},м^3
Ж13	0,54	2,73	1,49	4,16
О3	0,60	2,55	1,50	3,72
Э2	0,26	1,86	1,48	4,79
Э39	0,91	2,42	1,47	3,40
Э10	0,58	2,29	1,51	3,41
О20	0,56	2,71	1,51	1,44

Наиболее важными характеристиками являются энергия активации разрушения (U_0) межатомных связей; структурно-чувствительный коэффициент (γ), называемый иначе коэффициентом перенапряжения межатомных связей в наиболее слабом звене структуры; полная работа разрушения (A); эффективная поверхностная энергия разрушения композитов (Γ). Эти параметры рассчитывались по формулам (1) - γ, (2) - U_0, (3) - A, (4) - Γ и усреднялись по десяти образцам

$$\gamma = \frac{kT\left[n\sum_{i=1}^{n}\theta_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}\theta_i\right)^2\right]}{\dot{\sigma}\left[n\sum_{i=1}^{n}t_i\theta_i - \left(\sum_{i=1}^{n}\theta_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n}t_i\right)\right]} \quad (1)$$

$$U_0 = kT\,ln\left(\frac{kT}{\gamma}\right) + \frac{\gamma\dot{\sigma}\left[\left(\sum_{i=1}^{n}t_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n}\theta_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n}\theta_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n}t_i\theta_i\right)\right]}{n\sum_{i=1}^{n}\theta_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}\theta_i\right)^2} \quad (2)$$

где

$$\theta_i = \ln\left(\frac{N_i\tau_0\dot{\sigma}}{N^*}\right);$$

$\tau_0 \approx 10^{-13}$ с – период тепловых колебаний молекул; k – постоянная Больцмана, $\dot{\sigma}$ - скорость нагружения, Па/с; N^* – полное число импульсов, накопленных к моменту разрушения образца.

$$A = \frac{P_p\Delta h}{2} \quad (3)$$

P_p - разрушающая нагрузка (кН), Δh - деформация образца (м).

$$\Gamma = \frac{4A}{N^*\pi L^2}, \quad (4)$$

L - линейный размер микротрещин, накапливающихся в процессе нагружения образца.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что применение метода ЭМИ для исследования разрушения композиционных материалов позволяет изучать процессы, происходящие на микроуровне и, используя кинетический подход к проблеме прочности, определять параметры этих процессов на основе данных механических испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Климов В.И., Черникова Т.М.* Контроль разрушения и долговечности композиционных материалов.- Кемерово: АИН, 1997.- 151 с.

2. *Иванов В.В., Егоров П.В., Климов В.И. и др.* Определение кинетических констант и критического размера разрушения композиционных материалов на основе регистрации импульсного электромагнитного излучения при их разрушении // ПМТФ. – 1994.- Т 35, № 4.- С. 153-159.

Авторы статьи:

Черникова Татьяна Макаровна - канд. техн. наук, доц. каф. общей электротехники

Иванов Вадим Васильевич - докт. техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики

Михайлова Екатерина Александровна - асс. каф. общей электротехники