

ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ

УДК 678.017: 620.17

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

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

При решении задач обеспечения работоспособности конструкций из композиционных материалов существенная роль отводится неразрушающим методам контроля, позволяющим оценить качество изделий на этапах изготовления и эксплуатации, а также прогнозировать остаточный ресурс прочности. Особый интерес в этом отношении представляет метод, основанный на испускании импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) при образовании микротрещин в материале, находящемся под нагрузкой. Тот факт, что параметры импульсов ЭМИ определяются кинетическими характеристиками повреждения композиционного материала [1], делает возмож-

ным установление качественных и количественных закономерностей развития этого процесса.

В настоящей работе проводилось исследование поведения композитов при циклическом сжатии с целью определения возможности использования метода ЭМИ для оценки усталостной прочности композитов.

Объектом проводимых исследований были образцы фенолоформальдегидных композиционных материалов (фенопластов) Ж13-010-89 (Ж-13) и Э39-0127-48 (Э-39). При подготовке образцов к исследованиям придерживались единой методики их приготовления, предварительной обработки и хранения. Для проведения измерений

образцы изготавливались партиями по 10 штук.

Изучение усталостной прочности проводилось на установке, подробно описанной работе [1]. Образцы с размерами $10 \times 10 \times 15$ мм помещались в экранируемую ячейку для устранения электрических помех и нагружались в режиме одноосного сжатия циклически с частотой $f = 0,001 \div 0,005$ Гц. Амплитуда циклов σ_A выбиралась в пределах ($0,7 \div 0,95$) σ_{cyc} (σ_{cyc} – разрушающее напряжение при сжатии). Показатель асимметрии циклов был равным нулю $\left(R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0 \right)$, а скорость нагружения и разгрузки в

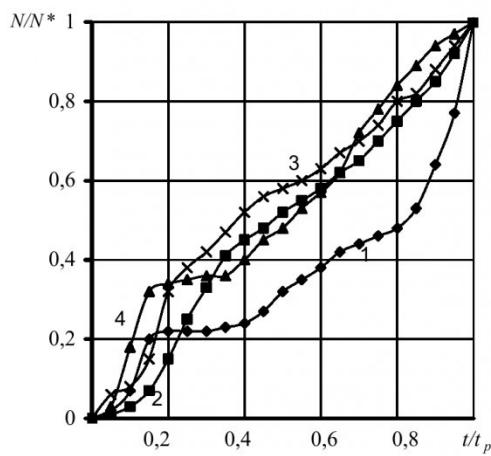


Рис.1. Кинетические кривые накопления повреждений структуры композита Ж-13 при циклическом сжатии (t – текущее время, t_p – время до разрушения)

$$1 - \sigma / \sigma_{cyc} = 0,9; \quad 2 - \sigma / \sigma_{cyc} = 0,91; \quad 3 - \sigma / \sigma_{cyc} = 0,88; \quad 4 - \sigma / \sigma_{cyc} = 0,89$$

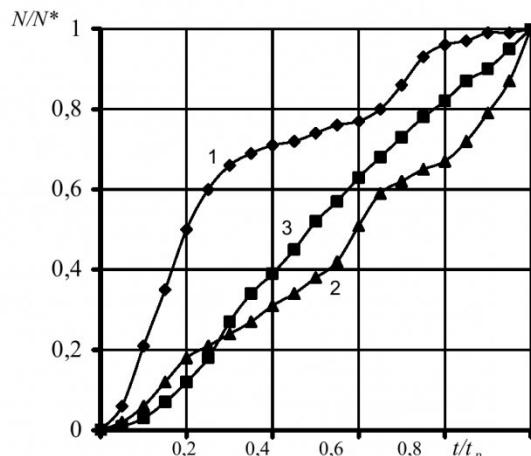


Рис. 2. Кинетические кривые накопления повреждений структуры композита Э-39 при циклическом сжатии

$$1 - \sigma / \sigma_{cyc} = 0,93; \quad 2 - \sigma / \sigma_{cyc} = 0,92; \quad 3 - \sigma / \sigma_{cyc} = 0,88$$

Таблица

Основные механические характеристики композитов Ж-13, Э-39 при сжатии

Материал	Энергия активации разрушения U_0 , Дж	Структурный коэффициент $\gamma, \text{м}^3$	Предел прочности на сжатие $\sigma_{\text{сж}}$, Мпа	Температура размягчения T_m , К	Температура испытаний T , К
Ж-13	$1,54 \cdot 10^{-19}$	$9,1 \cdot 10^{-29}$	173	473°	293
Э-39	$1,55 \cdot 10^{-19}$	$9,2 \cdot 10^{-29}$	210	530°	293

пределах каждого цикла оставалась постоянной ($\dot{\sigma} = const$).

Число микроповреждений определялось в реальном масштабе времени по счетчику на основе счета числа импульсов электромагнитного излучения, выделяемых в процессе нагружения образцов. Типичные приведенные кинетические кривые накопления повреждений структуры композитов Ж-13 и Э-39 показаны на рис. 1, 2. Данные кинетические кривые, полученные при циклических режимах нагружения, практически мало отличаются по форме от кинетических кривых, получаемых при нагружении с постоянной скоростью вплоть до полного разрушения образцов. Это связано с тем, что в соответствии с моделью накопления повреждений структуры композитов, число микротрецин, накапливаемых за полупериод нагружения и за полупериод разгрузки (при условии, что скорость нагружения и скорость разгрузки одинаковы), теоретически совпадают. Поэтому качественно накопление повреждений в каждом цикле происходит таким образом, как если бы образец находился под воздействием непрерывно возрастающей нагрузки [1].

Существенным отличием циклического нагружения, однако, является то обстоятельство, что предельное число микротрецин N^* при большом числе циклов оказывается в 10-15 раз больше, чем при однократном нагружении образца до полного его разрушения. Это связано с тем, что при нагружении образцов до полного их разрушения очень быстро образуется очаг, т.е. узкая область, которая по объему составляет

лишь несколько процентов от всего объема образца, где лока-

карбонатом кальция (Ж-13) и стеклопорошком (Э-39) – в ка-

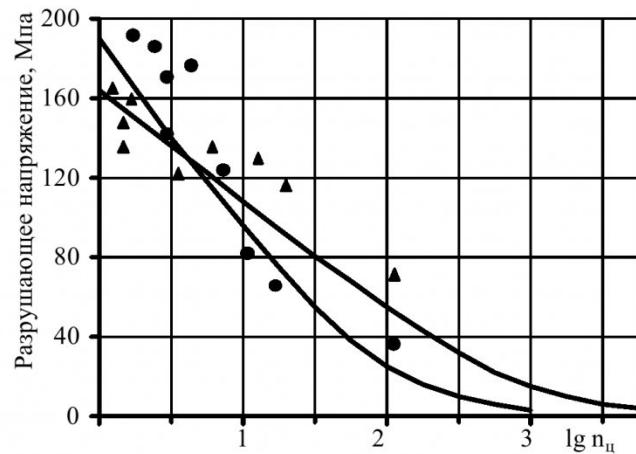


Рис.3. Кривые усталости при одноосном циклическом сжатии образцов из композиционных материалов
 ▲ – Ж-13 (эксперимент); ● – Э-39 (эксперимент);
 — - теория (расчет)

лизуется процесс накопления повреждений структуры и где этот процесс сразу переходит на стадию ускоренного трещинообразования и возникновения магистрального макроразрыва. При большом числе циклов нагружения-разгрузки, особенно при небольших амплитудах нагружения, стадия делокализованного накопления микротрецин становится более продолжительной, что приводит к накоплению на этой стадии большого числа микротрецин, практически равномерно рассеянных по объему всего образца. При этом критическая концентрация их C^* практически не зависит от режима нагружения и определяется лишь размером микротреций.

На рис. 3 показаны кривые усталостной прочности образцов Ж-13 и Э-39 с новолачной фенолоформальдегидной смолой в качестве связующего,

качестве наполнителя. Основные средневыборочные значения механических характеристик данных материалов, полученные по результатам испытаний, приведены в таблице [2].

Кривые усталостной прочности на рис. 3 композитов Ж-13 и Э-39 получены из выборок, включающих результаты испытаний 20 образцов (по 10 для каждого материала) при различных амплитудах сжимающей нагрузки ($\sigma_{max} = \sigma_A$). Сравнение кривых усталости показывает, что при средней частоте циклической нагрузки $f = 0,003$ Гц число циклов до полного разрушения (n_u) образцов с карбонатом кальция в качестве наполнителя оказывается при одинаковых амплитудах нагрузки выше, чем для образцов, наполненных стеклопорошком, что обусловлено большей хрупкостью образцов Э-39.

Сплошные кривые на рис.3

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

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

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 – ампли-

туда 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 ос-

нове 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 гео-
технической механики

Климов
Вячеслав Иванович
- канд. хим. наук

Михайлова
Екатерина Александровна
- асс. каф. общей электро-
техники

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. Журко-

вым. 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