

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

ях, что свидетельствует о большей эффективности элементов с внутренней обратной связью.

В случае, если параметры дополнительной обратной связи активного элемента будут определяться внешним воздействием, то возможно изменять структуру колебательной системы в целом.

Практическое применение активных элементов заключается в том, что если каждый из элементов одним из своих колебательных параметров связать с одной из составных частей общей функциональной зависимости, то возможно изменять эту функцию преобразования, управляя лишь внешним воздействием, к примеру, ошибкой (погрешностью) работы преобразователя, рисунок 5.

Заключение

Показано, что одним из способов получения активных колебательных элементов является введение дополнительной обратной связи между колебательными параметрами автогенератора – амплитудой и частотой колебаний. Что в результате позволяет, как повысить эффективность взаимодействия элемента с другими элементами, так и управлять этим взаимодействием, позволяя им передвигаться в частотной области и образовывать устойчивые коллективы и, соответственно, определять поведение системы в целом.

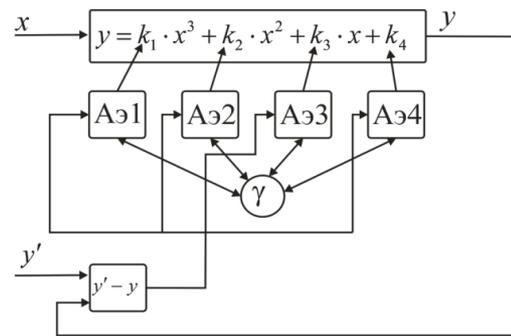


Рисунок 5 – Применение системы активных взаимодействующих элементов для изменения функционального преобразования

Условные обозначения: Аэ – активный элемент; x – аргумент (результат измерений); y – результат функциональных преобразований; y' – требуемое значение результата функциональных преобразований; k_i – изменяемые коэффициенты; γ – элемент связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д.Е. Кривобоков Использование связанных колебаний в интеллектуальных приборах контроля [Текст] / Д.Е. Кривобоков // Ползуновский вестник, 2006. – №4 – стр. 42-44.

К.т.н., доц. Д.Е. Кривобоков, тел. (3852) 26-04-92, krivobok@ab.ru - Алтайский гостехуниверситет

УДК 678.01:543.42

СТАТИСТИКА НАКОПЛЕНИЯ И ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

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

Проведено теоретическое изучение накопления микротрещин и частоты следования импульсов электромагнитного излучения при механическом нагружении композиционных материалов. Линейчатые спектры радиоизлучения трещин возникают вследствие рождения трещин в зоне очага разрушения с определенной частотой, зависящей от стадии формирования очага. Определена основная частота электромагнитного излучения трещин, построены линейчатые спектры излучения.

Ключевые слова: композиционные материалы, разрушение, пуассоновское распределение, электромагнитное излучение, спектры излучения, частота, микротрещины.

Композиционные материалы, как и другие твердые тела, в процессе деформирования излучают электромагнитные сигналы, источником которых служат электрические процессы, возникающие при образовании трещин [1]. Это явление нашло применение при контроле процесса разрушения и определении долговечности композиционных ма-

териалов [2-5].

При этом предполагается, что процесс разрушения имеет двухстадийный характер [6]. Рост числа трещин в единице объема ограничен предельной величиной, которая в соответствии с работами [6, 7] определяется концентрационным критерием разрушения

СТАТИСТИКА НАКОПЛЕНИЯ И ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МИКРОТРЕЩИН В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

$$c^{*-1/3} / a = e, \quad (1)$$

где e – безразмерная константа, равная основанию натуральных логарифмов, a – средний размер накапливающихся микротрещин, c^* – критическая концентрация микротрещин.

После накопления критического числа микротрещин разрушение переходит на вторую, более короткую во времени стадию локализации. На этой стадии происходит формирование магистрального макроразрыва и его распространение со скоростью, близкой к скорости звука в данном материале, после чего тело разделяется на части и полностью теряет свою несущую способность.

Поскольку каждой возникающей трещине ставится в соответствие генерируемый ею импульс электромагнитного излучения (ЭМИ), процесс разрушения можно исследовать, изучая ЭМИ при нагружении композиционных материалов.

Электромагнитное излучение в композициях исследуется давно. Всесторонне изучаются амплитуда импульсов, их длительность, энергия, количество. В настоящей работе теоретически исследована частота следования импульсов электромагнитного излучения, возникающего при рождении и распространении трещин в композиционных материалах.

При механическом нагружении композитов и возникновении трещин, как малые, так и большие трещины излучают энергию в области частот, простирающейся от единиц герц до десятков мегагерц, если рассматривать непрерывный (сплошной) спектр отдельных импульсов излучения трещин. Однако в действительности микротрещины (\bar{a}_{\max}) возникают периодически со средней частотой, превосходящей на отдельных этапах разрушения 10^3 импульсов в секунду. Здесь $\bar{a}_{\max} = \tau_n / \tau_p$ – предельный приведенный размер трещины после её остановки; τ_n – время движения трещины до остановки (время нарастания фронта импульса); τ_p – время релаксации заряда на берегах трещины. В этом случае спектр излучения становится не сплошным, а линейчатым [8].

Как известно из теории спектрального анализа [8], если одиночные импульсы повторять через приблизительно равные промежутки времени τ , то получится периодическая функция, которая разлагается в ряд Фурье. При этом спектральная плотность $a(\omega)$ совпадает со значениями $\beta_k \tau$ на частотах

$\omega = k\omega_1$, где $\omega_1 = 2\pi/\tau$ – основная частота процесса; $n = 1, 2, 3, \dots$; β_k – коэффициенты разложения периодической функции в ряд Фурье.

Воспользуемся статистической теорией генерации трещин для вычисления основной частоты и получения линейчатых спектров излучения.

Введем основные предположения относительно характера процесса рождения микротрещин в очаге разрушения композиционных материалов на первой стадии.

1. Образование микротрещины (её рождение) является случайным событием.

2. Числа таких событий на неперекрывающихся временных интервалах являются независимыми случайными величинами.

3. Вероятность того или иного числа событий на временном отрезке Δt не зависит от начала отсчета этого интервала на временной оси.

4. Вероятность образования микротрещин на малом временном интервале пропорциональна длине этого интервала, а вероятность наступления более чем одного события имеет более высокий порядок малости в сравнении с Δt .

В теории случайных процессов показывается [9], что поток событий, подчиняющийся перечисленным выше условиям, является пуассоновским. В частности, вероятность рождения за время Δt количества i трещин равна

$$\frac{(\lambda \Delta t)^i}{i!} e^{-\lambda \Delta t},$$

где $\lambda = \tau_1^{-1}$ – среднее число микротрещин, образующихся в очаге разрушения в единицу времени; τ_1 – среднее время ожидания возникновения одной трещины.

Вероятность образования хотя бы одной микротрещины за время t равна

$$p_1(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Уравнение (2) совпадает со статистикой терморазрушающих флуктуаций [10].

Если в начальный момент времени в объеме очага имеется n_0 элементов, способных распасться с образованием микротрещин, то среднее число образовавшихся за время t микротрещин, будет равно:

$$n_{cp} = n_0(1 - e^{-\lambda t}),$$

где n_{cp} – математическое ожидание числа образовавшихся за время t микротрещин в

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

рассматриваемом объеме. Учитывая, что за время $\bar{\tau}$, определяемое уравнением С.Н. Журкова [11]

$$\bar{\tau} = \tau_0 \exp\left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT}\right],$$

в очаге разрушения накапливается число N^* ($N^* = c^*V$) трещин, полученное из концентрационного критерия разрушения (1), среднюю скорость трещинообразования можно определить из уравнения

$$\lambda = \dot{N} = \frac{N^*}{\tau_0} \exp\left[\frac{\gamma \sigma - U_0}{kT}\right], \quad (3)$$

где \dot{N} – скорость трещинообразования; σ – напряжение, действующее на образец; V – объем зоны разрушения; U_0 – энергия активации разрушения; γ – структурно-чувствительный коэффициент; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; τ_0 – период атомных колебаний.

Уравнение (3) показывает, что среднее число микротрещин, рождающихся в единицу времени в очаге разрушения, постоянно при $T = const$ и $\sigma = const$.

Таким образом, наиболее длительная стадия делокализованного (в пространстве) накопления микротрещин характеризуется постоянством скорости трещинообразования.

Постоянство средней скорости трещинообразования вытекает и из пуассоновской статистики разрушения. Действительно, вычислим вероятность рождения, по крайней мере i трещин за время t :

$$p(t) = 1 - \sum_{j=0}^{i-1} \frac{(\lambda t)^j}{j!} e^{-\lambda t},$$

где J – число рождающихся трещин.

Плотность вероятности по параметру t есть:

$$p'(t) = \lambda \frac{(\lambda t)^{i-1}}{(i-1)!} e^{-\lambda t}.$$

Среднее же время ожидания i событий тогда найдется из уравнения:

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} \frac{t \lambda (\lambda t)^{i-1}}{(i-1)!} e^{-\lambda t} dt = \frac{i}{\lambda} = i \tau_1.$$

Таким образом, среднее время рождения i микротрещин равно $i \tau_1$, т.е. в i раз больше, чем время рождения одной. Это оз-

начает, что средняя скорость трещинообразования постоянна.

Распределение в пространстве статистически независимых между собой микротрещин может быть найдено из следующих соображений.

Как правило, размеры области разрушения намного превышают размеры микротрещин, образующихся на первой стадии процесса. Поэтому можно считать, что процесс рождения m трещин с координатами ξ_1, \dots, ξ_m в евклидовом пространстве объема V подобен бросанию наугад в область V m частиц. В этом случае вектор $\vec{\xi}$ (ξ_1, \dots, ξ_m) состоит из независимых случайных компонентов, причем каждый компонент имеет равномерное распределение вероятностей с плотностью

$$p'_\xi = \begin{cases} \frac{1}{V}, & \text{при } \vec{\xi} \in V \\ 0, & \text{при } \vec{\xi} \notin V \end{cases}.$$

Среднее число трещин в единице объема равно:

$$c = \frac{m}{V}.$$

Если неограниченно увеличивать размеры фазового пространства V и число m трещин, оставляя $c = const$, то предельным распределением случайной величины, равной числу частиц, попавших в область $V_1 \in V$, будет пуассоновское распределение

$$p = \frac{c V_1^m}{m!} e^{-c V_1}. \quad (4)$$

Если V_1, V_2, \dots, V_n представляют собой непересекающиеся области евклидова пространства V , то вероятность того, что в объеме V_1 окажется m_1 трещин, в объеме V_2 – m_2 и т.п., будет равна:

$$p = \frac{c V_1^{m_1} \dots c V_n^{m_n}}{m_1! \dots m_n!} e^{-c(V_1 + \dots + V_n)}. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) дают пространственную статистику накопления трещин внутри очага разрушения композиционных материалов объема V .

Условие для предельной концентрации микротрещин определяет границу перехода от первой ко второй стадии разрушения. На второй стадии разрушения происходит локальное повышение уровня действующих напряжений и лавинное нарастание числа тре-

СТАТИСТИКА НАКОПЛЕНИЯ И ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МИКРОТРЕЩИН В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

щин, причем интенсивность пуассоновского потока становится возрастающей функцией времени и сам поток становится нестационарным:

$$\lambda(t) = \frac{N^*}{\tau_0} \exp\left[\frac{\gamma\sigma(t) - U_0}{kT}\right], \quad (6)$$

где $\lambda(t) = \dot{N}$ – скорость трещинообразования при изменяющемся нагружающем напряжении.

Уравнение (6) следует из статистики накопления микротрещин для нестационарного случая:

$$p(\xi(\Delta t) = m) = \frac{\alpha^m}{m!} e^{-\alpha},$$

где

$$\alpha = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \lambda dt = \int_{t_{i-1}}^{t_i} c^* \tau_0^{-1} \exp\left[-\frac{U_0 - \gamma\sigma(t)}{kT}\right] dt,$$

$p(\xi(\Delta t) = m)$ – вероятность возникновения на интервале времени Δt m микротрещин под действием нагрузки, изменяющейся во времени; $\xi(\Delta t)$ – число возникающих микротрещин в интервале Δt

Таким образом, учитывая вышеизложенное, можно определить частоту процесса возникновения трещин в объеме очага из формулы

$$\dot{c}V = \frac{c^*V}{\tau_0} \exp\left[\frac{\gamma\sigma - U_0}{kT}\right].$$

где \dot{c} – частота генерации трещин в единице объема.

Среднее время между двумя актами рождения трещин в единице объема материала найдется из формулы

$$\dot{c}^{-1} = \frac{\tau_0}{c^*} \exp\left[\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right].$$

Таким образом, основная круговая частота линейчатого спектра излучения из единицы объема материала ($2\pi / \dot{c}^{-1}$) равна:

$$\omega_1 = \frac{2\pi c^*}{\tau_0} \exp\left[\frac{\gamma\sigma - U_0}{kT}\right].$$

На первой стадии процесса разрушения эта частота может в зависимости от свойств материала, напряженного состояния и объема тела меняться от сотен герц до десятков килогерц. На второй стадии процесса, когда происходит лавинное разрушение и возрастание скорости генерации трещин на несколько порядков, основная частота возрастает до десятков-сотен килогерц и может

достигать частот, определяемых временем релаксации заряда τ_p^{-1} на берегах трещин, т.е. частот, находящихся в мегагерцевой области. Однако этот этап является по продолжительности очень кратковременным.

На рисунке 1 показаны линейчатые спектры электромагнитного излучения трещин, построенные для различных размеров трещин.

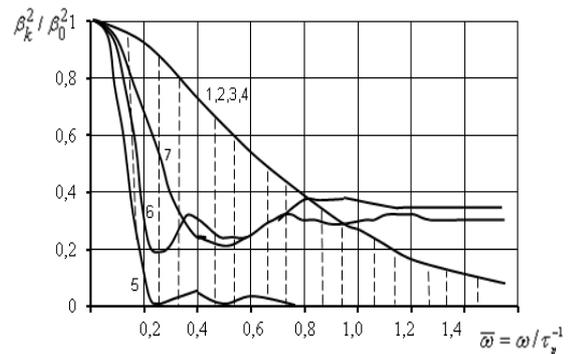


Рисунок 1 – Линейчатые спектры излучения при периодическом рождении трещин: β_k – коэффициенты разложения в ряд Фурье; 1, 2 – спектр электрической составляющей излучения для малых \bar{a}_{max} ; 3, 4 – спектр магнитной составляющей излучения для малых \bar{a}_{max} ; 5 – спектр магнитной составляющей излучения для $\bar{a}_{max} = 25$; 6 – спектр электрической составляющей излучения для $\bar{a}_{max} = 20$; 7 – спектр электрической составляющей излучения для $\bar{a}_{max} = 10$; основная частота процесса $\bar{\omega}_1 = \omega_1 / \tau_p^{-1} = 0,04$ выбрана исходя из скорости генерации микротрещин с частотой ~ 4 кГц

Таким образом, линейчатые спектры радиоизлучения трещин возникают вследствие рождения трещин в зоне очага разрушения с определенной частотой. Прием излучения может осуществляться как на этой основной частоте, так и на кратных ей частотах. С ростом скорости трещинообразования и локализацией разрушения вблизи сформированной макротрещины, основная частота уходит в мегагерцевую область спектра, что при приеме сигналов на фиксированной частоте может быть воспринято как кратковременное «затишье» непосредственно перед разрушением.

Теоретические исследования позволяют сделать вывод, что увеличение частоты следования импульсов перед разделением образца на части позволяет контролировать процесс разрушения и диагностировать приближение стадии разрушения материала.

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Пат. № 2145416 Российская Федерация G 01 N 29/14 Способ определения долговечности образцов из композиционных материалов при циклических нагрузках / В.И. Климов, В.В. Иванов, П.В. Егоров, Т.М. Черникова и др. – № 98113702/28; заявл. 09.07.1998; опубл.10.02.2000, Бюл. № 4.
3. 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.
4. 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.
5. Михайлова, Е.А. Контроль процесса разрушения композиционных материалов на основе изменения частоты импульсного электромагнитного излучения при нагружении / Е.А. Михайлова // Ползуновский вестник. – 2010. – №2. – С. 78-81.
6. Петров, В.А. Термодинамический подход к микромеханике разрушения твердых тел / В.А. Петров // Физика твердого тела. – 1983. – Т.25, в.10. – С. 3110 – 3113.
7. Куксенко, В.С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел / В.С. Куксенко // В сб. Физика прочности и пластичности. – Л.: Наука. – 1986. – С.36 – 41.
8. Харкевич, А.А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич.– М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1962. – 236 с.
9. Розанов, Ю.А. Случайные процессы / Ю.А. Розанов. – М.: Наука, 1971. – 286 с.
10. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
11. Журков, С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел / С.Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1968. – В.3. – С. 46 – 52.

Т.М. Черникова, к.т.н., доц., Кузбасский государственный технический университет, тел. (3842)39-63-63, chernika@kemtcl.ru; В.В. Иванов, д.т.н., профессор, Кузбасский государственный технический университет; Е.А. Михайлова, специалист 1 категории, Объединенное диспетчерское управление энергосистемами Сибири, г. Кемерово.

УДК 629.7

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА К ИССЛЕДОВАНИЮ ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ НИТРАТА АММОНИЯ

В.Н. Попок

В статье представлены результаты исследования термическими методами анализа (дифференциальная сканирующая калориметрия, дифференциально-термический анализ, термогравиметрический анализ, термомеханический анализ) фазовой стабильности различных марок нитрата аммония. Проведены циклические испытания образцов в интервале температур от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Установлено, что наиболее оптимальной маркой нитрата аммония в плане фазовой стабилизации является марка ЖВ.

Ключевые слова: дифференциальная сканирующая калориметрия, дифференциально-термический анализ, термогравиметрический анализ, термомеханический анализ, циклические испытания, нитрат аммония, полиморфные переходы.

Введение

Термические методы анализа, такие как дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), дифференциально - термический анализ (ДТА), термогравиметрический анализ (ТГА), термомеханический анализ (ТМА) позволяют определять такие термокинетические параметры исследуемых веществ и их смесей, как температурные интервалы полиморфных и фазовых переходов, температуры плавления и разложения, испарения и

соответствующие им тепловые эффекты, потерю массы в процессе нагревания (охлаждения), изменение линейных размеров в стационарных и нестационарных температурных условиях в различных газовых средах [1]. При этом современное оборудование, на котором внедрены эти методы исследования, позволяет проводить испытания с различными скоростями нагрева (охлаждения), различными массами исследуемых образцов, циклические