

На правах рукописи

Михайлова Екатерина Александровна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА
РАЗРУШЕНИЯ И ПРОГНОЗА ДОЛГОВЕЧНОСТИ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Иванов Вадим Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Маркин Виктор Борисович

доктор физико-математических наук,
профессор
Поляков Виктор Владимирович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт углехимии и химического
материаловедения СО РАН

Защита состоится 7 октября 2010 г. в 11 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.004.06 в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, ауд. 127.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Автореферат разослан 1 сентября 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Д.Е. Кривобоков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Технический прогресс настоящего времени был бы немыслим без широкого распространения полимерных композиционных материалов. Однако более чем полувековая практика использования этих материалов выявила существенный недостаток – прочностную усталость или старение, которое выражается в ухудшении их эксплуатационных свойств при воздействии механического напряжения, а также других физических и химических факторов.

Технико-экономическая эффективность применения новых конструкционных материалов во многом зависит от их прочности, жесткости и целостности при заданных режимах эксплуатации в течение всего срока службы. Поэтому вопрос контроля процесса разрушения и прогнозирования долговечности является одним из важнейших для решения задач материаловедения и важной частью проектирования различных конструкций. Известны случаи разрушения отдельных элементов конструкций по причине низкой достоверности прогнозирования их долговечности. Во многих странах практикуются длительные испытания композиционных материалов, по срокам соизмеримые со сроками службы изделий. Однако, этот путь весьма не оптимален. Поэтому становится понятным то особое место, которое занимают методы контроля процесса разрушения и прогноза долговечности, основанные на экспериментах ограниченной продолжительности. Эти методы позволяют на основе некоторых модельных представлений о механизмах разрушения и экспресс-испытаний образцов, осуществлять контроль разрушения материалов и давать надежную оценку долговечности изделий из полимерных композитов при различных режимах их эксплуатации.

Одним из таких методов является метод, основанный на регистрации импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ). Суть этого метода состоит в том, что на основе записи кинетической кривой накопления микроповреждений структуры (импульсов ЭМИ) композитов и из модельных представлений об этом процессе определяются кинетические константы разрушения, а затем рассчитывается ресурс долговечности изделий при различных режимах их эксплуатации. Однако в настоящее время отсутствует последовательное использование кинетических представлений для контроля процесса разрушения и прогноза долговечности полимерных композиционных материалов.

Метод электромагнитной эмиссии позволяет регистрировать отдельные импульсы электромагнитного излучения, определять их форму, оценивать время «проскока» микротрещины, скорость ее распространения в материале, регистрировать в реальном масштабе времени кинетику накопления микротрещин. Однако не исследованы ни частота, ни скорость генерации импульсов ЭМИ, ни стадийность процесса накопления микроповреждений структуры в полимерных композитах данным методом.

Изложенное свидетельствует об актуальности выбранной темы диссертационных исследований.

Идея работы заключается в использовании закономерностей накопления микрповреждений структуры композитов и особенностей частоты и скорости генерации импульсов ЭМИ для контроля процесса разрушения композитов и прогноза их долговечности.

Цель работы – совершенствование метода контроля процесса разрушения и прогноза долговечности полимерных композиционных материалов, основанного на возникновении импульсного ЭМИ, для проведения контроля стадий разрушения композитов и оперативного определения долговечности.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Разработать кинетическую модель накопления микрповреждений структуры композиционных материалов при сложных режимах нагружения, расширяющую температурный диапазон и учитывающую масштаб их разрушения.

2. Исследовать частоту, скорость генерации импульсов электромагнитного излучения, сопровождающего процесс рождения микрповреждений структуры полимерных композитов при различных режимах нагружения и стадийность процесса накопления микрповреждений.

3. Усовершенствовать метод контроля процесса разрушения и прогноза долговечности фенолоформальдегидных композиционных материалов на основе экспресс-испытаний образцов, учитывающий частоту и скорость генерации импульсов ЭМИ и сложные режимы нагружения.

Объектом исследования является процесс разрушения композиционных материалов.

Предметом исследования является совершенствование метода контроля процесса разрушения и прогноза долговечности композиционных материалов, основанного на регистрации импульсного ЭМИ.

Методы исследования

- анализ и обобщение научно-технической информации по методам исследования разрушения композиционных материалов;

- использование кинетической теории усталостной прочности и долговечности полимерных композиционных материалов, построенной на основе кинетической концепции прочности твердых тел акад. РАН С.Н. Журкова, теории размерностей и подобия, физики прочности композиционных материалов;

- системный анализ и обобщение результатов регистрации импульсного электромагнитного излучения при нагружении образцов композиционных материалов,

- методы математической статистики при обработке экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях, с использованием современного программного обеспечения.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

- предложена кинетическая модель накопления микрповреждений структуры полимерных композиционных материалов, отличающаяся от ранее известных тем, что она включает в себя скорректированное, не чувствительное к

масштабу разрушения кинетическое уравнение прочности (Журкова-Ратнера), кинетические константы разрушения материала, масштабные нечувствительные концентрационный критерий разрушения и условие необратимости накопления повреждений структуры материала;

- исследована частота и скорость генерации импульсов электромагнитного излучения, возникающего при нагружении фенолоформальдегидных композиционных материалов;

- исследовано влияние режимов нагружения, способов изготовления, термической обработки и состава полимерных композитов на кинетические константы их разрушения;

- усовершенствован метод контроля процесса разрушения и прогноза долговечности полимерных композитов на основе регистрации импульсного электромагнитного излучения при зарождении трещин, позволяющий осуществлять контроль процесса разрушения при любых неизотермических режимах нагружения и более точно определять долговечность композитов за счет возможности нагружения образцов с любой постоянной скоростью при разных значениях температуры. Контроль стадий разрушения осуществляется по частоте и скорости генерации импульсов ЭМИ, по кинетической кривой накопления импульсов определяются кинетические константы композитов \tilde{U}_0 , $\tilde{\gamma}$, определяется температура «размягчения» и рассчитывается долговечность материала.

Научные положения, выносимые на защиту:

- кинетическая модель накопления микрповреждений структуры полимерных композиционных материалов, включающая в себя нечувствительное к масштабу разрушения скорректированное кинетическое уравнение прочности Журкова, - Ратнера; условие необратимости разрушения и концентрационный критерий разрушения, адекватна экспериментальным данным на уровне достоверности 95% и позволяет с хорошей точностью определять число циклов до разрушения композитов, изготовленных на основе фенолоформальдегидных смол, при сложных неизотермических режимах нагружения;

- частота и скорость генерации импульсов ЭМИ зависят от величины приложенного напряжения, частота возникающего электромагнитного излучения уменьшается непосредственно перед разрушением, а скорость генерации импульсов растет; кинетические константы композитов \tilde{U}_0 и $\tilde{\gamma}$ зависят от состава, технологии изготовления, термообработки и способа нагружения композитов;

- метод контроля процесса разрушения и прогноза долговечности полимерных композиционных материалов состоит в нагружении образцов с любой постоянной скоростью при разных значениях температуры. Контроль процесса разрушения осуществляется по частоте и скорости генерации импульсов ЭМИ, по кинетической кривой накопления импульсов определяются кинетические константы \tilde{U}_0 , $\tilde{\gamma}$, определяется температура «размягчения» материала и рассчитывается долговечность материала.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций основывается на:

- использовании апробированных методов классической механики разрушения, физики прочности полимерных композиционных материалов, теории размерностей и подобия, методов статистического анализа и обработки экспериментальных результатов;

- удовлетворительном совпадении результатов теоретического расчета долговечности композиционных материалов, полученных по параметрам импульсной электромагнитной эмиссии при трещинообразовании, и результатов экспериментальных исследований;

- применении статистических критериев для оценки адекватности экспериментальных данных модельным представлениям.

Личный вклад автора состоит в исследовании частоты, скорости генерации ЭМИ, кинетических констант композитов и температуры «размягчения»; разработке численных методов обработки экспериментальных данных, их анализе и обобщении; совершенствовании метода контроля разрушения и прогноза долговечности композитов.

Научное значение работы состоит в разработке совокупности положений, позволяющих сформулировать кинетическую модель накопления микроразруждений структуры полимерных композитов, учитывающую масштаб разрушения и температуру «размягчения»; в установлении закономерностей изменения частоты и скорости генерации импульсов электромагнитного излучения композитов, находящихся под нагрузкой, которые способствуют углублению знаний о действии механического нагружения на материалы и расширению представлений о механизме генерации импульсного электромагнитного излучения композитов.

Практическая ценность работы определяется возможностью использования полученных результатов и усовершенствованного метода электромагнитного излучения для определения основных кинетических констант прочности на стадии изготовления и испытания композиционных материалов, контроля стадий разрушения по частоте и скорости генерации импульсов ЭМИ, а также для прогнозирования ресурса долговечности композитов.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты работы использованы при разработке автоматизированной системы измерений в Институте углехимии и химического материаловедения СО РАН при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка метода, оборудования и изучения динамики разрушения композитов на основе анализа электромагнитной эмиссии» в рамках Федеральной целевой программы «Разработка, восстановление и организация производства стратегических, дефицитных и импортозамещающих материалов и малотоннажной химии для вооружения, военной и специальной техники на 2009-2011 годы и на период до 2015 года».

На основе проведенных исследований разработан способ определения долговечности композиционных материалов при циклических нагрузках.

Научные результаты используются в учебном процессе в Кузбасском государственном техническом университете при подготовке студентов по специальности 130401 «Физические процессы горного или нефтегазового производства».

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были представлены на Международном симпозиуме Восточно-азиатских стран по полимерным композиционным материалам и передовым технологиям «Композиты XXI века» (Саратов, 2005); VI Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (Кемерово, 2005); XIII Всероссийской научно-технической конференции «Методы и средства измерений физических величин» (Нижний Новгород, 2005); Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, автоматизация» (Барнаул, 2006); Международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития`2007» (Одесса, 2007); VII Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (Кемерово, 2007). XII Международной научно-практической конференции "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири" (Кемерово, 2008); Второй международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире-2009» (Санкт-Петербург, 2009).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 14 работ, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов и заключения, изложенных на 137 страницах текста, содержит 40 рисунков, 12 таблиц, список литературы из 168 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе приведен обзор исследований различных научных школ проблемы контроля процесса разрушения и прогнозирования долговечности полимерных композиционных материалов. Представлены основные положения о разрушении как кинетическом процессе накопления микрповреждений.

Проблема контроля процесса разрушения и прогноза долговечности композитных материалов является в настоящее время одной из главных проблем материаловедения, поскольку составляет важнейшую часть проектирования различных конструкций.

Несмотря на многообразие подходов к контролю процесса разрушения и описанию долговечности полимеров и композитных материалов, они пока не могут с достаточной для инженерных расчетов точностью описать влияние изменения действующих напряжений, температуры, частоты нагружения на процесс разрушения материалов, особенно в сложных неизотермических условиях

нагружения. Однако отправной точкой всех современных исследований по вышеуказанной проблеме является представление об универсальном механизме образования элементарных повреждений материалов.

Наиболее универсальной моделью элементарного акта разрушения и перехода процесса накопления микроповреждений структуры материалов на стадию макроскопического разрушения является кинетическая модель С.Н. Журкова. Она опирается на наиболее общие кинетические закономерности разрушения, присущие всем материалам. Однако широкому ее использованию при контроле разрушения и прогнозе долговечности полимерных композитных материалов в сложных условиях нагружения препятствует отсутствие систематических исследований данной проблемы. И главным препятствием на пути решения проблемы контроля разрушения и прогноза долговечности композиционных материалов является отсутствие простого и надежного экспресс – метода определения кинетических констант разрушения.

Классическая методика определения кинетических констант разрушения С.Н. Журкова состоит в длительных испытаниях образцов композитов при различных температурах. При этом на результаты обработки экспериментальных данных существенное влияние оказывают вариации физико-механических свойств материала от образца к образцу. Существующий метод определения кинетических констант разрушения образцов горных пород, напрямую неприменим для полимерных композитов в силу существования температуры «размягчения» и зависимости кинетических параметров таких материалов от температуры. Наиболее простыми и надежными методами исследования кинетического процесса накопления микротрещин в материалах являются методы электромагнитной и акустической эмиссии.

Метод электромагнитной эмиссии позволяет регистрировать отдельные импульсы электромагнитного излучения, определять их форму, оценивать время «проскока» микротрещины, скорость ее распространения в материале, регистрировать в реальном масштабе времени кинетику накопления микротрещин.

Проведенный анализ существующих методов контроля процесса разрушения и оценки долговечности в условиях простого нагружения при различных температурах показал, что, несмотря на многообразие подходов к описанию процесса разрушения и определения долговечности полимеров и композиционных материалов, они пока не описывают с достаточной для инженерных расчетов точностью поведение материалов во всем диапазоне изменения напряжений и температур, особенно при малых напряжениях и малых временах, когда скорость нагружения сопоставима со скоростью звука в исследуемом материале.

Кроме того, по результатам рассмотренных литературных данных можно сделать вывод, что применение существующих методов контроля процесса разрушения и оценки долговечности нередко связано с необходимостью больших временных и финансовых затрат. Поэтому совершенствование методов контроля процесса разрушения и прогноза долговечности изделий из композиционных материалов должно идти по пути сокращения трудоёмкости работ, сокращения времени и финансов, для чего необходимо развивать бесконтактные

экспресс-методы, не требующие внедрения в объем материала. В связи с этим представляется перспективным развитие методов контроля процесса разрушения, основанных на регистрации импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ). Проведение подобных исследований способствовало бы развитию теории разрушения, позволило бы проводить более точную и достоверную диагностику состояния материалов в конструкциях, особенно при циклических нагрузках, т.к. при практическом использовании композиты чаще подвергаются именно таким нагрузкам.

В заключении первой главы на основе анализа рассмотренных работ сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведена теоретическая модель накопления микроповреждений структуры и импульсного электромагнитного излучения полимерных композиционных материалов при их нагружении.

В качестве кинетической модели накопления микротрещин и формирования очага разрушения использовалась модель, обобщающая кинетические представления, развиваемые школой академика С.Н. Журкова. Кинетическая модель включает в себя уравнение для скорости трещинообразования, концентрационный критерий разрушения и условие необратимости разрушения Бейли. Однако этой модели присущи некоторые недостатки. А именно: узкий температурный диапазон и отсутствие в модели масштабной зависимости времени до разрушения испытываемых образцов от их размера.

Устранить данные недостатки позволяет учет зависимости кинетических констант разрушения от температуры:

$$\tilde{U}_0 = U_0(1 - T/T_m) \quad (1)$$

$$\tilde{\gamma} = \gamma(1 - T/T_m), \quad (2)$$

где T – температура, К; T_m – температура, близкая к температуре размягчения фенолоформальдегидных композиционных материалов; U_0 – энергия активации разрушения; γ – структурно-чувствительный коэффициент.

Для устранения другого недостатка рассмотрено механическое подобие процессов разрушения на разных масштабных уровнях, исходя из основных представлений теории размерностей и подобия.

Получено, что кинетическая модель накопления повреждений структуры композитов для сложных неизотермических условий нагружения имеет следующий вид:

$$\dot{N}(t) = \frac{N^*}{\tau_0 L_c^{i-5}} \exp\left[\frac{(\tilde{\gamma}\sigma(t) - \tilde{U}_0)}{kT}\right], \quad (3)$$

$$\frac{(N^*/V)^{-1/3}}{\ell} \cong e \quad (4)$$

$$\int_0^{\tau_i} \frac{N^*}{\tau_0 L_c^{i-5}} \exp\left[\frac{(\tilde{\gamma}\sigma(t) - \tilde{U}_0)}{kT}\right] dt = N^*, \quad (5)$$

где N^* – критическая концентрация трещин с размером ℓ на i -том масштабном уровне разрушения; V – объем очага разрушения; $L_c=21,5$ – масштабный коэффициент; $\tau_0 \cong 10^{-13}$ с – период тепловых колебаний атомов, k – постоянная Больцмана; τ_i – время до разрушения на i -том масштабном уровне; $\sigma(t)$ – приложенное напряжение.

Уравнение (3) представляет собой скорректированное кинетическое уравнение С.Н. Журкова для скорости трещинообразования, уравнение (4) есть концентрационный критерий разрушения, а уравнение (5) – условие необратимости накопления повреждений структуры материала.

Поскольку $\tilde{\gamma}_i = \gamma(1 - T_i / T_m)$, $\tilde{U}_{0i} = U_0(1 - T_i / T_m)$, то параметры T_m, γ, U_0 для каждого материала могут быть найдены из эксперимента по методу наименьших квадратов из выражений:

$$U_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^S T_i\right)\left(\sum_{i=1}^S \tilde{U}_{0i} T_i\right) - \left(\sum_{i=1}^S \tilde{U}_{0i}\right)\left(\sum_{i=1}^S T_i^2\right)}{\left(\sum_{i=1}^S T_i\right)^2 - S\left(\sum_{i=1}^S T_i^2\right)}, \quad (6)$$

$$T_m = U_0 \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^S T_i\right)^2 - S\left(\sum_{i=1}^S T_i^2\right)\right]}{\left[S\sum_{i=1}^S (\tilde{U}_{0i} T_i) - \left(\sum_{i=1}^S T_i\right)\left(\sum_{i=1}^S \tilde{U}_{0i}\right)\right]}, \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^S \tilde{\gamma}_i (1 - T_i / T_m)}{\sum_{i=1}^S (1 - T_i / T_m)^2}, \quad (8)$$

где S – число испытаний образцов при различных температурах T_i ; U_0, γ – кинетические константы разрушения, экстраполируемые для абсолютного нуля температуры.

Кинетическая модель (3) – (5) нечувствительна к масштабному уровню разрушения, учитывает подобие процессов разрушения на разных уровнях, а кинетические константы \tilde{U}_0 и $\tilde{\gamma}$, найденные на образцах для пятого масштаб-

ного уровня разрушения, могут быть использованы в различных условиях нагружения (объемное, одноосное сжатие-растяжение) для прогноза разрушения на любом иерархическом уровне.

Показано также, что кинетические константы разрушения материала для определённой температуры могут быть определены экспресс - испытаниями образцов при циклическом нагружении путём регистрации числа накопленных микроповреждения структуры материала (числа импульсов ЭМИ) на нескольких первых циклах нагружения.

В третьей главе приведены результаты теоретических исследований параметров импульсов и частоты электромагнитного излучения при разрушении композитов.

Сделаны выводы, что импульсы радиоизлучения при распространении трещины имеют характерную колоколообразную форму, обусловленную ростом дипольного момента и заряда в её вершине в процессе движения и релаксацией зарядов – после остановки.

Основной частотой, которая определяет протяженность спектра и частотный диапазон излучения, является частота, определяемая временем релаксации (τ_p^{-1}) заряда на берегах трещины. Для малых трещин их приведенный размер $\bar{a}_{\max} = \tau_n / \tau_p$ практически не влияет на протяженность спектра и форму спектральной плотности. При больших \bar{a}_{\max} приведенный размер влияет на величину условного периода колебаний спектральной плотности в её затухающей части и определяет величину затухания излучения в области частот $0 \div \tau_p^{-1}$. В этой области значений \bar{a}_{\max} наблюдается сжатие спектральной характеристики в сторону малых частот с ростом \bar{a}_{\max} .

В четвертой главе приведены результаты исследования особенностей импульсного ЭМИ при разрушении фенолоформальдегидных композиционных материалов, которые нашли широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства (радио- и электротехника, машиностроение, горное дело, строительство). Исследовались порошковые фенопласты Т214, О203, Т250, Т266, Т110, О122 и текстолиты ПТК, ПТМ, ПТН, изготовленные в соответствии с техническими условиями.

Исследования образцов композиционных материалов проводились на установке (рис.1), позволяющей регистрировать импульсы электромагнитной эмиссии длительностью от 0,1 мкс до 100 мс, записывать их форму, определять характеристики каждого отдельного импульса, время нарастания, время релаксации зарядов, считать полное число импульсов за определенный промежуток времени, регистрировать частоту ЭМИ, записывать диаграмму нагружения, отслеживать кинетику процесса накопления повреждаемости структуры на основе счета импульсов электромагнитной эмиссии.

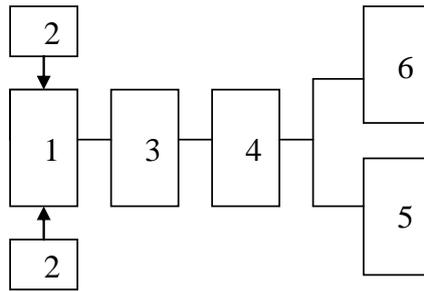


Рис 1. Блок-схема лабораторной установки для изучения разрушения образцов методом ЭМИ: 1 – экранированная ячейка с образцом и датчиком электромагнитной эмиссии; 2 – нагружающее устройство; 3 – блок фильтров; 4 – широкополосный усилитель; 5 – запоминающий осциллограф; 6 – счетчик импульсов, частотомер

Приведены результаты исследования частоты импульсного ЭМИ композиционных материалов, полученные при одноосном нагружении образцов и синхронной регистрации нагрузки и импульсов ЭМИ. Нагружение образцов производилось со скоростью 10^5 - 10^6 Па/с. Измерение и обработка результатов эксперимента состояли из получения осциллограмм импульсов ЭМИ, регистрации их количества и характеристик нагружения; получения зависимостей частоты ЭМИ от разрушающей нагрузки и последующим их анализом.

При исследовании частоты возникающего электромагнитного излучения установлено, что для различных образцов диапазон частот отличается, однако, можно выделить три стадии разрушения образцов композиционных материалов. Например, для образца фенопласта О122 на первой стадии I (до $0,6 \sigma_p$) импульсы ЭМИ регистрируются на частотах до 670 кГц. Это характеризует начало разрушения и образования микротрещин (рис.2).

На этой стадии по мере роста нагрузки увеличивается максимальная амплитуда импульсов. Частота сначала увеличивается, а к концу стадии снижается. Это связывается с этапом зарождения микротрещин.

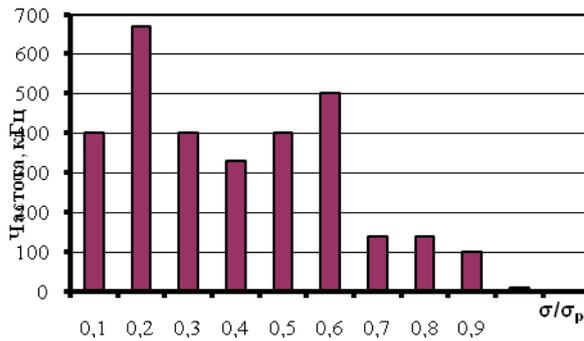


Рис.2. Изменение частоты ЭМИ фенопласта O122

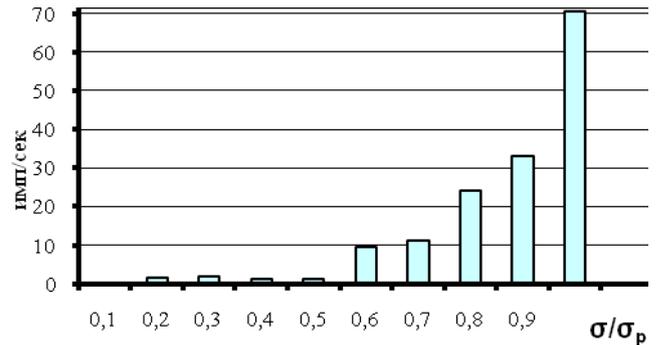


Рис.3. Изменение скорости генерации импульсов ЭМИ фенопласта O122

Вторая стадия – II соответствует нагрузкам 0,6-0,9 σ_p . На данной стадии импульсы регистрируются на частотах ~ 150 кГц. Это связано с накоплением микротрещин и слиянием их в более крупные трещины. Амплитуда сигнала электромагнитного излучения при возникновении более крупных трещин увеличивается, а частота, будучи обратно пропорциональной размеру трещин, снижается.

Третья стадия III (0,9-0,99 σ_p) соотносится с процессом формирования зоны магистральной трещины и нарушением сплошности образца. Частота импульсов ЭМИ уменьшается до 10 кГц.

Как следует из результатов эксперимента, в процессе нагружения частота импульсного электромагнитного излучения изменяется. Перед непосредственным разрушением образца (при 0,90- 0,99 σ_p) наблюдается снижение частоты ЭМИ.

Для образцов текстолитов ПТН, ПТМ, ПТК также наблюдается аналогичная зависимость частоты импульсов ЭМИ от нагрузки. Но происходит некоторое смещение первого этапа в область более низких нагрузок. Для образцов текстолита первый этап наблюдается при нагрузках до 0,2 σ_p , второй этап: 0,2-0,4 σ_p , третий этап 0,5- 0,99 σ_p .

В главе также приведены исследования изменения скорости генерации импульсов ЭМИ при нагружении композитов.

На начальном этапе нагружения импульсы выделяются с «низкой» скоростью генерации (до 30 имп/с). Затем, при достижении нагрузки $\sim (0,6-0,9)\sigma_p$, скорость генерации импульсов увеличивается до 60 имп/с, а при нагрузках $\sim (0,9-0,99)\sigma_p$ скорость генерации импульсов увеличивается до 200 имп/с.

При сравнении полученных зависимостей с зависимостями изменения частоты ЭМИ можно отметить, что малой скорости генерации импульсов (до нагрузок $\sim 0,6\sigma_p$) соответствуют высокочастотные импульсы. На следующей стадии скорость генерации импульсов увеличивается, но при этом уменьшается их частота. На третьей стадии, когда существенно снижается несущая способность образца, скорость генерации импульсов резко возрастает, снижаются со-

ответствующие им частоты, и появляются импульсы самой низкой частоты (рис.2,3).

На характер зависимостей скорости генерации импульсов ЭМИ от величины приложенной нагрузки влияют такие факторы, как термообработка, технология изготовления, а для текстолитов – ориентация волокон относительно действующего напряжения.

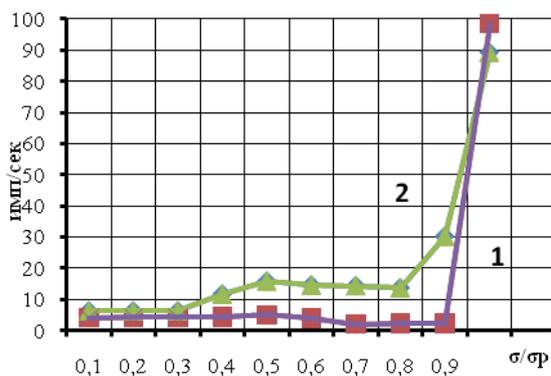


Рис.4. Совмещенный график скорости генерации импульсов ЭМИ для образцов фенопласта T266, подвергнутых термообработке(1) и без неё (2)

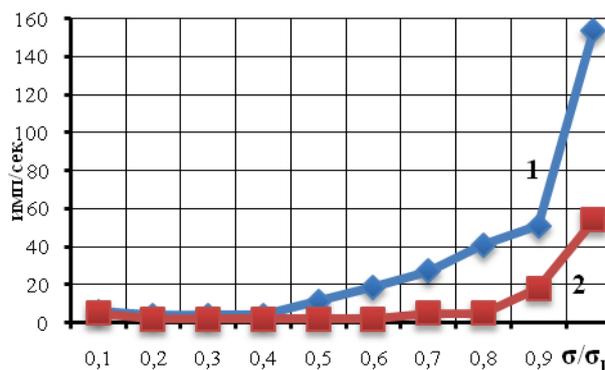


Рис.5. Скорость генерации импульсов ЭМИ для текстолита ПТМ, нагружаемого поперек слоев (1) и вдоль слоев (2)

Для образцов, подвергнутых термообработке, характерна более «низкая» скорость генерации импульсов в процессе всего нагружения, но непосредственно перед разрушением скорость генерации импульсов в них несколько больше, чем у образцов без термообработки (рис.4).

Скорость генерации импульсов ЭМИ для образцов, изготовленного пресованием, в течение всего нагружения больше, чем у образцов, изготовленных литьевым способом.

При нагружении поперек слоев текстолитов ПТМ и ПТН скорость генерации импульсов больше, чем при нагружении вдоль слоев (рис.5). При нагружении вдоль слоев выделение импульсов происходит с «низкой» скоростью до нагрузок $\sim 0,8\sigma_p$. Далее наблюдается некоторое увеличение скорости генерации импульсов ЭМИ и образец разрушается.

Из анализа сигналов ЭМИ следует, что по мере приближения состояния образца к моменту нарушения сплошности, во-первых, скорость генерации импульсов ЭМИ увеличиваются, а спектр излучения сдвигается в низкочастотную область. Так, если в интервале нагрузок до $\sigma = 0,6\sigma_p$ сигналы ЭМИ регистрируются в частотном диапазоне до 1000 кГц, а скорость генерации достигает 30 имп/с, то при нагрузке $\sigma > 0,6\sigma_p$ происходит уменьшение частоты сигналов до 100 кГц и скорость генерации импульсов увеличивается до 60 имп/с, а далее (при $\sigma > 0,9\sigma_p$) частота снижается до 10 кГц, скорость генерации увеличивается

до 200 имп/с. Таким образом, смещение частоты ЭМИ в область низких частот и увеличение скорости генерации импульсов перед разделением образца на части позволяет диагностировать приближение к стадии его разрушения.

Исследование долговечности показало, что 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 микротрещин, 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.

Кроме того, проведенный анализ кинетических констант разрушения фенопластов, полученных по кинетическим кривым накопления импульсов электромагнитного излучения в режимах одноосного растяжения, одноосного сжатия и циклических нагрузок позволяет сделать вывод о согласии результатов для кинетических констант разрушения исследованных материалов, полученных при различных режимах нагружения, на высоком уровне значимости.

В главе приведен расчет долговечности (определено число циклов до разрушения) для различных типов материалов и установлено их удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными.

Приведенные в главе результаты проверки по F-критерию Фишера адекватности модели при 5 % уровне значимости свидетельствуют, что предлагаемая модель накопления микроповреждений структуры композита находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными и может быть использована для контроля процесса разрушения и определения числа циклов до разрушения композиционных материалов.

В пятой главе предлагается метод контроля процесса разрушения, основанный на измерении частоты и скорости генерации импульсов ЭМИ, и способ прогноза долговечности композиционных материалов, основанный на разработанной модели накопления числа микроповреждений, представленной во второй главе. Способ позволяет повысить точность и уменьшить трудоемкость процесса (определения долговечности) композиционных материалов.

Усовершенствованный метод контроля процесса разрушения и прогноза долговечности композиционных материалов заключается в следующем.

1. Образец испытывается на лабораторной установке. При непрерывном наблюдении процесса разрушения материала регистрируют возникающее электромагнитное излучение.

2. По измеренным параметрам определяют частоту ЭМИ и скорость генерации импульсов для данного момента времени.

3. Сравнивая полученные значения частоты и скорости генерации ЭМИ с табличными значениями этих величин для данного материала, можно определить на какой стадии разрушения находится образец.

4. По измеренным параметрам: количеству импульсов ЭМИ N_i , возникающему в образце за первый цикл нагружения, амплитуде нагружения, частоте нагружения определяются энергия активации разрушения \tilde{U}_0 и структурно-чувствительный коэффициент $\tilde{\gamma}$, исходя из которых находятся средние значения кинетических констант разрушения для данного композиционного материала.

5. Определяют число циклов до разрушения образца (долговечность), используя формулу:

$$n_{\text{ц}} = \frac{\tau_0 \gamma \sigma_A f L_c \exp\left(\frac{\tilde{U}_0}{kT}\right)}{\exp\left(\frac{\tilde{\gamma} \sigma_A}{kT}\right) - 1}. \quad (9)$$

Для исследуемых фенопластов установлено, что если частота излучения ЭМИ в диапазоне 500-1000 кГц (до 0,6 σ_p) и скорость генерации импульсов имеет значение до 30 имп/с образец находится на первой стадии разрушения. Диапазон частот в пределах 100-500 кГц, а скорость генерации импульсов в пределах 30-60 имп/с (при нагрузках (0,6-0,9) σ_p) характеризует вторую стадию процесса разрушения. Когда же частота снижается до ~10 кГц, а скорость генерации импульсов возрастает до 200 имп/с образец находится в предразрушающей стадии.

При использовании формулы (9) и полученных кинетических констант, возможно рассчитать число циклов до разрушения композитных материалов при любых заданных значениях температуры, частоты нагружения, амплитудной нагрузки и заданном масштабном коэффициенте.

Предложенный способ имеет ряд преимуществ, которые заключаются в том, что скорость нагружения выбирается любой. Это дает возможность повысить точность определения \tilde{U}_0 , $\tilde{\gamma}$ т.к. не пренебрегают единицей в уравнении (9). Кроме того, снижается влияние температурных эффектов, что также повышается точность определения \tilde{U}_0 , $\tilde{\gamma}$, а, следовательно, и число циклов до разрушения материала. Нагружение образца производится только при возрастающей нагрузке. Это позволяет не выполнять полный цикл нагружение-разгрузка при циклическом испытании, что дает возможность, не снижая точности определения числа циклов до разрушения материала образцов, избежать трудоемких испытаний.

В главе рассмотрена также возможность использования предлагаемого метода в натуральных условиях (на угольных шахтах) для контроля процесса разрушения кровли горной выработки, упрочненной скрепляющим составом на основе фенолоформальдегидной смолы.

Применение упрочняющих составов обеспечивает надежное укрепление неустойчивых пород, полностью исключает аварийные остановки, связанные с куполообразованием и вывалами пород и угля, повышает безопасность труда.

Установлено, что скорость генерации импульсов ЭМИ в упрочненных объемах горных выработок соответствует уровню генерации импульсов, полученному в лабораторных условиях. При этом, переход контролируемого параметра, например, скорости генерации импульсов ЭМИ, к опасному интервалу (что соответствует $\sim 0,9\sigma_p$ для лабораторных образцов), характеризует наступление предразрушающей стадии и возможности вывалов пород и угля.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования метода контроля процесса разрушения упрочненным скрепляющим составом горных выработок, что повышает безопасность труда.

Совершенствование метода ЭМИ и его использование на стадии изготовления композитов способствует повышению качества и надежности выпускаемой продукции. Применение метода ЭМИ для контроля процесса разрушения увеличивает безопасность различных техногенных объектов и увеличивает срок их службы.

Предлагаемый усовершенствованный метод позволяет производить контроль стадий разрушения материала, повысить точность определения кинетических констант и числа циклов до разрушения материала, а также повысить производительность и снизить трудоемкость контроля разрушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи совершенствования метода контроля процесса разрушения и прогноза долговечности композиционных материалов на основе регистрации импульсного электромагнитного излучения при их нагружении, заключающееся в оперативном проведении контроля разрушения, значительном снижении трудоемкости определения числа циклов до разрушения, и имеющее существенное значение для химической, горнодобывающей и оборонной отраслей промышленности страны.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработанная кинетическая модель накопления микроповреждений структуры полимерных композитных материалов и импульсного электромагнитного излучения, включающая в себя кинетическое уравнение для скорости микротрещинообразования С.Н. Журкова – С.Б. Ратнера, скорректированное для любого масштабного уровня разрушения, концентрационный критерий разрушения и условия необратимости накопления микротрещин, позволяет определить число циклов до разрушения полимерных композитных материалов при любом неизотермическом циклическом нагружении образцов. При этом данная модель нечувствительна к масштабу разрушения и применима к образцам материалов любых линейных размеров.

2. Впервые теоретически и экспериментально исследована частота импульсного электромагнитного излучения фенопластов и текстолитов. Перед непосредственным разрушением образцов фенопластов (при 0,90- 0,99 σ_p) наблюдается снижение частоты ЭМИ. Смещение частоты ЭМИ в область низких частот перед разделением образца на части позволяет диагностировать приближение к стадии его разрушения.

3. Впервые исследована скорость генерации импульсов электромагнитного излучения при разрушении фенопластов и текстолитов. При этом установлено, что для всех образцов скорость генерации импульсов ЭМИ резко увеличивается непосредственно перед разрушением. Для рассматриваемых порошковых фенопластов и текстолитов на характер зависимостей скорости генерации импульсов от величины приложенной нагрузки влияют такие факторы, как технология изготовления, термообработка, а также ориентация волокон относительно действующего напряжения.

4. Установлено, что кинетические константы \tilde{U}_0 и $\tilde{\gamma}$ зависят от способа нагружения: средние значения энергии активации разрушения полимерных композитов в режиме растяжения оказываются меньше, чем в режиме сжатия, что обусловлено локальным ростом температуры в зоне пластического течения образцов при растяжении, средние же значения структурно-чувствительного коэффициента при растяжении оказываются в 3-4 раза больше, чем при сжатии, что связано с различием пределов прочности композитов на растяжение и сжатие.

5. На основе проведенных исследований предложен совершенствованный метод контроля процесса разрушения и прогноза долговечности композиционных материалов, заключающийся в том, что по частоте и скорости генерации импульсов ЭМИ проводится контроль стадийности разрушения, по параметрам импульсов определяются кинетические константы \tilde{U}_0 , $\tilde{\gamma}$ и рассчитывается число циклов до разрушения. Отличительной особенностью метода является возможность контроля разрушения по измерениям частоты и скорости генерации импульсов ЭМИ, повышенная информативность, высокая производительность контроля.

6. Предложен способ определения числа циклов до разрушения образцов композиционных материалов при циклических нагрузках, основанный на разработанной модели накопления повреждений структуры композиционных материалов, заключающийся в том, что образец нагружают с постоянной скоростью, не вызывающей заметное изменение температуры, вплоть до разрушения. При этом регистрируют число импульсов электромагнитной эмиссии за фиксированный промежуток времени. По измеренным параметрам определяют кинетические константы прочности, температуру «размягчения» и рассчитывают долговечность материала при циклических нагрузках.

7. Результаты проверки адекватности модели при 5 % уровне значимости по F- критерию Фишера свидетельствуют, что предлагаемая модель накопления микрповреждений структуры материала находится в хорошем соответствии с

экспериментальными данными и может быть использована для определения числа циклов до разрушения композиционных материалов.

8. Предложенный метод использован в Институте углехимии и химического материаловедения СО РАН при разработке автоматизированной системы измерений. Эффективность разработанного метода подтверждена результатами его использования для оценки физико-механических свойств образцов при проведении исследований по изучению разрушения композиционных материалов в научно-исследовательской лаборатории кафедры теоретической и геотехнической механики КузГТУ.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы

в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Черникова, Т. М. Исследование усталостной прочности материалов при циклических нагрузках / Т. М. Черникова, В. В. Иванов, В. И. Климов, Е. А. Михайлова // Вест. КузГТУ.– 2005. – № 2. – С. 73-75.

2. Черникова, Т. М. О кинетике разрушения материалов при их растяжении / Т. М. Черникова, В. В. Иванов, Е. А. Михайлова // Вест. КузГТУ.– 2005. – № 2. – С. 75-77.

3. 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.

в прочих изданиях

4. Черникова, Т. М. Использование метода ЭМИ в качестве эффективного средства для исследования разрушения материалов / Т. М. Черникова, В. В. Иванов, Е. А. Михайлова // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Измерение, контроль, автоматизация» ИКИ-2006.– Барнаул: АлтГТУ, 2006. – С 43-45.

5. Черникова, Т. М. Совершенствование метода прогноза долговечности материалов на основе экспресс-испытаний образцов / Т. М. Черникова, В. В. Иванов, Е. А. Михайлова // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: матер. VII Междунар. науч.-практ. конф.- Т.1. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2007 – С. 177-178.

6. Черникова, Т. М. Бесконтактный контроль разрушения материалов / Т. М. Черникова, В. В. Иванов, Е. А. Михайлова // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф.- Т.1. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2007 – С. 220-222.

7. Черникова, Т. М. О контроле разрушения материалов на основе спектрального анализа ЭМИ / Т. М.Черникова, В. В.Иванов, Е. А.Михайлова // "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири": материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2008 – С. 145-146

8. Черникова, Т. М. Анализ импульсного электромагнитного излучения, возникающего при нагружении композитов / Т. М. Черникова, В. В. Иванов, В. И. Климов, Е. А. Михайлова // Доклады Междунар. симпоз. «Композиты XXI века». – Саратов: Изд-во Саратовского гос. техн. ун-та, 2005. – С. 372-376.

9. Черникова, Т. М. Исследование формы импульсов электромагнитного излучения при разрушении материалов / Т. М. Черникова, В. В. Иванов, Е. А. Михайлова // Сб. научн. трудов по материалам междунар. науч.-практич. конф. «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития. `2007». – Т.1. – Одесса: Черноморье, 2007. – С. 50-52.

10. Черникова, Т. М. Спектры электромагнитного излучения при разрушении материалов / Т. М. Черникова, В. В. Иванов, В. И. Климов, Е. А. Михайлова // Докл. междунар. симпоз. «Композиты XXI века». – Саратов: Изд-во Саратовского гос. техн. ун-та, 2005. – С. 367–371.

11. Иванов, В. В. Спектральный анализ электромагнитного излучения при разрушении горных пород / В. В. Иванов, Е. А. Михайлова // Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах». – Кемерово: Изд-во ГУ КузГТУ, 2005. – С. 166-168.

12. Черникова, Т. М. Об использовании в методе ЭМИ спектрального анализа излучения / Т. М. Черникова, В. В. Иванов, Е. А. Михайлова // Тез. докл. XIII Всерос. науч.-техн. конф. «Методы и средства измерений физических величин». – Нижний Новгород: ННИМЦ «Диалог», 2005. – С. 19.

13. Черникова, Т. М. Спектральный анализ электромагнитного излучения при нагружении материалов / Т. М. Черникова, В. В. Иванов, Е. А. Михайлова // Сб. научн. трудов по материалам междунар. науч.-практ. конф. «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте`2007». – Т.1.- Одесса: Черноморье, 2007. – С. 86-87.

14. Михайлова, Е. А. Об измерении интенсивности ЭМИ при нагружении композитов / Е. М. Михайлова, Т.М. Черникова.// Сб. науч. тр. междунар. научн.-практ. конф. «Измерения в современном мире-2009». – СПб: Изд-во политехн. ун-та, 2009. – С. 43-45.

Подписано в печать 30.08.2010

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 752.

ГУ Кузбасский государственный технический университет.

650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография ГУ Кузбасский государственный технический университет.

650099, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А.