

В.В. Иванов, П.В. Егоров, В.И. Климов, Л.А. Колпакова,  
А.А. Мальшин, Л.Ф. Туголукова, В.В. Юнников,  
В.П. Бервено

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПРОЧНОСТИ  
И КРИТИЧЕСКОГО РАЗМЕРА РАЗРУШЕНИЯ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ  
РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПРИ ИХ РАЗРУШЕНИИ

В основе кинетической концепции твердых тел в поле механических напряжений лежит термофлуктуационная теория прочности С.Н. Журкова [1].

Согласно этой теории, время до разрушения тела  $\tau$  при растягивающем напряжении  $\sigma$  и абсолютной температуре  $T$  подчиняется уравнению

$$\tau = \tau_0 \exp \left( \frac{U_0 - v\sigma}{kT} \right),$$

где  $U_0$  — энергия межатомной связи;  $\tau_0$  — период атомных колебаний;  $v$  — активационный объем.

Детальное изучение процесса разрушения показало, что за время  $\tau$  в теле генерируются трещины со скоростью [2]

$$(1) \quad \dot{N} = \dot{N}_0 \exp \left( - \frac{U_0 - v\sigma}{kT} \right).$$

Стационарное ( $\dot{N} = \text{const}$ ) накопление трещин осуществляется лишь до определенной границы  $N^*$ , за которой следует стадия ускоренного накопления, завершающаяся разрывом образца [2].

Экспериментально установлено, что граничное значение  $N^*$  подчиняется концентрационному критерию

$$N^{*-1/3} / L = K^*.$$

Здесь  $K^*$  — безразмерная константа, лежащая для разных материалов в пределах от 2,1 до 6;  $L$  — средний размер накапливающихся микротрещин;  $N^*$  — количество трещин в единице объема.

В случае изменяющегося во времени напряжения время до разрушения испытуемого образца ориентировочно можно определить, приняв условия необратимости накопления повреждаемостей Бейли [3], которое вытекает из факта необратимости процесса разрушения при непрерывном нагружении:

$$(2) \quad \int_0^{\tau} \dot{N} dt = N^*.$$

Будем предполагать, что при накоплении и быстром распространении микротрещин в процессе разрушения имеет место локальное равновесие малых объемов поверхности разрушения в силу того, что микроскопически малые части системы приходят в равновесное состояние значительно раньше, чем устанавливается равновесие между этими малыми частями.

В силу этого, хотя вся совокупность частиц вновь образованной поверхности разрушения и не находится в равновесии, можно говорить о локальном равновесии в микроскопически небольших частях поверхности, характеризуя их определенными температурой, химическим потенциалом и другими термодинамическими параметрами.

Учитывая эти предложения, первый постулат термодинамики необратимых процессов для нагружаемого тела запишем в виде

$$(3) \quad \dot{A} = \int_{(S_1)} \sigma_{ij} \dot{u}_i n_j dS_1 = \dot{U} - T\dot{S} + 2\gamma\dot{\Sigma} + \dot{\mathcal{E}} + \dot{K},$$

где  $\sigma_{ij}$  — компоненты тензора механических напряжений на внешней границе тела  $S_1$ ;  $\dot{u}_i$  — компоненты скоростей смещения границы тела;  $T$  — абсолютная температура тела;  $S$  — скорость изменения энтропии тела;  $\dot{\mathcal{E}}$ ,  $\dot{K}$  — скорости роста энергии вторичного электромагнитного поля и кинетической энергии частиц тела;  $\dot{U}$  — скорость изменения внутренней энергии тела;  $\dot{\Sigma}$  — скорость необратимого роста поверхности разрушения тела.

В уравнении (3) в соответствии с правилом Эйнштейна осуществляется суммирование по повторяющимся индексам  $i, j$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ).

Если в процессе возникновения новых микротрещин — поверхностей разрушения — на внешней нагружаемой границе тела выполняется условие  $u_i = 0$ , т.е.  $\dot{u}_i = \text{const}$ , уравнение (3) может быть переписано следующим образом:

$$(4) \quad \frac{dF}{dt} = -2\gamma\dot{\Sigma} - \dot{K} - \dot{\mathcal{E}} - \dot{S}T$$

( $F = U - TS$  — свободная энергия тела).

Уравнение (4) в силу условий  $\dot{\Sigma} > 0$ ,  $\dot{K} > 0$ ,  $\dot{\mathcal{E}} > 0$ ,  $\dot{T} > 0$  указывает направление термодинамического процесса разрушения — процесс образования новой поверхности разрушения идет в направлении убыли свободной энергии тела. Состоянию термодинамического равновесия отвечает минимум

свободной энергии тела, так как  $\frac{dF}{dt} < 0$ . Введем теперь по аналогии с [4],

исходя из уравнения (3), удельную объемную работу разрушения  $A^*$  по формуле

$$A^* = \frac{A}{V}$$

( $V$  — объем разрушаемого тела).

Тогда формула (3) после интегрирования по времени примет вид

$$(5) \quad A^*V = A = 2\gamma_{\text{эфф}}\Sigma,$$

где  $A$  — полная работа разрушения тела;  $\Sigma$  — полная поверхность разрушения, включающая поверхность накопленных за время нагружения микроскопических трещин;  $\gamma_{\text{эфф}}$  — эффективная поверхностная энергия разрушения, включающая в себя энергию единицы поверхности вновь образованных трещин, энергию электромагнитного поля, возникающего в процессе разрушения, потери тепла и другие компоненты потерь, приведенных к единице вновь образованной поверхности разрушения.

Предполагая, как и в [4], что величины  $A^*$  и  $\gamma_{\text{эфф}}$  являются для данного материала заданными, можно ввести линейный размер  $d^*$  по формуле

$$(6) \quad d^* = \frac{\gamma_{\text{эфф}}}{A^*}.$$

Естественно этот размер назвать критическим размером разрушения тела. Используя введенные формулами (5), (6) параметры  $A^*$ ,  $\gamma_{\text{эфф}}$  и  $d^*$ , критическому размеру разрушения можно придать вполне конкретный физический смысл.

Действительно, поскольку микротрещина радиуса  $r$  освобождает от напряжений объем разрушаемого тела порядка  $(4/3)\pi r^3$ , то в этом случае полная работа разрушения

$$(7) \quad A = VA^* \cong \frac{4}{3} \pi r^3 NA^*.$$

Здесь  $N$  — число накопленных за время нагружения микротрещин (включая и те, что образуют поверхность магистрального макроразрыва).

Полная эффективная поверхностная энергия  $\Gamma$  разрушения есть

$$(8) \quad 4\pi r^2 N \gamma_{\text{эфф}} = \Gamma.$$

Приравнивая (7) и (8), получаем

$$\frac{r}{3} = \frac{\gamma_{\text{эфф}}}{A^*} = d^*.$$

Таким образом, критический (или минимальный) размер разрушения  $d^*$  зависит от среднего размера  $r$  тех микротрещин, которые накапливаются в процессе нагружения тела. В свою очередь, размер микротрещин  $r$  определяется минимальным размером структурной неоднородности тела, на границах которой происходят остановка и торможение возникающих быстрых трещин.

Параметр  $d^*$  композиционных материалов существенным образом зависит от структуры, технологии, размеров волокон и других параметров и, таким образом, может служить обобщенной характеристикой прочности и структуры материала.

Задачи работы — экспериментальная проверка правомочности нахождения времени до разрушения композитов из условия (2), определение критического размера разрушения  $d^*$  и кинетических параметров разрушения  $U_0$  и  $v$  различных композиционных материалов при их разрушении растущей разрывной нагрузкой  $\sigma = \sigma t$  ( $t$  — время,  $\sigma = \text{const}$  — постоянная скорость нагружения).

Формула для оценки времени до разрыва испытуемого образца выводится из (1) и (2) при  $N_0 = N^*/\tau_0$ . Для данных условий испытаний можно получить

$$\int_0^{\tau} \tau_0^{-1} \exp\left(-\frac{U_0 - v\sigma t}{kT}\right) dt = 1.$$

Для текущих значений  $t$  и  $N$ , где  $N$  — число накопленных за время  $t$  микротрещин, аналогично находим

$$\int_0^t N^* \tau_0^{-1} \exp\left(-\frac{U_0 - v\sigma t}{kT}\right) dt = N,$$

откуда, полагая, что

$$\frac{Nv\sigma}{N^*kT} \tau_0 \exp\left(\frac{U_0}{kT}\right) \gg 1,$$

имеем

$$(9) \quad t = \frac{kT}{v\sigma} \left[ \frac{U_0}{kT} + \ln \frac{v\sigma}{kT} + \ln \frac{N\tau_0}{N^*} \right].$$

Формула (9) позволяет по известным в процессе накопления микротрещин значениям  $t_i$  и  $N_i$  методом наименьших квадратов из условия

$$\sum_{i=1}^n \left\{ t_i - \frac{U_0}{v\dot{\sigma}} - \frac{kT}{v\dot{\sigma}} \ln \frac{\gamma\dot{\sigma}}{kT} - \ln \left( \frac{N_i \tau_0}{N^*} \right) \right\}^2 \rightarrow \min_{U_0, v}$$

а затем по формуле (9) при  $t = \tau$ ,  $N = N^*$  найти долговечность образца под нагрузкой и сравнить время до разрушения, рассчитанное по формуле (9) и фактически измеренное при разрушении образца.

Для определения кинетических констант прочности и параметров разрушения композитов использовался метод, основанный на регистрации импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ).

Из литературных источников хорошо известно, что при зарождении трещин в твердых диэлектриках, включая и композиты, наблюдаются короткие (от 1 до 100 мкс) импульсы радио- и светового излучения, обусловленные разделением зарядов на берегах трещин, электронная эмиссия и возникновение высоких напряженностей в полости трещин (до  $10^9$  В/м) [5, 6]. Амплитуда импульсов и их длительность существенно зависят от размеров образующихся трещин, скорости их распространения, вещественного состава и прочности материалов [7]. Импульсы ЭМИ при возникновении трещин легко идентифицируются по характерной колоколообразной форме, а по амплитуде на несколько порядков превышают импульсы, обусловленные другими электромагнитными явлениями, сопровождающими деформирование и разрушение диэлектриков [4—7]. Необходимо отметить также, что данный метод позволяет следить за кинетикой разрушения непрозрачных материалов в процессе нагружения. А методика обработки результатов наблюдений дает возможность на ранних стадиях разрушения (до локализации очага разрушения) находить энергию связи  $U_0$ , структурно-чувствительный коэффициент  $v$  и критический размер разрушения  $d^*$ .

Для проверки вышеизложенных теоретических результатов на образцах композиционных материалов была собрана лабораторная установка, показанная на рис. 1, где 1 — образец, 2 — антенна, 3 — усилитель-дискриминатор, 4 — счетчик импульсов, 5 — таймер, 6 — запоминающий осциллограф, 7 — нагружающее устройство БУ-39.

Установка позволяет:

- записывать величину нагружающего напряжения, величину деформации и фотографировать форму сигнала импульсов ЭМИ, сопровождающих разрушение образцов;
- регистрировать общее число радиопульсов и определять их длительность и амплитуду;
- равномерно деформировать образцы путем одноосного сжатия с помощью шарообразных инденторов вплоть до разрушения исследуемых образцов.

Чтобы свести к минимуму искажения информации при различных преобразованиях, параметры сигналов и характеристики преобразующих систем должны быть согласованы, т.е. необходимо провести оптимальную фильтрацию всего входного сигнала. Для этой цели в установке применялся полосовой избирательный фильтр с крутизной среза 6 дБ/окт. Для удаления помех использовались электрический фильтр верхних частот РС-типа и развязка от сети.

В процессе эксперимента регистрировались частота следования импульсов, их амплитуда от 1,5 мВ и спектральный состав их высокочастотного заполнения от 1 кГц до 50 МГц, визуально наблюдалась и фотографировалась форма сигналов от 1 до 100 импульсов. Изучение формы и измерение

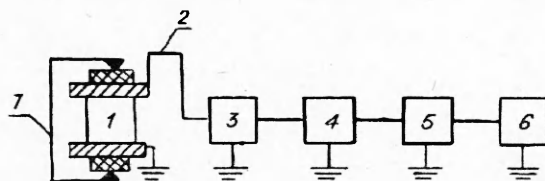
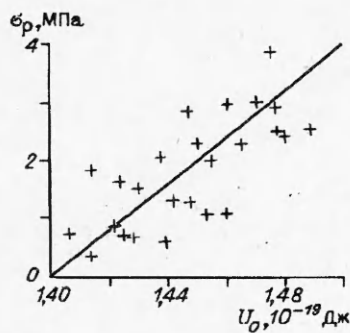
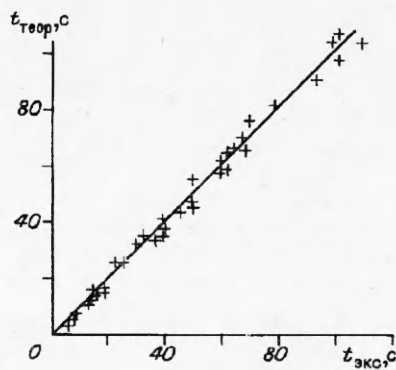


Рис. 1



Р и с. 2



Р и с. 3

параметров сигналов ЭМИ производились путем фотографирования изображения с экрана ЭЛТ осциллографа С8-12 со ждущей калиброванной разверткой. В качестве нагружающего устройства был выбран пробник БУ-39, предназначенный для комплексного определения прочностных и деформационных характеристик. Частота следования импульсов ЭМИ и их количество фиксировались с помощью электронно-счетного частотомера ЧЗ-54.

На рис. 2, 3 и в табл. 1 представлены результаты экспериментальной оценки кинетических констант прочности композиционных материалов различной структуры.

В табл. 1 приведены усредненные значения кинетических констант из 10 значений для каждого типа композиционного материала. Разброс значений энергии активации разрушения  $U_0$  и активационного объема  $v$  по всей выборке не превышал соответственно 2,5 и 22 %.

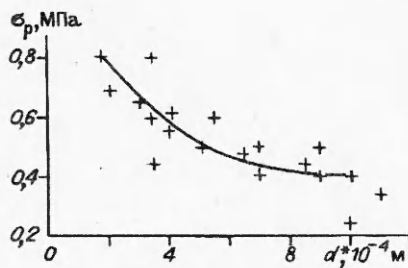
Как следует из рис. 2, связь предела прочности композиционных материалов от энергии активации их разрушения близка к линейной и подчиняется уравнению (1). Отклонение от расчетной линейной связи обусловлено случайными колебаниями времен до разрушения около среднего значения  $t$ , определяемого уравнением С.Н. Журкова.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость расчетного  $t_{теор}$  предсказанного времени до разрушения композиционных материалов при заданных скоростях нагружения от экспериментального  $t_{экс}$ . При их полном совпадении точки должны ложиться на биссектрису первого квадранта (линия на рис. 3). На рис. 3 видно весьма удовлетворительное совпадение времен. Во всех случаях (см. табл. 1) отклонение времен не превышало 5,5 %.

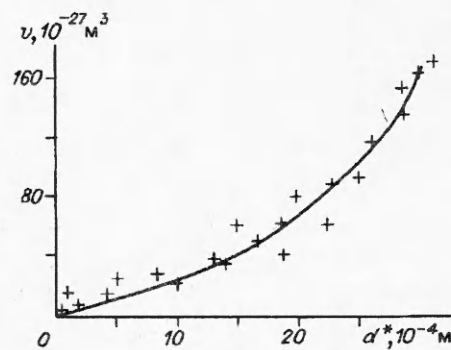
Анализируя приведенные в табл. 1 данные, можно прийти к выводу, что энергия активации разрушения  $U_0$  слабо зависит от структуры, свойств и технологических режимов производства композиционных материалов, пред-

Т а б л и ц а 1

Наименование образца	$v, 10^{-27} \text{ м}^3$	$U_0, 10^{-19} \text{ Дж}$	$t_{экс}, \text{ с}$	$t_{теор}, \text{ с}$
Полиамидный ПАИС-104С без термообработки	$15,8 \pm 2,98$	$1,446 \pm 0,01$	18	17,3
То же с термообработкой	$3,49 \pm 0,61$	$1,478 \pm 0,03$	62	59,2
Стеклотекстолит ТСП-85	$4,52 \pm 0,58$	$1,468 \pm 0,01$	100	105,5
Сферопласт № 173	$25,5 \pm 5,67$	$1,422 \pm 0,03$	15	14,2
» № 174	$29,7 \pm 4,37$	$1,406 \pm 0,06$	8	8,2
Пенопласт	$34,5 \pm 7,58$	$1,426 \pm 0,45$	40	41,3
Слоисто-вспененный материал	$167 \pm 32,2$	$1,430 \pm 0,01$	68	65,8



Р и с. 4



Р и с. 5

ставляя собой характеристику усредненной энергии межатомных связей в наиболее слабых звеньях структуры. Структурно-чувствительный коэффициент  $\nu$ , отражающий неравномерность нагружения межатомных связей, существенным образом зависит от степени однородности структуры и возрастает в десятки раз в ряду: прочные однородные высокопористые композиционные материалы. Во всех случаях (см. табл. 1) рост степени структурной неоднородности, размеров волокон и т.п. приводит к существенному увеличению параметра  $\nu$ . Наличие резко выраженной структурной неоднородности приводит к росту перенапряжений на наиболее крупных дефектах структуры, тем самым снижая прочность композиционных материалов и обуславливая увеличение  $\nu$ .

Кинетические константы прочности и критический размер разрушения определялись на различных образцах композиционных материалов, которые отличались размерами исходной матрицы, временем термообработки, размерами структурно-технологических микропор и технологией изготовления (см. табл. 2).

На рис. 4, 5 и в табл. 2 представлены результаты экспериментальной оценки критического размера разрушения композиционных материалов  $d^*$  и его связи с прочностью на растяжение  $\sigma_p$  и структурно-чувствительным коэффициентом  $\nu$ .

Как следует из анализа полученных результатов, прочность композиционных материалов существенным образом уменьшается с ростом критического размера разрушения. Этот хорошо известный результат в данном случае может быть конкретизирован количественно введением критического размера разрушения для каждой группы композиционных материалов. Критический размер разрушения хорошо коррелирует со средним размером структурной неоднородности  $d_{стр}$  композитов (см. табл. 2). Термообработка композиционных материалов, например ПАИС-104С, существенно уменьшает критический размер разрушения и увеличивает прочность и энергию

Т а б л и ц а 2

Наименование образца	$\sigma_p$ , МПа	$d^*$ , $10^{-4}$ м	$d_{стр}$ , $10^{-4}$ м
Слоисто-вспененный материал	$0,027 \pm 0,005$	$32 \pm 5$	$24 \pm 6$
Пенопласт	$0,160 \pm 0,062$	$7,3 \pm 2,1$	$11,5 \pm 1,8$
Сферопласт № 174	$0,563 \pm 0,149$	$8,5 \pm 3,3$	$8,9 \pm 4,7$
» № 173	$0,667 \pm 0,094$	$5,1 \pm 1,6$	$6,3 \pm 3,5$
Полиамидный ПАИС-104С без термообработки	$1,141 \pm 0,107$	$1,09 \pm 0,24$	$1,09 \pm 0,45$
Стеклотекстолит ТСП-85	$2,554 \pm 0,119$	$2,06 \pm 0,51$	$2,01 \pm 0,39$
Полиамидный ПАИС-104С с термообработкой	$2,878 \pm 0,316$	$0,58 \pm 0,15$	$0,62 \pm 0,35$

активации разрушения. Структурно-чувствительный коэффициент увеличивается по степенному закону с ростом размеров структурных неоднородностей материала (рис. 5). Так как  $\nu$  имеет физический смысл размерного коэффициента перенапряжения межатомных связей, то, естественно, должен наблюдаться рост этого коэффициента с увеличением размеров структурных неоднородностей и уменьшением «живого» сечения материала, что и подтверждается рис. 5 и табл. 2.

Таким образом, определяя параметры  $U_0$ ,  $\nu$  и  $d^*$ , можно делать выводы о структуре композиционных материалов, их прочности и влиянии технологии изготовления на механические свойства.

Из всего вышесказанного следует, что предложенный метод регистрации импульсного электромагнитного излучения при разрушении композиционных материалов позволяет на стадии их изготовления и испытания оперативно определять основные константы прочности, внося своевременную коррекцию в технологию изготовления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. — 1968. — № 3. — С. 46—52.
2. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // ДАН СССР. — 1981. — Т. 259, вып. № 6. — С. 1350—1353.
3. Томашевская И.С., Хамидуллин Я.Н. Возможность предсказания момента разрушения образцов горных пород на основе флуктуационного механизма роста трещин // ДАН СССР. — 1972. — Т. 207, вып. № 3. — С. 580—582.
4. Шемякин Е.И. О свободном разрушении твердых тел // ДАН СССР. — 1988. — Т. 300, вып. 5. — С. 1090—1094.
5. Мирошниченко М.И., Куксенко В.С. Излучение электромагнитных импульсов при зарождении трещин в твердых диэлектриках // ФТТ. — 1980. — Т. 22, вып. 5. — С. 1531—1533.
6. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. — М.: Наука, 1973.
7. Иванов В.В., Егоров П.В., Колпакова Л.А., Пимонов А.А. Динамика трещин и электромагнитное излучение нагруженных горных пород // ФТПРПИ. — 1988. — № 5. — С. 20—27.

г. Кемерово

Поступила 8/VII 1992 г.,  
в окончательном варианте — 2/XI 1993 г.

УДК 539.376

М.Н. Кирсанов

### ВЫПУЧИВАНИЕ ВЯЗКОГО СТЕРЖНЯ ПРИ ЖЕСТКОМ НАГРУЖЕНИИ

Проблеме выпучивания реологических конструкций посвящены многочисленные работы, обзор которых можно найти в [1, 2]. В большинстве случаев явление рассматривается при постоянных нагрузках. В настоящей работе изучается возможность выпучивания стержня в процессе наращивания сжимающей силы при заданной постоянной скорости деформирования. Используется теория особых точек [3], уточняющая псевдобифуркационный подход [4] в задачах выпучивания идеальных систем при ползучести.

Определяющее соотношение примем в виде [5]

$$(1) \quad \dot{p}r^\alpha = A\sigma^n,$$

© М.Н. Кирсанов, 1994