

01;05

## Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках

© С.А. Атрошенко, С.И. Кривошеев, Ю.В. Петров, А.А. Уткин, Г.Д. Федоровский

Научно-исследовательский институт математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета, 198904 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: dyn@unicorn.ath.spbu.ru

(Поступило в Редакцию 25 марта 2002 г.)

Экспериментально и теоретически исследовано разрушение композиционного материала — сферопластика с матрицей из полиэфирной смолы и наполнителя из стеклянных микросфер при статическом и динамическом нагружении. Ударное воздействие создавалось импульсным магнитным полем. Проведен анализ характера разрушения и его связи с параметрами воздействия и структурой материала. Предложен метод тестирования динамических свойств материала, основанный на концентрации инкубационного времени.

### Введение

Воздействие импульсного нагружения на гетерогенную газонаполненную среду исследовано недостаточно, хотя ударное сжатие пористых веществ широко используется в физике ударных волн. Интерес к таким материалам связан с необходимостью описания их поведения в мишенях инерциального термоядерного синтеза, в плавучих средствах глубоководных аппаратов и, кроме того, с потребностью создания новых материалов для демпфирования импульсных нагрузок. Большой практический интерес представляет материал, содержащий стеклянные или углеродные микросферы, внедренные в матрицу связующего — сферопластик [1]. Такие материалы обладают хорошими конструкционными и диэлектрическими свойствами, оказываются достаточно прочными по отношению к ударным нагрузкам и имеют незначительный вес. Так, в работе [2] измерена динамическая прочность материала, содержащего 42% стеклянных микросфер по объему или 27.7% по весу, с эпоксидным связующим, которая составила 0.24 GPa. В результате армирования вязкоупругих связующих стеклянными микросферами значительно уменьшается плотность получаемого таким образом нового материала, а также улучшаются его демпфирующие свойства. Введение микросфер — удобный способ конструирования гетерогенных материалов с заданными свойствами.

### Материалы и методика эксперимента

В данной работе выполнено экспериментальное изучение деформационных и прочностных свойств, в частности статической и динамической трещиностойкости, нового материала — сферопластика с матрицей из полиэфирной смолы и армирующего наполнителя из стеклянных микросфер. Материал содержит 41% по объему стеклянных микросфер. Микроструктурный анализ композита выявил размеры сфер. В разных образцах размер сфер менялся в интервале от 6–60 до 12–60  $\mu\text{m}$  со средним значением от 21 до 31  $\mu\text{m}$ . Разноразмерность

частиц наполнителя отчетливо наблюдается на рис. 1. Характеристика наполнителя приведена в табл. 1. По результатам взвешиваний определена удельная плотность сферопластика  $\rho = (0.79 \pm 0.01) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

Статические механические характеристики материала [3] установлены по данным испытаний, проведенных на разрывной машине  $P - 0.5$  при скорости растяжения  $1.67 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ . Модуль Юнга при растяжении оказался равным  $E = 2400 \pm 50 \text{ MPa}$ , временное сопротивление при разрыве  $\sigma_c = 12.4 \pm 0.9 \text{ MPa}$ , вязкость разрушения (критический коэффициент интенсивности напряжений)  $K_{Ic} = 0.52 \pm 0.03 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Интерферометрическим ме-

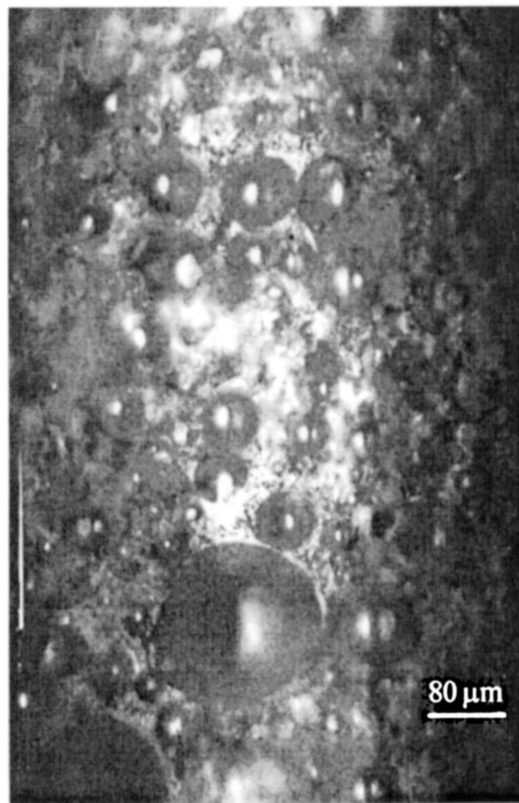


Рис. 1. Поверхность разрушения сферопластика.

Таблица 1. Характеристика наполнителя

Образец	Размер наполнителя, $\mu\text{s}$	Толщина стенки стеклянной сферы, $\mu\text{m}$
1	48.5	15.5
3	35.1	14.7
4	21.1	14.4
6	30.5	13.1

тодом была определена скорость продольных волн, которая составила  $c_1 = 2196 \pm 50 \text{ ms}$ .

Для оценки динамической трещиностойкости материала использовался новый метод тестирования, основанный на понятии инкубационного времени [4]. Согласно этому подходу, основной параметр, ответственный за критические характеристики динамического разрушения, — инкубационное время материала  $\tau$ . Оно определяется индивидуально для каждого материала и может быть получено из опытов на образцах с макротрещинами. Образцы имели форму пластин размером  $120 \times 120 \times 9\text{--}16 \text{ mm}$  с серединным краевым сквозным пазом шириной  $2.2 \text{ mm}$  и длиной  $60 \text{ mm}$ , а также

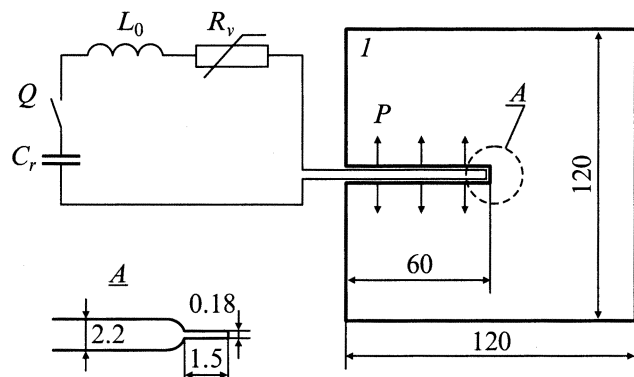


Рис. 2. Принципиальная схема установки и схема нагружения образца.  $C_r$ ,  $L_0$  — накопительная емкость и собственная индуктивность генератора импульсных токов;  $Q$  — высоковольтный коммутатор;  $R_v$  — нелинейное сопротивление;  $I$  — исследуемый образец. Размеры приведены в мм.

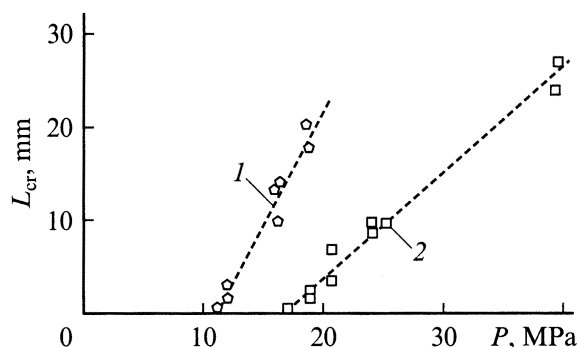


Рис. 3. Экспериментальные данные по разрушению образцов из сферопластика одиночными импульсами длительностью  $4.40$  (1) и  $2.76 \mu\text{s}$  (2).

симметричным по отношению к его берегам надрезом в вершине паза глубиной  $1.5 \text{ mm}$  и шириной  $0.18 \text{ mm}$ . Схема нагружения и вид образца приведены на рис. 2. При протекании тока по шинам нагрузочного устройства на них действует магнитное давление, передаваемое на берега паза. Это давление равномерно распределено по длине образца и однозначно связано с протекаемым током. Импульс тока создается с помощью магнитоимпульсной установки  $\xi = 2$  [5] и измеряется поясом Роговского на осциллографе TDS-754C. Форма и длительность импульса давления определяется параметрами установки, а на амплитуду влияют и параметры нагрузочного устройства. Давление определяется по формуле  $p(t) = P \sin^2(\pi \cdot t/T)$ , где  $T$  — длительность импульса. Амплитуда импульса  $P$  для случая плоских шин шириной  $b$  определяется соотношением  $P = (\mu_0/2)(I/b)^2$ , где  $I$  — амплитуда тока,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}$ . Магнитоимпульсная установка позволяет генерировать в нагрузке импульс тока до  $1 \text{ MA}$  микросекундной длительности и формировать управляемые импульсные нагрузки с амплитудами порядка  $1 \text{ GPa}$  и длительностями порядка  $> 1 \mu\text{s}$ .

Эксперименты проводились при двух длительностях импульса нагружения:  $2.76$  и  $4.40 \mu\text{s}$ . На рис. 3 приведены экспериментальные данные по зависимости длины проросшей в образце трещины от амплитуды воздействующего импульса. Пороговая амплитуда определялась путем экстраполяции длины проросшей трещины к нулю и составила для указанных выше длительностей  $1.68 \pm 0.5$  и  $11.2 \pm 0.4 \text{ MPa}$  соответственно.

## Результаты и их обсуждение

Согласно примененному подходу, две материальные константы  $K_{Ic}$  и  $\tau$  описывают статическую и динамическую трещиностойкость материала на данном масштабном уровне. Критические параметры внешней нагрузки, а также скоростные зависимости вязкости разрушения для данной конструкции, нагруженной симметрично относительно линии трещины, могут быть найдены при помощи критерия инкубационного времени [4]

$$\int_{t-\tau}^t K_I(t') dt \leq \tau \cdot K_{Ic}, \quad (1)$$

где  $K_I(t)$  — коэффициент интенсивности напряжений как функция времени,  $\tau$  — инкубационное время.

Коэффициент интенсивности напряжений определялся при помощи расчета. Для этого была рассмотрена задача о полубесконечной трещине, берега которой нагружались импульсами давления заданной формы. В случае приложения к берегам разреза единичного мгновенного импульса коэффициент интенсивности  $K_I^{(\delta)}(t) = \alpha/2/\sqrt{t}$ , где  $\alpha = 4c_2\sqrt{c_1^2 - c_2^2}/(c_1\sqrt{\pi c_1})$  [6]. При воздействии импульса произвольной формы значение коэффициента интенсивности напряжений определяется при помощи

свертки по времени приложенной нагрузки с величиной  $K_I^{(\delta)}(t)$ . Таким образом, величина коэффициента интенсивности в эксперименте определяется из соотношения

$$K_I(t) = \alpha P \int_0^t \frac{\sin^2(\pi(t-s)/T)}{2\sqrt{s}} ds. \quad (2)$$

Это выражение будет определять значение коэффициента интенсивности до тех пор, пока применима задача о полубесконечной трещине, т.е. пока отраженные от границ волны не достигнут кончика разреза. Для использованных при испытаниях моделей следует ограничиться рассмотрением времен  $t \leq 27.3 \mu s$ , т.е. временем пробега берега разреза продольной волной. Значение коэффициента интенсивности напряжений при рассмотренных в эксперименте продолжительностях показано на рис. 4. Величина  $K_I(t)$  растет, достигает максимума и затем медленно убывает. Коэффициент интенсивности напряжений достигает максимума в момент времени несколько больший, чем у приложенной нагрузки (равный  $T/2$ ).

Для определения инкубационного времени используются полученные из эксперимента параметры — пороговая амплитуда импульса  $P$  и его продолжительность  $T$ . Эти величины позволяют определить при помощи (2) значение коэффициента интенсивности в пороговом импульсе. Рассматривается пороговый импульс, т.е. такой разрушающий импульс, уменьшение амплитуды которого уже не приводит к разрушению. Следовательно, максимальное значение интеграла в (1) даст в точности правую часть неравенства. Из этого равенства и определяется инкубационное время  $\tau$ . Найденное таким способом для исследованного типа сферопластика инкубационное время  $\tau$  составило  $3.93 \pm 0.25 \mu s$  при нагрузке продолжительностью  $T = 2.76 \mu s$  и  $3.94 \pm 0.3 \mu s$  для импульса длительностью  $T = 4.40 \mu s$ . Таким образом, инкубационное время  $\tau = 3.93 \mu s$ .

Зависимость амплитуды порогового импульса от продолжительности воздействия приведена на рис. 5. Кружки — эксперимент, сплошная кривая — величина пороговой амплитуды, вычисленная при помощи крите-

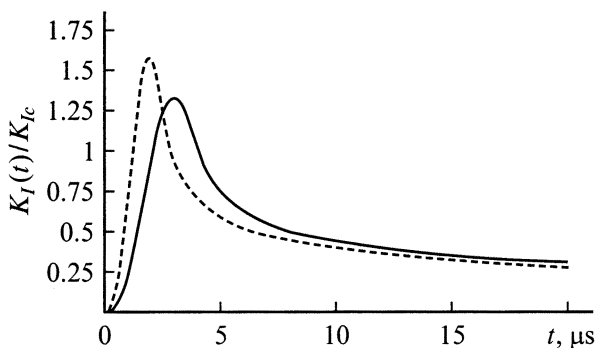


Рис. 4. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от времени. Сплошная линия — длительность воздействия  $4.40 \mu s$ , штриховая —  $2.76 \mu s$ .

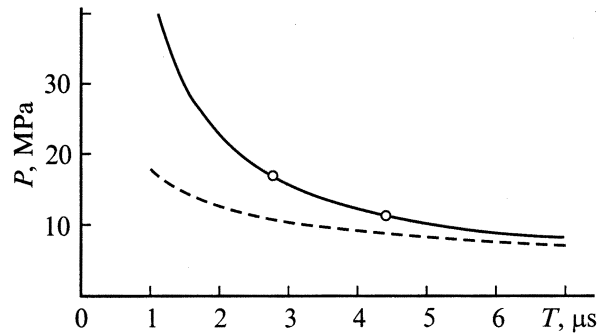


Рис. 5. Зависимость разрушающей амплитуды  $P$  от длительности воздействия  $T$ .

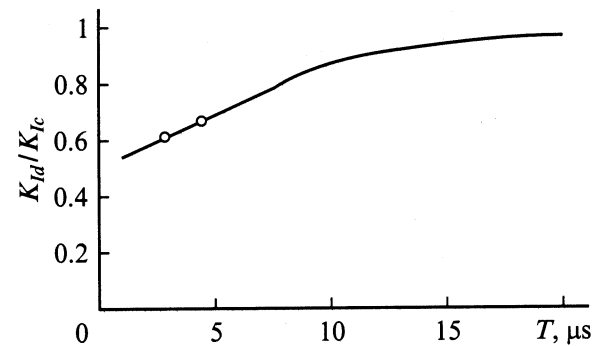


Рис. 6. Зависимость от продолжительности воздействия. Кружки — динамическая вязкость разрушения на длительностях, реализованных в эксперименте.

рия инкубационного времени (1). Пороговая амплитуда, определенная при помощи критерия критического коэффициента интенсивности ( $K_I(t) \leq K_{Ic}$ ), имеет более низкие значения (штриховая кривая на рис. 5). При длительности импульса  $T = 2.76 \mu s$  разрушающая амплитуда, определенная при помощи классического критерия критического коэффициента интенсивности, составляет 64% от наблюдаемой в эксперименте, а при продолжительности воздействия  $T = 4.40 \mu s$  — 76%.

Динамическую вязкость разрушения, т.е. значение коэффициента интенсивности в момент разрушения ( $K_{Id} = K_I(t)$ , где  $t_*$  — момент начала разрушения) можно определить вычислением при помощи критерия (1). При этом из (1) находится момент начала разрушения  $t_*$ , а затем из (2) находится значение коэффициента интенсивности в этот момент. Величина динамической вязкости разрушения в экспериментах при разрушении пороговыми импульсами составила  $K_{Id} = 0.61 K_{Ic}$  при продолжительности воздействия  $T = 2.76 \mu s$  и  $K_{Id} = 0.67 K_{Ic}$  для импульса длительностью  $T = 4.40 \mu s$ . Момент разрушения  $t_*$  при этом составил  $5.4$  и  $6.1 \mu s$  соответственно. Разрушение в обоих случаях происходило с задержкой, т.е. через некоторое время после достижения коэффициентом интенсивности напряжений своего максимального значения (рис. 6).

Особенности деформации и последующего разрушения разнообразных гетерогенных материалов определяются общей причиной: на границах и в стыках между однородными структурными элементами деформируемого материала возникают источники упругих напряжений. Их возникновение обусловлено сплошным сопряжением элементов с различными свойствами. В поле приложенных макронапряжений такие элементы испытывают различные деформации и могут при этом сохранять сложное сопряжение, лишь накапливая избыточные над средними упругие деформации.

Результаты фрактографического исследования материала приведена в таблице и на фотографиях микроструктур на рис. 1, 7, 8. Разрушение сферопластика происходило в основном между стеклянными микросферами. Трещина распространялась по связующему, огибая сферы. Лишь в отдельных случаях она пересекала сферу. Это видно из рис. 7.

От надреза в образцах, как правило, распространяется по две трещины, расходящиеся в среднем под некоторым углом ( $8-12^\circ$ ). На расстоянии 2 или 4 мм от начала разрушения в разных образцах трещина может скачкообразно изменять направление своего движения, отклоняясь от предыдущего на угол  $8-10^\circ$ , затем примерно на том же расстоянии она опять может вернуться к прежнему направлению движения. Расстояния, на которые проска-

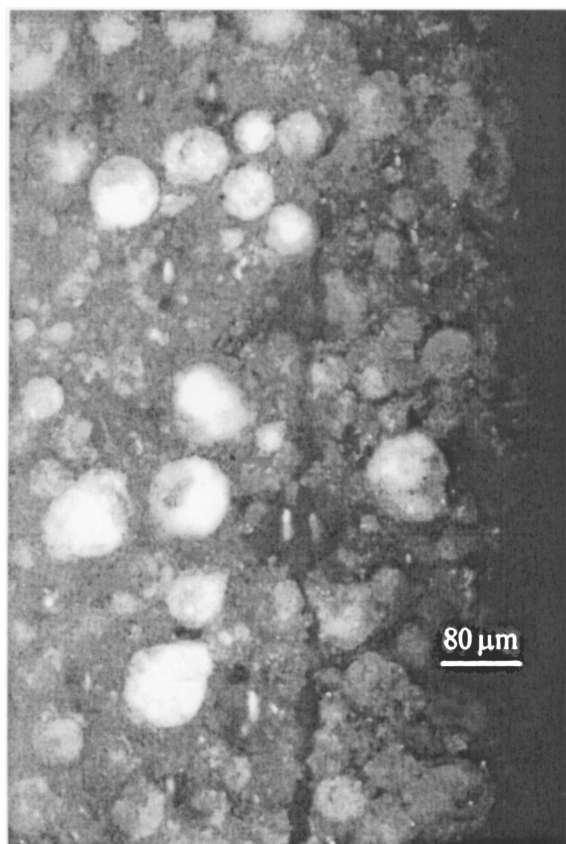


Рис. 7. Распространение трещины в сферопластике.

Таблица 2. Влияние размера наполнителя на длину итоговой трещины

Образец	Длина трещины, mm		Размер наполнителя, $\mu\text{m}$
	Первая	Вторая	
1	24	27	48.5
3	9.6	11.9	35.1
4	7	11	21.1
6	9	11.2	30.5

кивают трещины, меняются от 7 до 27 мм в зависимости от интенсивности удара. Результаты фрактографического исследования сведены в табл. 2. Как видно из данных этой таблицы, чем меньше радиус сфер, тем меньше итоговая длина трещины. Это можно объяснить увеличением количества барьеров на пути распространения трещины.

Микроструктура сферопластика при большем увеличении представлена на рис. 8. Видны следы необратимого деформирования связующего и микротрещины в отдельных участках около стеклянных сфер. При еще большем увеличении можно заметить характерные особенности разрушения наполнителя, аналогичные другим пластикам, например полиметилметакрилату: зер-



Рис. 8. Следы пластического течения и микротрещины на поверхности разрушения стеклопластика.

кальную, зону повышенной шероховатости и параболическую.

Сравнение характере разрушения статически и динамически нагруженного материала выявило существенно большее количество разрушенных микросфер на поверхности статически деформированного материала, чем при импульсном нагружении.

## Заключение

Для оценки динамических прочностных свойств сферопластика применен новый метод тестирования, основанный на концепции инкубационного времени.

Полученные значения пороговых амплитуд заметно отличаются от значений, прогнозируемых по классическому критерию критического коэффициента интенсивности, а значения динамической вязкости разрушения оказываются существенно меньше, чем  $K_{Ic}$ .

Показано, что разрушение в случае пороговых импульсов реализуется в кончике трещины на стадии уменьшения коэффициента интенсивности напряжения.

Проведено фрактографическое исследование разрушения сферопластика и показано, что чем меньше размер сфер наполнителя, тем меньше расстояние, на которое продвинулась трещина при заданном уровне нагружения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 99-01-00718), проект ЦКП № 97-01-05009, совместной поддержке РФФИ и БФФИ (грант № 02-01-81036), программы „Интеграция“, а также Конкурсного Центра грантов СПбГУ.

## Список литературы

- [1] *Кржечковский П.Г.* Докт. дис. Николаев, 1989. 300 с.
- [2] *Weirick L.J.* // Shock Compression of Condensed Matter. Elsevier Science Publ. B.V., 1992. P. 99–102.
- [3] *Кернштейн И.М., Клоушиков В.Д., Ломакин Е.В., Шестериков С.А.* Основы экспериментальной механики разрушения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 140 с.
- [4] *Morozov N., Petrov Y.* Dynamics of Fracture. Berlin; Heidelberg; New York: Springer Verlag, 2000. 196 p.
- [5] *Кривошеев С.И., Петров Ю.В.* Препринт ИПМАШ РАН. СПб., 1997. № 142. 32 с.
- [6] *Черепанов Г.П.* Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.