

## **Влияние гидростатического давления на скоростную зависимость трещиностойкости высоконаполненного полимерного материала**

**М. Ю. Зезин, Ю. П. Зезин**

Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*Приведены результаты экспериментального исследования влияния гидростатического давления на вязкость разрушения высоконаполненных полимерных материалов. Показано, что с повышением гидростатического давления среды увеличивается критическое значение коэффициента интенсивности напряжений и, как следствие, скорость распространения трещины. Для учета влияния давления на характеристики трещиностойкости исследуемых материалов предложено использовать метод баровременной аналогии. Метод позволяет представить экспериментальные зависимости вязкости разрушения материала от скорости распространения трещины, полученные при различных уровнях гидростатического давления, в виде обобщенной баровременной зависимости, определяющей влияние условий нагружения на характеристики разрушения материала. Предложены простые эмпирические соотношения для аппроксимации полученных экспериментальных данных.*

**Ключевые слова:** полимерные материалы, высоконаполненные полимеры, механические свойства, разрушение, трещины, распространение трещин, вязкость разрушения, гидростатическое давление, метод аналогий.

**Введение.** Высоконаполненные полимерные материалы представляют особый класс наполненных полимеров, в которых содержание наполнителя близко к предельному значению. К подобным материалам относятся дисперсионно-упрочненные термопласты, используемые для изготовления корпусных деталей современных автомобилей и бытовой техники, смесевые твердые ракетные топлива, асфальтобетоны и ряд других материалов особого назначения. По сравнению с традиционными пластиками высоконаполненные полимеры проявляют более сильную зависимость механических характеристик от внешних условий нагружения, таких, как скорость деформации и гидростатическое давление среды. Влияние скорости деформации или нагружения на механические свойства наполненных полимеров широко известно и определяется вязкоупругим характером их сопротивления деформированию. Влияние гидростатического давления на основные механические характеристики полимеров и пластиков также изучено достаточно полно. Одной из основополагающих работ в этой области является монография [1]. Зависимость характеристик трещиностойкости от гидростатического давления изучена в меньшей степени. Тем не менее исследования подобного рода представляют определенный практический интерес, например, для оценки работоспособности твердотопливных ракетных двигателей с зарядами сложной формы, имеющими концентраторы напряжений или дефекты. В работах [2, 3] показано, что вязкость разрушения смесевого твердого топлива возрастает с увеличением гидростатического давления. С другой стороны, исследования, проведенные на полиэтилене [4], не выявили тесной корреляции между давлением среды и вязкостью разрушения материала.

Заметим, что оценки несущей способности или ресурса эксплуатации изделий из полимерных материалов с использованием критического значения коэффициента интенсивности напряжений (вязкости разрушения) являются приближенными. Более точный подход к оценке склонности полимерных материалов к хрупкому разрушению основан на концепции скоростной зависимости трещиностойкости [5], в соответствии с которой вязкость разрушения есть функция скорости распространения трещины, которая, в свою очередь, зависит от скорости нагружения. Зависимость вязкости разрушения от скорости нагружения отмечена при исследовании характеристик трещиностойкости алюминиевого сплава [6]. Примеры зависимости критического коэффициента интенсивности напряжений для ряда широко распространенных полимеров приведены в [7]. Общим для этих работ является вывод о повышении критического значения коэффициента интенсивности напряжений при увеличении скорости нагружения.

Ранее [8] концепция скоростной зависимости трещиностойкости принята для оценки влияния гидростатического давления на характеристики разрушения высоконаполненного полимерного материала К-4И. Было показано, что повышение давления эквивалентно увеличению скорости распространения трещины. При этом влияние гидростатического давления среды можно учесть с помощью метода баровременной аналогии, позволяющего построить обобщенную зависимость вязкости разрушения  $K_c$  от скорости  $u$  и давления  $P$ :

$$K_c = K(a_p u),$$

где  $a_p$  – параметр баровременного смещения, зависящий от давления среды.

Использованное в [8] оборудование ограничивало возможности экспериментального исследования уровнем давления среды 6 МПа. Цель данной работы – исследование влияния более высоких уровней гидростатического давления и скорости нагружения на характеристики трещиностойкости полимерных материалов.

**Материал и методика испытаний.** Объектом испытания служил материал К-4И, используемый ранее [8]. Это – высоконаполненный полимерный материал на основе бутилкаучука и мелкодисперсного порошка карбоната кальция. Средний размер частиц наполнителя составляет около 130 мкм, степень наполнения – 75 мас.%. При скорости деформации  $0,004 \text{ с}^{-1}$  прочность материала равна 1,4 МПа, предельная деформация – 0,4, модуль Юнга – 10 МПа. Испытания материала на трещиностойкость проводили в интервале гидростатического давления 10...90 МПа на установке для исследования влияния гидростатического давления на свойства полимерных материалов при растяжении [9], разработанной в Институте механики МГУ.

Испытательная камера и аккумулятор давления установки позволяют испытывать полимерные материалы на растяжение в жидкой среде (силиконовое масло) при уровнях давления до 300 МПа. Клиновое нагружающее устройство обеспечивает режим испытаний при постоянной скорости раздвижения захватов, которая может варьироваться на пяти уровнях в пределах  $2 \cdot 10^{-5} \dots 0,146 \text{ м/с}$ .

Испытывали образцы в виде двойной лопатки с краевым надрезом, вырезанные штанцевым ножом из пластин толщиной 7,5 мм. Длина рабочей части образца составляла 42 мм, ширина – 7,5 мм, глубина надреза – 1 мм. В процессе испытания регистрировалась зависимость растягивающей силы от времени при значениях скорости раздвижения захватов 0,146; 0,016 и 0,001 м/с, что соответствовало трем уровням эффективной скорости деформации образца: 3,47; 0,385 и 0,043 с<sup>-1</sup>.

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость растягивающей силы  $F$  от времени  $t$  при давлении 88,2 МПа и эффективной скорости деформации 0,385 с<sup>-1</sup>. Для всех зависимостей, полученных при различных параметрах нагружения, характерен выраженный максимум. Осредненное значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_1$ , соответствующее разрушению образца, вычислялось по наибольшему значению растягивающей силы  $F_m$  с использованием известной формулы для выбранной схемы испытания [10]:

$$K_1 = \sigma_m \sqrt{\pi l} \xi(t/b), \quad (1)$$

где  $\sigma_m = F_m / bh$  – максимальное растягивающее напряжение в сечении, удаленном от ослабленного надрезом места;  $2b$  – ширина образца;  $h$  – его толщина. Таблица значений функции  $\xi(l/b)$  для различных относительных длин трещины-надреза приведена в [10]. Осредненное значение коэффициента интенсивности в дальнейшем принимали за вязкость разрушения  $K_c$ .

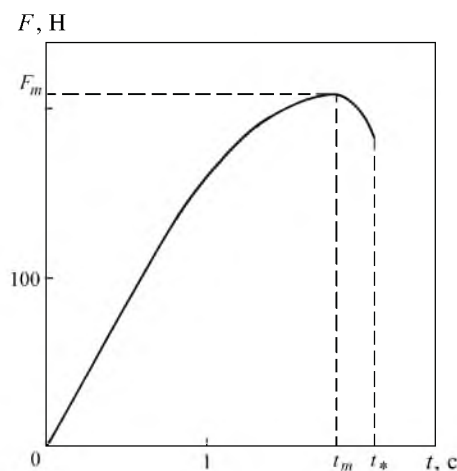


Рис. 1. Экспериментальная зависимость растягивающей силы от времени, полученная при испытании образца с краевым надрезом при постоянной скорости деформации 0,385 с<sup>-1</sup> и давлении 88,2 МПа.

**Анализ и результаты испытаний.** Данные испытаний материала представлены на рис. 2 в виде экспериментальной зависимости  $K_c$  от гидростатического давления среды  $P$  для трех эффективных скоростей деформации. Как видно, с увеличением давления и скорости нагружения существенно повышается вязкость разрушения. Аналогичная зависимость получена ранее для щелочно-галоидных монокристаллов [11].

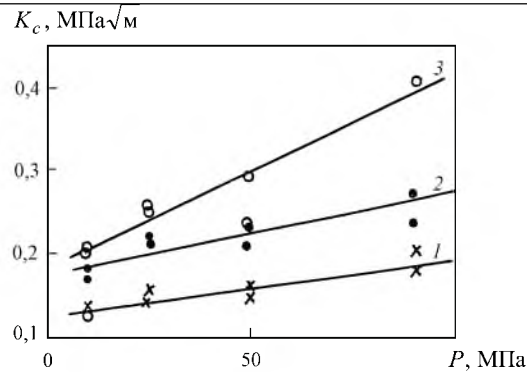


Рис. 2. Экспериментальные зависимости критического значения коэффициента интенсивности напряжений от гидростатического давления, полученные при эффективных скоростях деформации 3,47 (1), 0,385 (2) и 0,043 с<sup>-1</sup> (3).

На рис. 3 полученные экспериментальные данные приведены в виде зависимости вязкости разрушения  $K_c$  от эффективной скорости деформации  $\dot{\varepsilon}_3 = d\varepsilon / dt$ . Легко заметить, что основную часть зависимостей можно аппроксимировать прямыми линиями с одинаковым наклоном. В этом случае зависимости вязкости разрушения от эффективной скорости деформации, построенные при различных уровнях гидростатического давления, могут быть представлены в виде единой (обобщенной) кривой посредством сдвига каждой из них вдоль оси абсцисс до совпадения с выбранной в качестве стандартной зависимости  $K_c(d\varepsilon / dt)$ , полученной при давлении приведения  $P_0$ . Величина сдвига определяет экспериментальное значение функции баровременного смещения  $a_p$ , соответствующее рассматриваемому значению давления  $P$ .

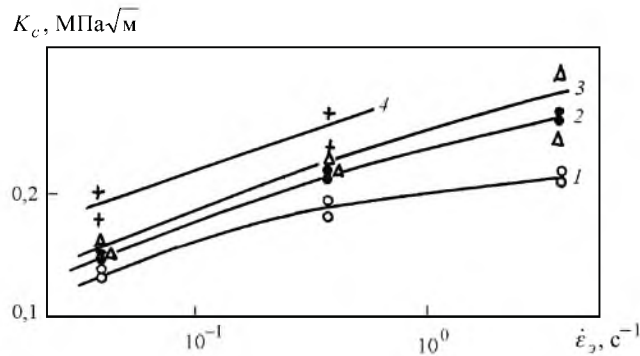


Рис. 3. Экспериментальные зависимости критического значения коэффициента интенсивности напряжений от эффективной скорости деформации для фиксированных уровней гидростатического давления: 1 –  $P = 9,8$  МПа; 2 –  $P = 24,5$  МПа; 3 –  $P = 49$  МПа; 4 –  $P = 90$  МПа.

Экспериментальные зависимости параметра сдвига от давления иллюстрирует рис. 4. Зависимость  $a_p(P)_{0,098}$  получена при давлении приведения 0,098 МПа и давлении среды до 6 МПа [10],  $a_p(P)_{9,8}$  – при  $P_0 = 9,8$  МПа и давлении среды до 88,2 МПа. Для построения единой зависимости  $a_p(P)$  при давлении среды 0,098...88,2 МПа необходимо сдвинуть эксперимен-

тальные точки функции баровременного смещения, полученной при более высоком давлении приведения, вдоль оси ординат до совпадения с ветвью  $a_p(P)$  для низкого значения  $P_0$ . В этом случае обобщенную функцию сдвига  $a_p(P)$  при давлении приведения 0,098 МПа и давлении среды в интервале 0,098... 88,2 МПа можно записать так:

$$a_p(P) = a_p(P)_{9,8} + a_0,$$

где  $a_0$  – величина вертикального сдвига, обеспечивающего совпадение экспериментальных зависимостей  $a_p(P)_{0,098}$  и  $a_p(P)_{9,8}$ , полученных в разных сериях испытаний. Величина  $a_0$  определена таким образом, чтобы зависимость  $a_p(P)$  наилучшим образом аппроксимировалась уравнением

$$a_p(P) = \exp \left\{ A \left( \frac{P - P_0}{P_0} \right)^k \right\}, \quad (2)$$

где  $A$  и  $k$  – параметры, определяемые методом наименьших квадратов.

На рис. 4 точками 1 и 3 представлена обобщенная экспериментальная зависимость параметра баровременного смещения от давления, полученная по результатам двух серий испытаний материала при низком (до 6 МПа) [8] и высоком (от 9,8 до 88,2 МПа) гидростатическом давлении. Сплошной линией обозначена аппроксимация экспериментальной зависимости соотношением (2) при следующих значениях определяемых коэффициентов:  $\ln a_0 = 2,37$ ;  $A = 0,512$ ;  $k = 0,338$ . Среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от расчетных составляет 0,08.

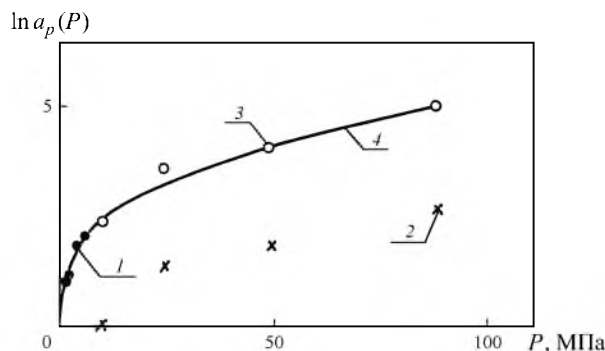


Рис. 4. Экспериментальная зависимость параметра сдвига от гидростатического давления: 1 –  $P_0 = 0,098$  МПа [8]; 2 –  $P_0 = 9,8$  МПа; 3 – обобщенная зависимость при  $P_0 = 0,098$  МПа; 4 – аппроксимация по соотношению (2).

Для сопоставления скоростных зависимостей трещиностойкости материала К-4И, полученных при различных уровнях гидростатического давления на образцах разной формы, введем эффективную скорость роста трещины для образцов с единичным краевым надрезом:  $u_e$ . Примем, что в окрестности максимального значения растягивающей силы эффективная скорость роста трещины определяется простым соотношением

$$u_e = (2b - a) / 2(t_f - t_m),$$

где  $t_f$  – полное время до разрушения образца;  $t_m$  – время, соответствующее максимуму зависимости растягивающей силы от времени. В этом случае каждому значению  $K_c$ , вычисленному по наибольшей величине растягивающей силы, соответствует определенное среднее значение скорости роста трещины  $u_e$ .

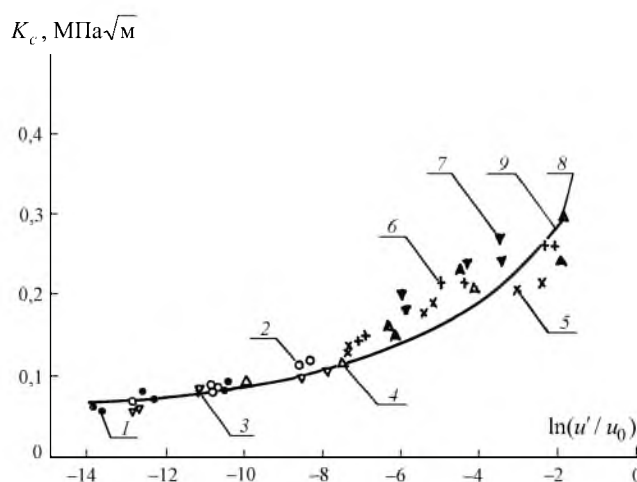


Рис. 5. Обобщенная зависимость вязкости разрушения от приведенной эффективной скорости деформации: 1 –  $P = 0,098$  МПа; 2 –  $P = 1,96$  МПа; 3 –  $P = 3,92$  МПа; 4 –  $P = 5,88$  МПа; 5 –  $P = 9,8$  МПа; 6 –  $P = 24,5$  МПа; 7 –  $P = 49$  МПа; 8 –  $P = 88,8$  МПа; 9 – расчет по соотношению (3).

Рис. 5 иллюстрирует обобщенную экспериментальную зависимость вязкости разрушения  $K_c$  от приведенной эффективной скорости роста трещины  $u' = u_e a_p$ , полученную по результатам двух серий испытаний: дисковых образцов при давлении до 6 МПа [8] и образцов с единичным краевым надрезом при давлении от 9,8 до 88,2 МПа. Для первой серии под  $u_e$  понимается скорость роста трещины на стационарном участке ее развития [8]. При аппроксимации экспериментальных данных используем простое соотношение

$$\frac{u_e}{u_0} = B \exp\left(\frac{K_0}{K_c}\right), \quad (3)$$

где  $u_0$ ,  $B$ ,  $K_0$  – коэффициенты, определяемые в результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Очевидно, что одну из пары постоянных  $u_0$  и  $B$  можно выбрать произвольно. Представляется естественным принять, что  $u_0$  – это наибольшая скорость распространения трещины в материале при нормальных условиях. В соответствии с эмпирическими рекомендациями для ряда материалов можно записать [7]

$$u_0 = 0,38V,$$

где  $V$  – скорость распространения звука в материале. При модуле упругости 10 МПа и плотности  $1500 \text{ кг/м}^3$  скорость звука в исследуемом материале составляет около 250 м/с. Для дальнейших расчетов примем округленное значение параметра  $u_0 = 10^2$  м/с. В этом случае с помощью метода наименьших квадратов получим следующие значения параметров соотношения (3):  $B = 4,35$ ;  $u_0 = 10^2$  м/с;  $K_0 = 1,05 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

На рис. 5 сплошной линией представлена расчетная зависимость вязкости разрушения материала от приведенной эффективной скорости, построенная с использованием соотношения (3) и полученных значений постоянных. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от расчетных в исследуемом диапазоне скоростей распространения трещины и давления составляет  $0,0251 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

**Заключение.** Получены экспериментальные данные о влиянии гидростатического давления среды и скорости нагружения на вязкость разрушения высоконаполненного полимерного материала К-4И. Показано, что при фиксированной скорости нагружения повышение гидростатического давления приводит к увеличению вязкости разрушения материала. Использование метода баровременной аналогии позволяет представить экспериментальные данные в виде обобщенной зависимости вязкости разрушения от приведенной скорости распространения трещины. Предложены простые эмпирические соотношения для аппроксимации полученной экспериментальной зависимости параметра баровременного смещения от давления и скоростной зависимости трещиностойкости материала.

Работа выполнена в соответствии с программой Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 98-01-00519.

## Резюме

Наведено результати експериментального дослідження впливу гідростатичного тиску на в'язкість руйнування високонаповнених полімерних матеріалів. Показано, що з підвищенням гідростатичного тиску середовища збільшується критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень  $i$ , як наслідок, швидкість розповсюдження тріщини. Для врахування впливу тиску на характеристики тріщиностійкості матеріалів, що досліджуються, запропоновано використовувати метод барочасової аналогії. Метод дозволяє представити отримані за різних рівнів гідростатичного тиску експериментальні залежності в'язкості руйнування матеріалу від швидкості розповсюдження тріщини у вигляді узагальненої барочасової залежності, що визначає вплив умов навантаження на характеристики руйнування матеріалу. Запропоновано прості емпіричні співвідношення для апроксимації отриманих експериментальних даних.

1. Айнбиндер С. Б., Алксне К. И., Тюнина Э. Л., Лака М. Г. Свойства полимеров при высоких давлениях. – М.: Химия, 1973. – 192 с.

2. *Francies E. C., Carlton C. H., and Lindsey G. H.* Viscoelastic Fracture of Solid Proppelante in Pressurization Loading Conditions. – AIAA Paper, 1974, No. 74-30. – 8 p.
3. *Francies E. C., Lindsey G. H., and Parmeter R. R.* Pressurized crack behavior in two-dimentional rocket motor geometries // *J. Spacecraft and Rockets.* – 1972. – **9**, No. 6. – P. 415 – 419.
4. *Sweenley J., Duckett R. A., and Ward I. M.* Fracture toughness of a tough polyethylene using tension testing in a high-pressure environment // *J. Mater. Sci. Letters.* – 1986. – **5**, No. 6. – P. 1109 – 1110.
5. *Вавакин А. С., Салганик Р. Л.* Исследование трещиностойкости органического стекла // *Изв. АН СССР. Механика твердого тела.* – 1971. – № 46. – С. 167 – 173.
6. *Попов Н. И., Мартьянов В. А., Пономарев В. Р.* Прочность и трещиностойкость алюминиевого сплава АМц при скоростях деформации  $10^{-3} \dots 10^3 \text{ с}^{-1}$  // *Пробл. прочности.* – 1993. – № 11. – С. 19 – 26.
7. *Congleton J. and Denton B. K.* Measurement of fast crack growth in metals and nonmetals // *Fast Fracture and Crack Arrest.* – ASTM STP 627 (Eds. G. T. Hahn and M. F. Kanninen). – 1972. – P. 336 – 358.
8. *Зезин Ю. П.* Влияние гидростатического давления на вязкость разрушения полимерных материалов // *Механика композитных материалов.* – 1986. – № 6. – С. 973 – 977.
9. *Пат. № 541742670A1.* Россия. Установка для испытания материалов на растяжение при гидростатическом давлении / Ю. П. Зезин, Ю. И. Козырев. – Оpubл. 17. 11. 86, Бюл. № 23.
10. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 581 с.
11. *Акимов Г. Я., Прохоров И. Ю.* Трещиностойкость гидростатически сжатых щелочно-галогидных монокристаллов // *Пробл. прочности.* – 1987. – № 7. – С. 23 – 28.

Поступила 21. 06. 2000