

УДК 621.9.02.6

Л. Н. Девин¹, В. С. Панов², доктора техн. наук; А. Г. Сулима,¹
А. В. Губа³ аспиранты

¹ Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины,
г. Киев, Украина

² МИСиС, г. Москва, Россия

³ ПГТУ, г. Мариуполь, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

The method of fracture energy measuring under high velocity loading is described. The possibility to determine fracture energy by using Hopkinson-Kolsky bars on brittle materials was showing.

Получить комплекс характеристик, предъявляемых в настоящее время к инструментальным материалам, работающим при высоких динамических нагрузках, можно, создав композиционные материалы, в которых собраны воедино лучшие качества структурных составляющих. Большие возможности, заложенные в композитах, можно реализовать путем оптимального выбора компонентов, их концентрации, размеров, ориентации и прочности соединения их друг с другом. Для исследования влияния этих факторов на механические свойства композитов с твердыми дисперсными частицами в хрупкой матрице наиболее целесообразно применять методические подходы линейной механики разрушения. Согласно этим подходам реальная прочность материала связывается с его энергией разрушения, модулем упругости и размером трещины, обуславливающим начало разрушения, так как для получения высокой прочности необходимы большая энергия разрушения и высокий модуль упругости [1]. Однако определить работу разрушения хрупких материалов, тем более в условиях ударных нагрузок, сложно в силу небольшого значения измеряемых величин и значительных осцилляций нагрузки в момент разрушения образца. Кроме того, необходимо учитывать инерционные эффекты в испытательных машинах. Решению этой актуальной проблемы посвящена данная работа.

Традиционно энергию разрушения (ударную вязкость) стальных образцов определяют на маятниковых копрах с падающим грузом. Эти испытания благодаря основополагающим работам Н. Н. Давиденкова [2] получили широкое распространение. Они дают возможность сравнительно легко проводить качественную оценку склонности материалов к хрупкому разрушению исходя из усредненных энергетических характеристик этого процесса разрушения. Но даже использование осциллографирования образцов с трещинами (так называемые испытания по Шарпи) [3] не позволяет установить энергию разрушения на образцах из хрупких материалов и устранять значительные осцилляции нагрузки в момент старта трещины.

В последние годы были созданы испытательные установки на базе мерных стержней Гопкинсона [4], которые даже при испытании хрупких материалов позволяют с достаточной для практических целей точностью определять критическую нагрузку в момент разрушения. Дальнейшее развитие измерительной системы позволило за счет измерения баланса энергии в стержнях определять работу, затраченную на разрушение образцов.

Измерительная схема установки на базе мерных стержней представлена на рис.1. Она позволяет регистрировать прямой, отраженный и прошедший через образец ударные импульсы [5] (рис. 2).

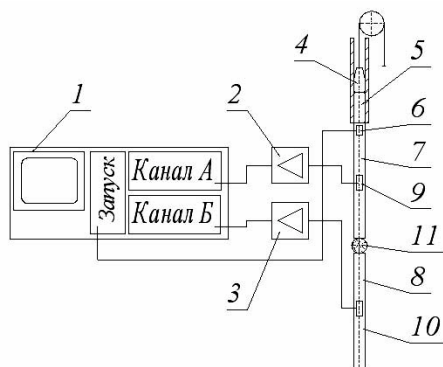


Рис. 1. Измерительная схема копра на базе мерных стержней Гопкинсона: 1 – осциллограф С9–8; 2, 3 – предварительный усилитель; 4 – электромагнит; 5 – боек; 6 – датчик запуска; 7, 8 – стержни; 9, 10 – датчики; 11 – образец.

Предел упругости стержней значительно выше предела текучести образца. В момент удара бойка по плоскому торцу стержня в нем возбуждается упругая волна сжатия. После записи результатов измерения параметров однократного импульса нагрузки получаем три параметрические зависимости импульсов деформации в мерных стержнях прямой $\varepsilon^1(t)$, отраженной $\varepsilon^R(t)$ и прошедшей через образец $\varepsilon^T(t)$ волн [6]. В результате испытаний были получены осциллограммы изменения силы во времени: P_1 – в нагружаемом стержне и P_2 – в опорном стержне.

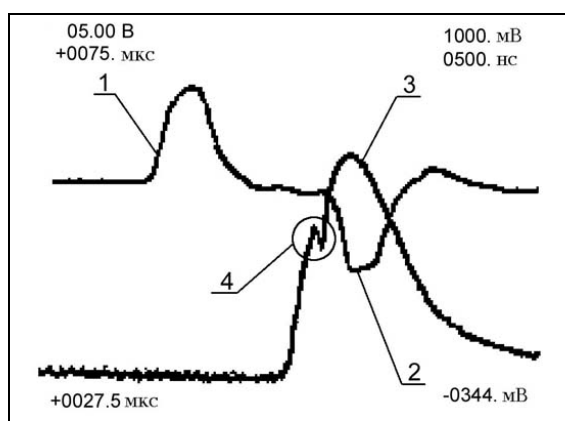


Рис. 2. Осциллограммы импульсов нагрузки в мерных стержнях.

вой скоростью $\frac{dU}{dt}$ соотношением (1):

Ударная волна, формируемая бойком, проходит через стержень 3 в образец и далее – в опорный стержень 1. Для регистрации волны напряжений на стержни наклеены тензорезисторы с малой базой, включенные по потенциометрической схеме в источник постоянного тока на входе усилителя. Далее сигнал фиксируется цифровым запоминающим осциллографом. Внешний однократный запуск осциллографа осуществляется сигналом от верхнего датчика на стержне 3. По осциллограмме прямого, отраженного и прошедшего через образец импульсов определяли значения энергии, массовой скорости в упругой волне деформации, перемещения любого сечения стержней и деформации образца в любой момент времени.

Схема испытаний образца представлена на рис. 3. Между двумя стержнями одинакового диаметра помещается образец из исследуемого материала малой длины l_s .

Предел упругости стержней значительно выше предела текучести образца. В момент удара бойка по плоскому торцу стержня в нем возбуждается упругая волна сжатия. После записи результатов измерения параметров однократного импульса нагрузки получаем три параметрические зависимости импульсов деформации в мерных стержнях прямой $\varepsilon^1(t)$, отраженной $\varepsilon^R(t)$ и прошедшей через образец $\varepsilon^T(t)$ волн [6]. В результате испытаний были получены осциллограммы изменения силы во времени: P_1 – в нагружаемом стержне и P_2 – в опорном стержне.

Количество упругой энергии W в волне деформации определяли путем интегрирования импульсов нагрузки P согласно формуле:

$$W = \frac{C}{E \cdot F} \int_{\tau_0}^{\tau_1} P^2(\tau) d\tau,$$

где F – площадь сечения стержней, C – скорость звука в материале стержней, $C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, E , ρ – соответственно модуль упругости и плотность материала стержней.

Согласно теории распространения упругих волн напряжений в длинных стержнях деформация ε в произвольном сечении стержня связана с массо-

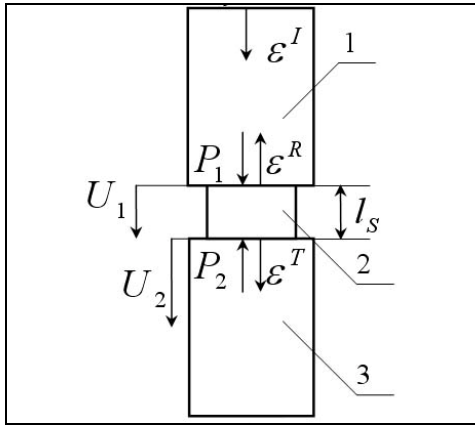


Рис. 3. Упрощенная схема испытаний образца, 1 – нагружаемый стержень, 2 – испытуемый образец, 3 – опорный стержень, U_1 , U_2 – перемещение торцов стержней.

$$\varepsilon = -\frac{1}{C} \cdot \frac{dU}{dt}. \quad (1)$$

Следовательно:

$$U = -C \int_0^t \varepsilon \cdot dt. \quad (2)$$

Тогда уравнения перемещения торцов стержней U_1 и U_2 при деформации образца будут иметь следующий вид:

$$U_1 = -C \int_0^t (\varepsilon^I - \varepsilon^R) \cdot dt; \quad (3)$$

$$U_2 = -C \int_0^t \varepsilon^T \cdot dt. \quad (4)$$

В этом случае деформация образца равна:

$$\varepsilon = \frac{(U_2 - U_1)}{l_s}. \quad (5)$$

После преобразования на основе формул 3 и 4 с учетом соотношения $\varepsilon^I - \varepsilon^R = \varepsilon^T$ получим:

$$\varepsilon = -\frac{2C}{l_s} \int_0^t \varepsilon^R dt. \quad (6)$$

Для определения напряжений в образце необходимо определить силы P_1 и P_2 на торцах образца, выразив их через деформацию:

$$P_1 = EF(\varepsilon^I - \varepsilon^R); \quad (7)$$

$$P_2 = EF\varepsilon^T. \quad (8)$$

Напряжение в образце:

$$\sigma = \frac{(P_1 + P_2)}{2F_s}. \quad (9)$$

После преобразований с учетом зависимостей 7 и 8:

$$\sigma = \frac{EF\varepsilon^T}{F_s}, \quad (10)$$

где F_s – площадь поперечного сечения образца. Выведенные зависимости позволяют

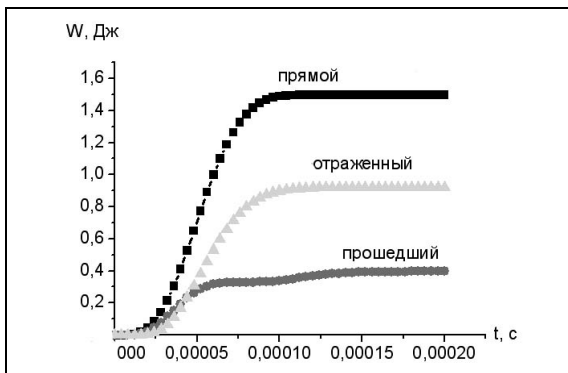


Рис. 4. Изменение энергий в волнах прямого, прошедшего и отраженного импульсов.

по данным регистрации деформации ε^R и ε^T вычислять напряжения σ и деформацию ε образца, а затем строить диаграмму динамического деформирования $\sigma \sim \varepsilon$.

На рис. 4 приведен график изменения энергий прямого, прошедшего и отраженного импульсов при нагружении образца диаметром 10 мм.

Исходя из закона сохранения энергии можно определить потери механической энергии:

$$E_{ном} = W_{11} - W_{12} - W_{21},$$

где W_{11} – энергия прямой волны, W_{12} – энергия отраженной волны, W_{21} – энергия волны, прошедшей через образец.

Если бы образец претерпевал пластические

деформации или разрушался, то E_{nom} определяла бы величину энергетических затрат на эти процессы. При близких к идеальным испытаниям, т. е. когда стержни и образец представляют собой упругие тела, которые пластически не деформируются и не разрушаются, E_{nom} представляет собой погрешность определения баланса механической энергии $E_{ногр} = E_{nom}$, которая в нашем случае составила не более 10 % измеряемой величины. При хрупком разрушении образца баланс энергий отличен от нуля и в этом случае энергия затрачивается на образование новых поверхностей. Если кинетической энергией разлета осколков пренебречь (согласно оценке она составляет менее 2 % работы разрушения), то работа по образованию новых поверхностей A (поверхностная энергия) : $A = E_{nom} = W_{11} - W_{12} - W_{21}$. Тогда удельная поверхностная энергия: $A_{уд} = \frac{A}{S} = \frac{A}{2t(D - 2l)}$.

В соответствии с разработанной методикой были испытаны образцы горячепрессованных WC – Co твердых сплавов с добавками меди, алмазосодержащих композитов на основе горячепрессованных твердых сплавов (с магнитными – М и немагнитными – Н алмазами) и экспериментальных твердых сплавов МИСИС, полученных методом вакуумного и компрессионного спекания. Образцы в форме дисков диаметром $D=8-10$ мм и толщиной $t=2,5-3$ мм испытывали при диаметральной сжатии. В образцах выполнялся центральный надрез длиной $2l$.

Результаты определения механических характеристик образцов из твердых сплавов и композитов приведены в таблице .

Результаты определения механических характеристик образцов из твердых сплавов и композитов

Материал	Предел прочности при диаметральной сжатии σ_p , МПа	Трещиностойкость K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	Работа разрушения A , Дж	Удельная поверхностная энергия $A_{уд}$, Дж/мм ²
ВК6Г	50,2	6,8	0,38	0,013
ВК6Г+0,8Cu	51,2	6,5	0,13	0,003
ВК6Г+1,6Cu	54,5	7,8	0,57	0,015
ВК6Г+3,2Cu	57,9	8,4	0,67	0,019
Славутич М	41,6	–	0,17	0,0035
Славутич Н	42,4	–	0,22	0,0043

Из таблицы видно, что при содержании меди 1,6 % прочность и удельная поверхностная энергия возрастают, что свидетельствует о положительном влиянии меди на работу разрушения данного класса материалов. При этом малое содержание меди (0,8 %) может приводить к охрупчиванию сплава и уменьшению удельной поверхностной энергии. Наличие алмазных частиц также приводит к снижению прочности и особенно удельной поверхностной энергии. При этом прочность и удельная поверхностная энергия для магнитных (с металлическими включениями) алмазов ниже, чем немагнитных (без включений).

Образцы МИСИС, содержащие WC+8% Ni₃Al, которые были получены методами вакуумного и компрессионного спекания, испытывали на прочность при диаметральной сжатии. Установлено, что прочность образцов компрессионного спекания несколько выше, чем образцов вакуумного спекания (448 и 435 МПа соответственно). При этом их пористость также была меньше, что свидетельствует о преимуществах компрессионного спекания.

Литература

1. Композиционные материалы. Т. 5 Разрушение и усталость. – М.: Мир, 1978. – 237 с.
2. Давиденков Н. Н. Динамические испытания материалов. – М.: Госиздат, 1929. – 430 с.
3. Погодин-Алексеев Г. И. Динамическая прочность и хрупкость металлов. – М.: Машиностроение, 1973. – 201 с.
4. Новиков Н. В., Девин Л. Н., Иванов С. А. Силовой измерительное устройство для динамических испытаний материалов. – Заводская лаборатория. – 1980. – 46 – №7. – С. 665 – 667.
5. Дэйвис Р. М. Волны напряжений в твердых телах. - М.: ИЛ, 1961. –243 с.
6. Коротких Ю. Г., Пуртов Ю. Б. Численное исследование процесса динамического деформирования разрезного стержня Гопкинсона // Механика деформированного твердого тела. – Новосибирск: Институт гидродинамики, 1979. – № 41. – С. 60–64.

Поступила 05.06.2006 г.