

05

## Модификация метода Кольского для определения прочности хрупких материалов на срез

© А.М. Брагов<sup>1</sup>, А.К. Ломунов<sup>1,2</sup>, А.Ю. Константинов<sup>1</sup>,  
Д.А. Ламзин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

<sup>2</sup> Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород  
E-mail: bragov@mech.unn.ru

Поступило в Редакцию 31 марта 2016 г.

Предложена и апробирована новая модификация метода Кольского, которая предполагает нагружение образца, размещенного в разрезанной по наклонной плоскости обойме, что дает возможность определять прочность малопластичных материалов на срез.

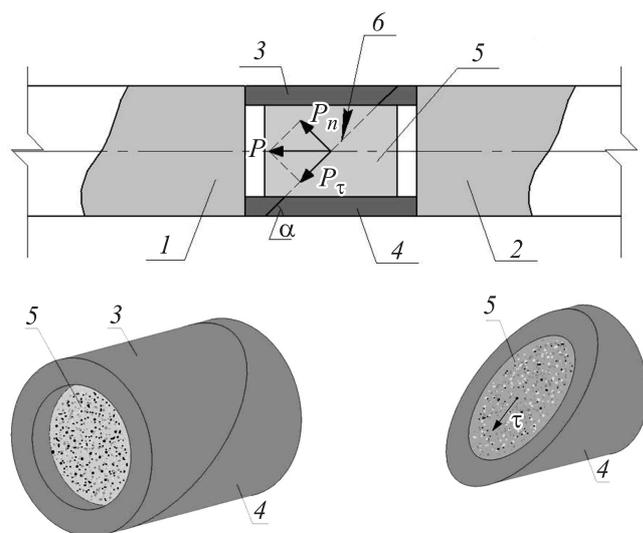
DOI: 10.21883/PJTF.2017.02.44192.16280

Срез в чистом виде представляет собой разделение элемента на две части по сечению, к которому приложены перерезывающие силы. Известно несколько основных схем испытаний материалов на срез (сдвиг) при динамическом нагружении:

— образец в виде прямоугольного параллелепипеда размещается в системе разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) между торцами мерных стержней специальной конфигурации, которые работают как матрица и пуансон [1];

— образец в виде пластины размещается между нагружающим стержнем и опорной трубкой, внутренний диаметр которой чуть больше диаметра стержня [2];

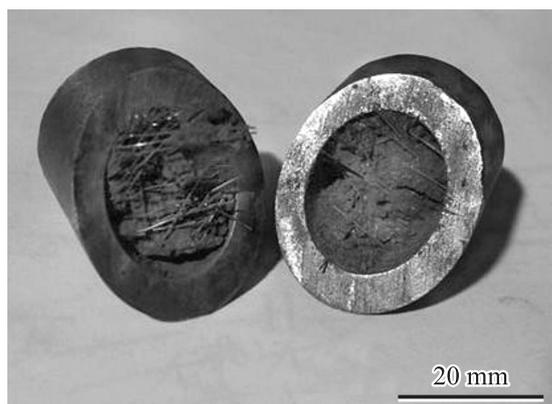
— образцы специальных конфигураций размещаются в системе РСГ между плоскими торцами мерных стержней [3,4], что вызывает определенные трудности при изготовлении образцов.



**Рис. 1.** Схема испытания на срез: 1 — нагружающий стержень, 2 — опорный стержень, 3, 4 — части разрезной обоймы, 5 — образец, 6 — плоскость среза.

В первом варианте испытаний происходит срез образца по двум параллельным плоскостям, а в последних двух вариантах — по кольцевой поверхности или по плоскости.

В данной работе предложен простой и эффективный метод определения динамической прочности на срез хрупких материалов, таких как бетоны, горные породы, керамики, композиты и т.п., основанный на методе Кольского с использованием РСГ [5]. В предложенной и реализованной модификации РСГ для определения динамической прочности на срез образец из исследуемого материала 5 располагается в жесткой (стальной) обойме 3 и 4, разрезанной под углом  $\alpha$  к горизонтали (рис. 1). Для того чтобы образец подвергался только срезу без сжатия, его длина должна быть меньше длины разрезной обоймы. Обойма с образцом размещается между мерными стержнями: нагружающим 1 и опорным 2. Нагружение системы РСГ осуществлялось ударом стального бойка, разогнанного в стволе газовой пушки. Диаметр бойка и мерных стержней был 20 мм, их предел текучести



**Рис. 2.** Образец фибробетона после испытания на срез.

составлял 2000 МПа. Длина мерных стержней составляла по 1.5 м каждый. Поскольку предел текучести обоймы не менее чем на порядок превышал прочность испытуемого образца, то обойму можно считать недеформируемой. Импульс сжатия, возбуждаемый ударом бойка в нагружающем стержне, вызывает небольшое смещение двух частей разрезной обоймы по плоскости среза, что приводит к деформированию и разрушению хрупкого образца.

Усилие  $P(t)$ , действующее на обойму, можно определить по импульсу деформации  $\varepsilon^T(t)$ , зарегистрированному в опорном стержне:

$$P(t) = EA\varepsilon^T(t), \quad (1)$$

где  $E$  и  $A$  — соответственно модуль Юнга и площадь поперечного сечения опорного стержня.

Это усилие можно разложить на две составляющие: касательную  $P_\tau(t)$ , которая параллельна плоскости среза, и нормальную  $P_n(t)$ , которая перпендикулярна плоскости среза. Таким образом:

$$\begin{aligned} P_\tau(t) &= P \cos \alpha, \\ P_n(t) &= P \sin \alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

Напряжение при срезе, действующее в образце, можно вычислить, если отнести  $P_\tau(t)$  к площади сечения образца в плоскости среза  $A_S$

(площади эллипса):

$$A_S = \frac{\pi R^2}{\sin \alpha}, \quad (3)$$

где  $R$  — внутренний радиус обоймы.

Таким образом, учитывая (1)–(3), получим временную зависимость срезающего напряжения в образце

$$\tau(t) = \frac{P_\tau(t)}{A_S} = \frac{EA \cos \alpha \sin \alpha}{\pi R^2} \varepsilon^T(t).$$

Перемещение точек образца на плоскости среза можно определить, если рассмотреть перемещение торцов мерных стержней. Перемещение левого торца  $U_1(t)$  складывается из перемещения  $U_1^I(t)$ , вызванного распространением падающего импульса  $\varepsilon^I(t)$ , и перемещения  $U_1^R(t)$ , вызванного распространением отраженного импульса  $\varepsilon^R(t)$ :

$$U_1(t) = C \int_0^t (\varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t)) dt.$$

Перемещение правого торца  $U_2(t)$  вызвано распространением прошедшего импульса  $\varepsilon^T(t)$

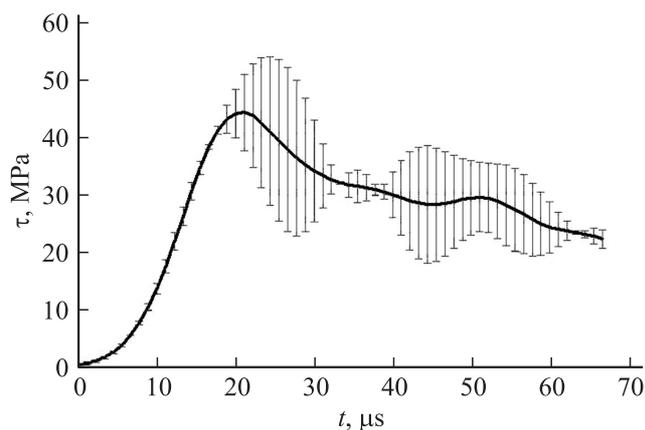
$$U_2(t) = C \int_0^t \varepsilon^T(t) dt.$$

Среднее горизонтальное перемещение точек частей разрезной обоймы будет равно

$$\Delta l(t) = U_1(t) - U_2(t) = C \int_0^t (\varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t) - \varepsilon^T(t)) dt.$$

Предполагая, что жесткость обоймы намного больше жесткости образца, и пренебрегая ее деформацией, можно определить перемещение точек образца на наклонной плоскости среза

$$\Delta l_\tau(t) = \frac{\Delta l(t)}{\cos \alpha} = \frac{C}{\cos \alpha} \int_0^t (\varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t) - \varepsilon^T(t)) dt,$$



**Рис. 3.** Динамическая диаграмма, полученная при испытании фибробетона на срез.

а относительное перемещение этих точек выразится формулой

$$\varepsilon_{\tau}(t) = \frac{\Delta l_{\tau}(t)}{l_0} = \frac{C \operatorname{tg} \alpha}{2R} \int_0^t (\varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t) - \varepsilon^T(t)) dt,$$

где  $l_0$  — удвоенная большая полуось эллиптического сечения образца в плоскости среза.

Таким образом, данная методика позволяет строить зависимость срезающего напряжения от времени или перемещения точек образца по импульсам деформации мерных стержней. При этом для достоверного определения величины перемещений импульсы деформации мерных стержней должны быть строго согласованы во времени. Поэтому тензодатчики целесообразно наклеивать на стержни на одинаковом расстоянии от торцов образца, чтобы обеспечить одновременный приход отраженного и прошедшего импульсов в сечения нагружающего и опорного стержней, в которых осуществляется регистрация.

Данная методика была апробирована при испытаниях ряда хрупких сред: бетонов, горных пород, керамик. Для примера на рис. 2 показан вид разрушенного образца мелкозернистого фибробетона. Средняя зависимость срезающего напряжения от времени с достоверными

интервалами при 95%-м уровне надежности приведена на рис. 3. Скорость роста напряжений в экспериментах варьировалась изменением скорости бояка, и в данном опыте она составила примерно 3600 GPa/s. Можно сказать, что разрушение образцов в экспериментах происходило практически по плоскости среза.

Таким образом, предложена простая модификация метода Кольского, позволяющая определять одну из важных характеристик хрупких материалов — прочность на срез при высокой скорости деформации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-38-60122 мол\_а\_дк, 15-08-05517\_а.

## Список литературы

- [1] *Hosur M.V., Waliul Islam S.M., Vaidya U.K. et al. // Composite Structures. 2005. V. 70. P. 295–307.*
- [2] *Libo Ren, Bazle A. Gama, John W. Gillespie Jr., Chian-Fong Yen. Dynamic Punch Shear Behavior of Unidirectional and Plain Weave S-2 Glass/SC15 Composites. Final report under contract DAAD19-01-2-0005 (2004). 36 p.*
- [3] *Sia Nemat-Nasser, Jon B. Isaacs, Mingqi Liu // Acta Materialia. 1998. V. 46. P. 1307–1325.*
- [4] *Gray III G.T., Vecchio K.S., Livescu V. // Acta Materialia. 2016. V. 103. P. 12–22.*
- [5] *Брагов А.М., Ломунов А.К. // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация конструкций. Всесоюз. межвуз. сборник. 1995. С. 127–136.*