

05

## Ударопрочные керамические материалы на основе карбида кремния

© С.Н. Перевислов<sup>1</sup>, И.А. Беспалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт стали, Москва  
E-mail: perevislov@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 ноября 2016 г.

Определена пулестойкость косвенным методом, путем оценки времени задержки проникновения пули в керамику на основе карбида кремния, полученную реакционным, жидкофазным спеканием и горячим прессованием.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.15.44873.16552

Высокотвердые материалы, такие как керамика, более эффективны в качестве защиты против воздействия пули с термоупрочненным стальным сердечником, чем другие материалы (в частности, металлы). По сравнению с другими видами керамик карбид кремния обладает уникальными свойствами: высокими твердостью и модулем упругости, а также низкой плотностью (в 2.5 раза ниже плотности стали) [1].

Скорость прохождения ударной волны в бронематериале зависит от его плотности и модуля упругости. Твердость важна при определении исходного разрушения пули. Высокая скорость распространения ударной волны позволяет рассеивать кинетическую энергию пули. Важными свойствами керамических материалов, определяющими качество брони и влияющими на степень ее пулестойкости, являются коэффициент трещиностойкости и прочность при изгибе [2].

Броневые материалы на основе карбида кремния получают горячим прессованием, реакционным и жидкофазным спеканием и др. Метод спекания в 3–5 раз дешевле горячего прессования, однако получать крупногабаритные броневые плиты размером более 200 × 200 mm путем свободного спекания достаточно сложно [3].

Реакционно-спеченный (самосвязанный) карбид кремния (SiSiC) широко распространен в промышленности благодаря практически

Таблица 1. Составы образцов, исследуемых в работе

Материал	Плотность $\rho \pm 0.02$ , $\text{g/cm}^3$	Пористость $V_{pt} \pm 0.2$ , %	Модуль упругости $E_{el} \pm 15$ , GPa	Прочность при изгибе $\sigma_{st} \pm 10$ , MPa	Коэффициент трещиностойкости $K_{IC} \pm 0.1$ , $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$	Твердость $\text{HV} \pm 0.2$ , GPa
SiSiC	3.07	0.5	320	390	3.5	21.5
LPSSiC*	3.22	3.1	380	420	4.5	21.0
LPSSiC**	3.25	1.8	390	450	5.0	20.4
HPSiC***	3.15	2.2	420	650	6.5	23.8

\* 90 mass%. SiC + 10 mass%. YAG.

\*\* 85 mass%. SiC + 15 mass%. YAG.

\*\*\* 95 mass%. SiC + 5 mass%. YAG.

безусадочной технологии и низкой температуре спекания. SiSiC-материалы получают пропиткой жидким кремнием пористых заготовок, включающих первичный карбид кремния ( $\text{SiC}^{\text{I}}$ ) и углерод, за счет образования на поверхности первичных частиц вторичного карбида ( $\text{SiC}^{\text{II}}$ ). Этот метод приводит к получению плотных композитов SiC/SiC при температуре  $\geq 1600^\circ\text{C}$  [4], обладающих повышенной хрупкостью, что снижает его пустотность. Свойства SiSiC-материалов представлены в табл. 1.

Перспективным материалом, спекающимся до высокой относительной плотности ( $\rho_r \geq 98\%$ ), является жидкофазно-спекенный карбид кремния (LPSSiC). Его главными преимуществами по сравнению с горячепрессованными материалами являются возможность получения материалов сложной геометрической формы в широком диапазоне размеров и их высокая производительность. К недостаткам материалов можно отнести значительную усадку при спекании [5]. Спеченный материал характеризуется наличием зерен SiC, связанных оксидной фазой. Уровень механических свойств LPSSiC выше такового для SiSiC-материалов (табл. 1).

Горячепрессованные SiC-материалы (HPSiC) получают спеканием мелкодисперсного SiC-порошка с 3–5 mass% оксидных добавок при температуре 1700–1800°C [5]. В процессе горячего прессования формируется монолитный, низкопористый материал с высоким уровнем механических свойств (табл. 1). Однако большая энергоемкость и низкая производительность ограничивают получение изделий HPSiC в промышленном масштабе.

Полученные материалы обладают низкой пористостью, что определяет высокий уровень  $K_{1C}$  и HV. Коэффициент трещиностойкости материала зависит от прочности межзеренного сцепления на границе фаз. По сравнению с SiSiC-материалами коэффициент трещиностойкости которых определяется слабой прочностью на границах раздела фаз  $\text{SiC}^{\text{I}}-\text{SiC}^{\text{II}}$  и  $\text{SiC}^{\text{I}}-\text{Si}$  —  $K_{1C} = 3.5 \pm 0.1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  [6], коэффициент трещиностойкости LPSSiC-материалов выше —  $K_{1C} = 5.0 \pm 0.1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  (с добавкой 15 mass% YAG) (табл. 1).

Твердость керамических материалов зависит от твердости входящих в их состав фаз и при увеличении содержания оксидов как менее твердых компонентов уровень HV снижается (табл. 1).

Максимальный уровень свойств достигается на HPSiC- и LPSSiC-материалах (при 15 mass% YAG). Повышению свойств SiSiC

могут способствовать введению в состав материала волокон  $C_f$  и  $SiC_f$  и регулирование зернового состава исходных компонентов, размера и конфигурации пор, количества кремния.

Разрушение исследуемых материалов идет преимущественно по интеркристаллитному механизму, трещина распространяется по межзеренной связке, огибая зерна  $SiC$ .

Испытания на пулестойкость керамических материалов проводили путем определения времени задержки проникания высокоскоростных ударников в керамическую броню [7] в РЦИ СИЗ ОАО „НИИ стали“. Принцип метода основан на предположении, что величина, на которую укорачивается сердечник пули при пробитии свободно подвешенной керамической пластины, определяется временем задержки проникновения в керамику ( $t_p$ )

$$l_{init} - l_{res} = v_0 \cdot t_p$$

где  $l_{init}$  — начальная длина сердечника пули, равная 28.5 mm,  $l_{res}$  — остаточная длина сердечника после пробития преграды,  $v_0$  — начальная скорость пули.

Время задержки проникания ударника в керамику определяется как видом и свойствами керамики, так и свойствами ударника, а именно плотностью, твердостью, формой и скоростью пули. Поэтому если проводить испытания керамических пластин в одинаковых условиях (один вид керамики и равный выбранный перечень свойств ударника), то время задержки проникания ударника в керамику условно можно считать показателем „броневых“ свойств материала. Наиболее подходящей в качестве стандартного ударника оказалась бронебойно-зажигательная пуля Б-32 калибра 7.62 mm, имеющая максимальные характеристики: твердость и плотность. Штатная скорость пули, выпущенной из снайперской винтовки Драгунова, на расстоянии 5 m от дульного среза составляет  $818 \pm 17$  m/s.

Поскольку в процессе распространения по керамическому слою ударные волны быстро затухают, предполагается, что для достижения достаточного для разрушения уровня растягивающих напряжений и времени их действия требуется несколько волновых пробогов по слою керамики

$$t_p = n_{pr} \frac{h_c}{c_c}, \quad (1)$$

где  $h_c$  — толщина керамики,  $c_c$  — скорость звука в керамике,  $n_{pr}$  — число волновых пробогов, необходимое для разрушения (безразмерное время задержки проникания ударника в керамику) [8].

**Таблица 2.** Результаты баллистических испытаний исследуемых керамических материалов на основе карбида кремния

Материал	Количество оксидных добавок, mass%	Толщина плитки $h_c$ , mm	Начальная скорость пули $v_{init} \pm 2$ , m/s	Остаточная длина сердечника $l_{res} \pm 0.1$ , mm	Безразмерное время задержки проникновения $n_{pr} \pm 0.2$
SiSiC	–	8.9	817	17.2	16.3
LPSSiC	10	9.1	819	13.2	20.6
	15	9.0	815	13.0	22.2
HPSiC	5	8.6	817	12.7	23.6

Для освобождения от геометрического параметра (толщины керамического слоя) принимаем за показатель качества керамики  $n_{pr}$ . При определении  $n_{pr}$  толщину пластины относили к некоторой постоянной скорости звука (для карбида кремния  $c_c = 10.5 \text{ km/s}$ ):

$$n_{pr} = t_p \frac{c_c}{h_c}.$$

В табл. 2 приведены результаты испытаний пулестойкости керамики (по 3 плитки каждого состава).

Высокий уровень механических свойств НPSiC-материалов определяет их значительную пулестойкость. Показатель  $n_{pr}$  LPSSiC (15 mass% YAG) составляет  $22.2 \pm 0.2$  (табл. 2) и приближается к уровню  $n_{pr}$  НPSiC-материала. Для повышения значения  $n_{pr}$  SiSiC-керамики целесообразно в состав материала вводить армирующие компоненты (волокна  $C_f$  и  $SiC_f$ ), повышающие уровень механических свойств и, вероятнее всего, пулестойкость.

Косвенный метод определения пулестойкости керамики путем определения времени задержки проникновения пули хорошо согласуется с результатами измерения бронестойкости панелей, содержащих керамические плитки на основе SiC, по ГОСТ 50744-95 и может быть использован при оценке качества единичных керамических элементов.

## Список литературы

- [1] Анастасиади Г.П., Сильников М.В. Работоспособность броневых материалов. СПб.: Астерион, 2004. 624 с.
- [2] Каннель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В. и др. Ударно-волновое явление в конденсированных средах. М.: Изд-во „Янус-К“, 1996. 408 с.
- [3] Briggs J. Engineering ceramics in Europe and the USA. UK–Worcester, 2011. 331 p.
- [4] Yanxiang B., ShouHong T., Dongliang J. // Ceramics International. 2004. V. 30(3). P. 435–439.
- [5] Перевислов С.Н., Несмелов Д.Д. // Огнеуп. и техн. керамика. 2014. № 4/5. С. 3–13.
- [6] Синани А.Б., Кожушко А.А., Зильбербранд Е.Л. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34(3). С. 27–31.
- [7] Беспалов И.А., Григорян В.А., Кобылкин И.Ф. // Вопросы оборонной техники. Серия 15–Композиц. неметаллич. материалы в машиностроении. 2011. № 1–2. С. 34–38.
- [8] Григорян В.А. и др. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования. М.: Радиософт, 2008. 406 с.